ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК

ISSN 2072-8921 (Print)
ISSN 3034-3941(Online)

ФГБОУ ВО
АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. И. И. ПОЛЗУНОВА

№ 2
2026

Ползуновский ВЕСТНИК

ISSN 2072-8921 (Print)
ISSN 3034-3941 (Online)

Регистрационный номер ПИ № ФС 77-75624 выдан Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 19.04.2019 г.

Префикс DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921
ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С ОКТЯБРЯ 2002 г.
Периодичность – 4 номера в год

№ 2 2026 г.

Научный журнал
входит в перечень ВАК (К1), RSCI (ядро РИНЦ), Белый список (2)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Гурьев Алексей Михайлович
д.т.н., проф. АлтГТУ (г. Барнаул)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Маюрникова Лариса Александровна
д.т.н., проф., зав. каф. «Технология и организация общественного питания» КемГУ (г. Кемерово)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сакович Г. В., академик РАН (г. Бийск)
Мэй Шунчи, проф., декан УТУ (г. Ухань, Китай)
Лыгденов Б. Д., д.т.н., проф. УТУ(г. Ухань, Китай)
Солтан О. И. А., к.т.н., лектор каф. «Наука о продуктах питания» , Сельскохозяйственный факультет, Миния университет (г. Эль-Миния, Египет)
Дебердеев Т. Р., д.т.н., зав. каф. «Технологии переработки полимеров и композиционных материалов» КНИТУ(г. Казань)
Ильясов С. Г., д.х.н., заместитель директора по научной работе ИПХЭТ СО РАН (г. Бийск)
Блазнов А. Н., д.т.н., заведующий лабораторией материаловедения и минерального сырья ИПХЭТ СО РАН, (г. Бийск)
Петров Е. А., д.т.н., проф., декан инженерного спецфакультета БТИ (г. Бийск)
Деев В. Б., д.т.н., проф., заведующий кафедрой «Оборудование и технологии сварочного производства», Московский политехнический университет (Московский Политех) (г. Москва)
Батаев В. А., д.т.н., проф. НГТУ (г. Новосибирск)
Коновалов С. В., д.т.н., проф., проректор по научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (г. Новокузнецк)
Тамова М. Ю., д.т.н., проф., зав. каф. «Общественного питания и сервиса» КубГТУ (г. Краснодар)
Попов В. Г., д.т.н., доц., зав. каф. «Товароведение и технологии продуктов питания» ТИУ (г. Тюмень)
Егорова Е. Ю., д.т.н., доц., зав. каф. «Технология хранения и переработки зерна» АлтГТУ (г. Барнаул)
Майоров А. А., д.т.н., проф., главный научный сотрудник ФГБНУ ФАНЦА (г. Барнаул)
Новоселов С. В., д.т.н., доц. АлтГТУ (г. Барнаул)
Коньшин В. В., д.т.н., проф., зав. каф. «Химическая технология» АлтГТУ (г. Барнаул)
Романов А. С., д.т.н., проф., Международная промышленная академия (г. Москва)
Алтухов И. В., д.т.н., доц. ИрГАУ (г. Иркутск)
Мусина О. Н., д.т.н., доц., АлтГТУ (г. Барнаул)
Гуринович Г. В., д.т.н., проф., зав. каф. «Технология продуктов питания животного происхождения» КемГУ (г. Кемерово)
Ананьева Е. С., к.т.н., доц. АлтГТУ (г. Барнаул)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ВЫПУСК

Стопорева Татьяна Александровна,
к.т.н., начальник ОРПД АлтГТУ (г. Барнаул)

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР

Проскура Николай Анатольевич,
редактор АлтГТУ (г. Барнаул)

УЧРЕДИТЕЛИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. И. ПОЛЗУНОВА»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ВОДНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ИНДЕКС: **73664 (Урал-Пресс)**

АДРЕС РЕДАКЦИИ И ИЗДАТЕЛЯ

656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина 46, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (АлтГТУ), тел. (3852) 29-09-46, e-mail: polz_journal@mail.ru, Стопорева Т. А.
Сайт журнала: https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest
Дата выхода в свет 20.08.2026 г.
Цена 800 рублей.

CC BY

Polzunovskiy VESTNIK

ISSN 2072-8921 (Print)
ISSN 3034-3941 (Online)

DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921
EST. IN 2002.

Publication frequency: quarterly

№ 2 2026 SCIENTIFIC JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF

Aleksey Guriev
Doctor of Technical Sciences, professor at ASTU, Barnaul, Russia

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEf

Larisa Mayurnikova
Doctor of Technical Sciences, professor at KemSU, Kemerovo, Russia

EDITORIAL BOARD

Gennady Sakovich, RAS academician, Biysk, Russia
Mei Shunqi, professor, WTU, Wuhan, China
Burial Lygdenov, Doctor of Technical Sciences, WTU, Wuhan, China
Soltan Osama Ismaeil Ahmed, Candidate of Technical Sciences, Lecturer, Minia University, El-Minia, Egyp
Raimond Besson, professor, Besancon, France
Timur Deberdev, Doctor of Technical Sciences, KNRTU, Kazan, Russia
Sergey Iliyasov, Doctor of Chemical Sciences, IPCET SB RAS, Biysk, Russia
Aleksey Blaznov, Doctor of Technical Sciences, IPCET SB RAS, Biysk, Russia
Evgeny Petrov, Doctor of Technical Sciences, BTI, Biysk, Russia
Vladislav Deev, Doctor of Technical Sciences, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
Vladimir Bataev, Doctor of Technical Sciences, NSTU, Novosibirsk, Russia
Sergei Konovalov, Doctor of Technical Sciences, Siberian state Industrial University, Novokuznetsk, Russia
Maya Tamova, Doctor of Technical Sciences, KubSTU, Krasnodar, Russia
Vladimir Popov, Doctor of Technical Sciences, TIU, Tyumen, Russia
Elena Egorova, Doctor of Technical Sciences, ASTU, Barnaul, Russia
Aleksandr Mayorov, Doctor of Technical Sciences, FASCA, Barnaul, Russia
Sergei Novoselov, Doctor of Technical Sciences, ASTU, Barnaul, Russia
Vadim Konshin, Doctor of Technical Sciences, ASTU, Barnaul, Russia
Aleksandr Romanov, Doctor of Technical Sciences, professor, International Industrial Academy, Moscow, Russia
Igor Altukhov, Doctor of Technical Sciences, Associate professor, IrSAU, Irkutsk, Russia
Galina Gurinovich, Doctor of Technical Sciences, professor, KemSU, Kemerovo, Russia
Elena Anan'eva, Candidate of Technical Sciences, Associate professor, ASTU, Barnaul, Russia

ISSUE MANAGER

Tatiana Stoporeva
Candidate of Technical Sciences, ASTU, Barnaul, Russia

TECHNICAL EDITOR

Nikolay Proskura
Editor, ASTU, Barnaul, Russia

FOUNDERS

POLZUNOV ALTAI STATE TECHNICAL UNIVERSITY (ASTU)

INSTITUTE FOR WATER AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF THE SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (IWEP SB RAS)

PUBLISHER
Polzunov Altai State Technical University, phone.(3852) 29-09-46, e-mail: polz_journal@mail.ru

ADDRESS: Prospect Lenina 46, office 119 GK, Barnaul, 656038, Altai region, Russia

WEBSITE: https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest

Signed for printing 20.08.2026

CC BY

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

С. О. Семенихин, А. А. Фабрицкая, Н. М. Даишева
Получение целлюлозно-гемицеллюлозного комплекса из депектинизированного свекловичного жома.....7

Е. М. Нагорных, О. Н. Мусина
Цифровой сервис технолога: проектирование новых рецептур плавленых сыров.....14

Л. Ч. Бурак
Перспективы использования щелочной электролизованной воды. Обзор предметного поля.....20

А. А. Славянский, В. А. Грибкова, Д. П. Митрошина, Н. В. Николаева
Повышение эффективности разделения Утфеля I кристаллизации в центробежном силовом поле.....32

Л. М. Есина, З. Е. Ушакова, О. Н. Кривонос, И. А. Белякова, Д. В. Штенина
Моделирование параметров гидролиза анадары с использованием методологии поверхности отклика.....39

О. Л. Ладнова, С. Я. Корячкина, Е. Г. Меркулова, А. И. Горлатых
Применение нетрадиционного сырья при разработке мучных смесей для функциональных хлебобулочных изделий.....46

К. Н. Нициевская, С. В. Станкевич, Е. В. Бородай
Сравнительный анализ методов определения крахмала в семенах семейства *Amaranthaceae*.....53

Н. С. Герасимова, М. А. Янова, Н. С. Козулина, А. В. Бобровский
Разработка рецептуры и оценка качества хлебобулочных изделий с использованием экструдированного зерна пшеницы.....58

Е. В. Хмелева, Д. Н. Королев, Р. Х. Кандроков, В. С. Сидоренко, И. А. Хмелев
Оценка технологической пригодности для хлебопекарного производства озимой пшеницы орловской селекции.....64

О. А. Корнева, Т. А. Джум, М. Ю. Тамова, А. С. Петросян
Разработка рецептуры безглютенового хлеба для лиц с целиакией.....70

К. И. Шайхиева, С. В. Борисова
Использование стержней початков кукурузы в рецептурах продуктов питания (обзор литературы).....77

Л. А. Маюрникова, А. А. Дриль, Т. В. Крапива
Инженерное творчество в процессе проектирования пищевых продуктов как технических объектов.....90

А. Л. Новокшанова
Растворимость ингредиентов с белками молочной сыворотки в зависимости от концентрации и температуры.....97

Т. В. Крюк, Е. Н. Труш, О. С. Попова, С. В. Пильгук, Н. А. Романенко
Свойства и технология получения пищевой пленки на основе крахмала с добавкой диоксида титана.....102

Д. П. Ефремов, И. М Жаркова
Теоретическое обоснование целесообразности включения растворимых пищевых волокон семян льна в состав мучных изделий.....111

В. Ф. Жукова, Т. В. Карман, К. А. Вакасова, В. В. Коляденко
Технологические аспекты консервирования вяленых слив и томатов в масле с добавлением фитокомпозиции.....123

Е. П. Каменская, В. В. Денисова
Исследование влияния продуктов переработки зерна кукурузы на качество хлебобулочных изделий.....132

М. А. Вайтанис
Исследование качества пищевых систем с добавлением муки из семян тыквы.....139

Е. А. Речкина, Ж. А. Кох, Г. А. Губаненко, Д. А. Черемных
Возможность использования соевого молока в технологии рыборастительных консервов.....143

Н. П. Шевченко, М. В. Каледина, В. П. Витковская, Д. А. Шемякина
Использование темпурной муки при производстве колбасных изделий.....149

Ю. В. Фролова, Е. М. Щетинина
Биологически активные компоненты Citrus Aurantium L. И его использование в пищевой промышленности.....156

А. Л. Блинова
Построение системы контроля за мороженными рыбными полуфабрикатами для производства специализированной пищевой рыбной продукции.....160

О. В. Чугунова, А. В. Вяткин, А. В. Арисов
Исследование антиоксидантного и витаминного комплекса ферментированных напитков на основе чайного гриба.....165

В. А. Марьин, А. Л. Верещагин, А. А. Иванов
Изменение эффективности работы шелушителя с абразивными дисками в процессе работы.....171

РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

С. А. Серопян, И. В. Сайков, А. В. Смирнов, Г. Р. Сайкова, Е. В. Петров

Влияние механической активации на реакционную способность системы вольфрам – политетрафторэтилен с добавками СВС-смесей (Ni+Al, Ti+2B) 177

Е. Г. Афонин

Полифосфатные электролиты цинкования 186

А. Л. Верещагин, Н. С. Алексеев

Термодинамический подход к выбору абразивного материала 195

А. М. Накып, Е. Н. Черезова, Ю. С. Карасева

Влияние пластификаторов с кислородсодержащими гетероциклами на стабильность свойств и сорбционную способность высоконаполненных набухающих резин 199

А. Р. Вафина, Л. А. Зенитова

Сравнительная оценка висмут- и оловоорганических катализаторов в синтезе биосовместимых кремнийорганических остеопластических композитов 206

Д. Ю. Небратенко, Е. О. Прокудин, А. В. Харпаев, А. А. Новиковский, В. А. Петров

Влияние естественного и лабораторного старения на микроструктурный состав и показатели битумных вяжущих 211

К. И. Шайхиева, З. Т. Санатуллова, А. А. Хубатхузин, Р. М. Вахидов

Влияние плазменной обработки на сорбционные характеристики альтернативного сорбционного материала по нефти и эффективность извлечения пленок углеводородов с водной поверхности 217

М. И. Губанова, Н. С. Баженов, И. А. Кирш, О. А. Банникова, Н. С. Шмакова, З. В. Широхова

Влияние воздействия ультразвука на свойства покрытий из поливинилового спирта 227

Б. С. Таха, А. С. Алексеев, М. К. Джубари, Н. В. Алексеева

Влияние активированного угля на минеральный состав обработанного водного раствора 235

А. А. Кухленко, М. И. Аршинский, Е. А. Новицкий, А. Ю. Кулаков, Ю. В. Жильцов, А. П. Горохов

Расчет оптимальной продолжительности процессов эмульгирования и гомогенизации в установке периодического действия 239

В. Э. Зинуров, М. А. Прец

Численное исследование влияния направляющих дугообразных элементов на эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора 248

Е. В. Пивоварова, К. К. Босов, И. А. Крупнова, Г. Т. Суханов, А. Г. Суханова, Ю. В. Филиппова

Синтез, спектральные характеристики и комплексный *IN SILICO* анализ нового метилтриазольного производного 256

Н. И. Лосева

Организация производства этил-трет-бутилового эфира на основе действующего производства метил-трет-бутилового эфира 264

В. Н. Хмелёв, А. Р. Барсуков, Р. Н. Голых

Численное обоснование необходимости реализации вырожденной кавитации для максимального увеличения поверхности поглощения газа 269

А. М. Шишкин, А. Г. Панов, Д. А. Гуртовой, Н. Г. Дегтярёва

Построение моделей структурообразования нелегированного доэвтектического чугуна методом термического анализа 273

А. Е. Буров, А. П. Пузырь

Исследование влияния масляной наноалмазной присадки на работу поршневого компрессора 281

Л. Н. Шафигуллин, Н. В. Романова, А. Т. Габдрахманов, Э. В. Панфилов, А. М. Сотников

Разработка филаментов с непрерывным волокном для FDM печати 285

Д. Т. Сафаров, В. И. Астащенко, Т. В. Соченко

Выбор листопроката из высокопрочных сталей уменьшающий вероятность возникновения трещин при холодной листовой штамповке сложнопрофильных деталей 291

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ 297

CONTENTS

SECTION 1. FOOD TECHNOLOGY

S. O. Semenikhin, A. A. Fabrichskaya, N. M. Daisheva
Obtaining a cellulose-hemicellulose complex from depectinized sugar beet pulp 7

E. M. Nagornykh, O. N. Musina
Digital technologist service: designing new recipes for melted cheeses 14

L. Ch. Burak
Prospects of using alkaline electrolyzed water. A review of subject field 20

A. A. Slavyanskiy, V. A. Gribkova, D. P. Mitroshina, Nikolaeva N. V.
Increasing the efficiency of massfeed separation and crystallization in a centrifugal force field 32

L. M. Esina, Z. E. Ushakova, O. N. Krivonos, I. A. Belyakova, D. V. Shtenina
Modeling hydrolysis parameters of half-crenated ark using Response Surface Methodology 39

O. L. Ladnova, S. Ya. Koryachkina, E. G. Merkulova, A. I. Gorlatykh
Use of non-traditional raw materials in development of flour mixtures for functional bakery products 46

K. N. Nitsievskaya, S. V. Stankevich, E. V. Boroday
Comparative analysis of methods for determination of starch in seeds of *Amaranthaceae* family 53

N. S. Gerasimova, M. A. Yanova, N. S. Kozulina, A. V. Bobrovsky
Formulation development and quality assessment of bakery products using extruded wheat grain 58

E. V. Khmeleva, D. N. Korolev, R. Kh. Kandrokov, V. S. Sidorenko, I. A. Khmelev
Assessment of technological suitability of winter wheat of oryol selection for bread production 64

O. A. Korneva, T. A. Dzhum, M. Yu. Tamova, A. S. Petrosyan
Development of gluten-free bread formulation for individuals with celiac disease 70

K. I. Shaikhieva, S. V. Borisova
Use of corn cobs in food recipes (literature review) 77

L. A. Mayurnikova, A. A. Dril, T. V. Krapiva
Engineering creativity in design process of food products as technical objects 90

A. L. Novokshanova
Solubility of ingredients with whey proteins depending on concentration and temperature 97

T. V. Kryuk, E. N. Trush, O. S. Popova, S. V. Pilhuk, N. A. Romanenko
Properties and technology of producing food film based on starch with the additive of titanium dioxide 102

D. P. Efremov, I. M. Zharkova
Theoretical justification of feasibility of include soluble flax seed fiber in composition of flour products 111

V. F. Zhukova, T. V. Karman, K. A. Vakasova, V. V. Koliadenko
Technological aspects of preserving dried plums and tomatoes in oil with addition of phytocomposition 123

E. P. Kamenskaya, V. V. Denisova
A study of influence of corn grain processing products on quality of bakery products 132

M. A. Vaytanis
Research on quality of food systems with pumpkin seed flour added 139

E. A. Rechkina, Z. A. Koch, G. A. Gubanenko, D. A. Cheremnykh
Possibility of using soy milk in technology canned fish 143

N. P. Shevchenko, M. V. Kaledina, V. P. Vitkovskaya, D. A. Shemyakina
Using tempura flour in production of sausages 149

Yu. V. Frolova, E. M. Schetinina
Biologically active components of Citrus aurantium L. and its use in food industry 156

A. L. Blinova
Construction of control system for frozen fish semi-finished products for production of specialized fish food products 160

O. V. Chugunova, A. V. Vyatkin, A. V. Arisov
Research on antioxidant and vitamin complex of fermented beverages on based on kombucha 165

V. A. Marin, A. L. Vereshchagin, A. A. Ivanov
Changing efficiency of peeling machine with abrasive discs during operation 171

SECTION 2. CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

S. A. Seropyan, I. V. Saikov, A. V. Smirnov, G. R. Saikova, E. V. Petrov

Effect of mechanical activation on the reactivity of the tungsten – polytetrafluoroethylene system with additives of SHS mixtures (Ni+Al, Ti+2B) 177

E. G. Afonin

Polyphosphate electrolytes for zinc plating 186

A. L. Vereshchagin, N. S. Alekseev

Thermodynamic approach to choice of abrasive material 195

A. M. Nakyp, E. N. Cherezova, Yu. S. Karaseva

Influence of plasticizers with oxygen-containing heterocycles on stability of properties and sorption capacity of highly filled swelling rubbers 199

A. R. Vafina, L. A. Zenitova

Comparative evaluation of bismuth- and tin-based organometallic catalysts in synthesis of biocompatible silicone-based osteoplastic composites 206

D. Yu. Nebratenko, E. O. Prokudin, A. V. Kharpaev, A. A. Novikovsky, V. A. Petrov

Effect of natural and laboratory aging on microstructural composition and performance of bitumen binders 211

K. I. Shaikhieva, Z. T. Sanatullova, A. A. Khubatkhuzin, R. M. Vakhidov

Effect of plasma treatment on sorption characteristics of an alternative sorption material for oil and effectiveness of removing hydrocarbon films from water surfaces 217

M. I. Gubanova, N. S. Bazhenov, I. A. Kirsh, O. A. Bannikova, N. S. Shmakova, Z. V. Shirokhova

Effect of ultrasound on properties of polyvinyl alcohol coatings.....227

B. S. Taha, A. S. Alekseev, M. Q. Gubari, N. V. Alekseeva

Influence of activated carbon on mineral composition of treated aqueous solution....235

A. A. Kukhlenko, M. I. Arshinskiy, E. A. Novitskiy, A. Yu. Kulakov, Yu. V. Zhiltsov, A. P. Gorokhov

Calculation of optimal duration of emulsification and homogenization processes in a batch plant..... 239

V. E. Zinurov, M. A. Prets

Numerical study of influence of arc-shaped guide elements on efficiency of a multivortex dust collector-classificator 248

E. V. Pivovarova, K. K. Bosov, I. A. Krupnova, G. T. Sukhanov, A. G. Sukhanova, Yu. V. Filippova

Synthesis, spectral characteristics, and comprehensive in silico analysis of a new methyltriazole derivative 256

N. I. Loseva

Organization of production of ethyl -tret-butyl ether based on current production of methyl tret-butyl ether..... 264

V. N. Khmelev, A. R. Barsukov, R. N. Golykh

Numerical justification of need to implement degenerate cavitation to maximumly increase gas absorption surface..... 269

A. M. Shishkin, A. G. Panov, D. A. Gurtovoy, N. G. Degtyareva

Building models of structure formation of unalloyed hypoeutectic cast iron using thermal analysis..... 273

A. E. Burov, A. P. Puzyr

Study of influence of nanodiamond oil additive on operation of a piston compressor..... 281

L. N. Shafigullin, N. V. Romanova, A. T. Gabdrakhmanov, E. V. Panfilov, A. M. Sotnikov

Development of filaments with continuous fiber method for fdm printing..... 285

D. T. Safarov, V. I. Astashchenko, T. V. Sochenko

Choice of sheet metal from high-strength steels, which reduces the likelihood of cracks during cold sheet stamping of composite parts 291

AUTHOR'S INDEX..... 297

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 7–13.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 7–13.

РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы
УДК 636.084.42:661.728.7:630*813.14
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.001 EDN: ZTGFZK

ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-ГЕМИЦЕЛЛЮЛОЗНОГО КОМПЛЕКСА ИЗ ДЕПЕКТИНИЗИРОВАННОГО СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА

Семен Олегович Семенихин [1], Алла Андреевна Фабрицкая [2], Наиля Мидхатовна Даишева [3]

[1, 2, 3] Краснодарский научно-исследовательский институт хранения и переработки сельскохозяйственной продукции – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия», Краснодар, Россия
[1] semenikhin_s_o@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-2038-0122
[2] ms.fabritskaya@list.ru, http://orcid.org/0000-0001-9310-4543
[3] daisheva_n_m@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-5813-156X

Аннотация. *Наличие в составе свекловичного жома (побочного продукта переработки сахарной свеклы) пектина, гемицеллюлоз и целлюлозы обусловливает перспективность использования свекловичного жома в качестве сырья для выделения пищевых ингредиентов. Однако современные технологии переработки свекловичного жома нацелены на выделение пектина и не предусматривают дальнейшую переработку депектинизированного жома. Цель исследований – обработка депектинизированного свекловичного жома с получением целлюлозно-гемицеллюлозного комплекса, из которого в дальнейшем планируется извлечь гемицеллюлозы и целлюлозу. Для достижения поставленной цели решали задачи анализа современных методов гидролиза протопектина и лигнина из растительного сырья, гидролиза остаточного содержания пектиновых веществ с применением соляной кислоты и пектиназы, а также гидролиза остаточного содержания лигнина с применением перекиси водорода. Установлено, что процесс гидролиза пектиновых веществ под воздействием соляной кислоты и пектиназы протекает по-разному: соляная кислота в большей степени разлагает пектин, а пектиназа – протопектин. Тем не менее, более эффективным реагентом является соляная кислота, так как обеспечивает более высокую степень гидролиза пектиновых веществ (суммарно). Установлена высокая эффективность применения перекиси водорода для гидролиза лигнина – достигается полное разложение лигнина. Полученные результаты могут служить основой для разработки технологий комплексной переработки свекловичного жома, позволяющих эффективно извлекать пищевые ингредиенты с высоким выходом и качественными характеристиками.*

Ключевые слова: *свекловичный жом, пектин, протопектин, лигнин, целлюлоза, гемицеллюлозы, соляная кислота, пектиназа, перекись водорода.*

Благодарности. *Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда в рамках проекта №24-26-20065, https://rscf.ru/project/24-26-20065/.*

Для цитирования: Семенихин С. О., Фабрицкая А. А., Даишева Н. М. Получение целлюлозно-гемицеллюлозного комплекса из депектинизированного свекловичного жома // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 7–13. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.001. EDN: https://elibrary.ru/ZTGFZK.

Original article

OBTAINING CELLULOSE-HEMICELLULOSE COMPLEX FROM DEPECTINIZED BEET PULP

Semen O. Semenikhin [1], Alla A. Fabritskaya [2], Nailya M. Daisheva [3]

[1, 2, 3] Krasnodar Research Institute for Storage and Processing of Agricultural Products - branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution «North Caucasian Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, and Winemaking», Krasnodar, Russia
[1] semenikhin_s_o@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-2038-0122
[2] ms.fabritskaya@list.ru, http://orcid.org/0000-0001-9310-4543
[3] daisheva_n_m@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-5813-156X

Abstract. *The presence of pectin, hemicelluloses, and cellulose in beet pulp (a byproduct of sugar beet processing) makes it a promising raw material for extracting food ingredients. However, current beet pulp processing tech-*

© Семенихин С. О., Фабрицкая А. А., Даишева Н. М., 2026

nologies, focused on pectin extraction, do not provide for further processing of depectinized beet pulp. The aim of this research is to process depectinized beet pulp to produce a cellulose-hemicellulose complex, from which hemicelluloses and cellulose are subsequently extracted. To achieve this goal, we hydrolyzed the residual pectin content using mineral acids and enzymes, as well as hydrolyzed the residual lignin content using hydrogen peroxide. It has been established that the hydrolysis of pectin substances under the influence of hydrochloric acid and enzymes proceeds differently: hydrochloric acid degrades pectin to a greater extent, while enzymes degrade protopectin. However, hydrochloric acid is a more effective reagent, as it ensures a higher degree of pectin substances hydrolysis (in total). Hydrogen peroxide has been shown to be highly effective in hydrolyzing lignin, achieving complete lignin degradation. These results can serve as a basis for developing technologies for the integrated processing of sugar beet pulp, enabling the efficient extraction of food ingredients with high yields and high-quality characteristics.

Keywords: *beet pulp, pectin, protopectin, lignin, cellulose, hemicelluloses, hydrochloric acid, pectinase, hydrogen peroxide.*

Acknowledgments. *The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation within the framework of project No. 24-26-20065, https://rscf.ru/project/24-26-20065/.*

For citation: Semenikhin, S. O., Fabrichskaya, A. A. & Daisheva, N. M. (2026). Obtaining a cellulose-hemicellulose complex from depectinized sugar beet pulp. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 7-13. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.001. EDN: https: //elibrary.ru/ZTGFZK.

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что свекловичный жом является перспективным сырьем для получения низкоэтерифицированного пектина. Однако в современных технологиях не предусматривается дальнейшая переработка жома, получаемого в результате извлечения пектина. Следует отметить, что в таком жоме содержится значительное количество целлюлозы и гемицеллюлоз, которые так же, как и пектин, являются ценными пищевыми ингредиентами. Это обусловливает перспективность использования свекловичного жома в качестве сырья для выделения большего ассортимента пищевых ингредиентов.

Технология трансформации свекловичного жома в результате ее реализации должна обеспечивать максимальную сохранность всех пищевых ингредиентов при их максимальном выходе и высоком качестве.

Наиболее изученным компонентом, формирующим состав свекловичного жома, является пектин [1–3]. Значительный интерес к пектину, по сравнению с другими пищевыми волокнами, формирующими химический состав свекловичного жома, обусловлен высокими технологическими и функциональными свойствами пектина [4–6]. В настоящее время основное внимание исследователей сосредоточено преимущественно на технологиях извлечения пектина [7–10]. Наличие у пектина студнеобразующей и комлексообразующей способностей также обусловило распространенность научных работ по его применению в продуктах питания [11–13].

К сожалению, современные исследования отечественных ученых в области извлечения гемицеллюлоз из растительного сырья практически отсутствуют. Следует отметить, что в работе исследователей Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва описан способ получения пектина и целлюлозы – вначале из свекловичного жома извлекают пектин кислотной экстракцией, а затем удаляют балластные вещества щелочной экстракцией [14]. Однако при данном способе гемицеллюлозы извлекаются совместно с другими балластными веществами, а не отдельно.

В работе германо-финских исследователей рассмотрено извлечение гемицеллюлоз из твердой (опилок) и мягкой древесины, а также бамбука с применением в качестве экстрагирующего реагента раствора гидрокарбоната натрия и последующим отделением гемицеллюлоз в солевой форме микрофильтрацией, в результате чего достигается степень извлечения гемицеллюлоз 67 % для бамбука, 53 % для твердой древесины и 48 % для мягкой древесины [15].

В работе китайских исследователей отмечено, что применение раствора гидроксида калия с последующим осаждением этиловым спиртом позволяет извлечь 76,3 % гемицеллюлоз из стеблей сладкого сорго [16].

Следует также отметить, что как в отечественных, так и в иностранных научных работах по извлечению целлюлозы и гемицеллюлоз в качестве сырья в основном используют отходы лесотехнической промышленности, так как их химический состав сформирован целлюлозой, гемицеллюлозами и лигнином, а также они легкодоступны в то время, как прочие растительные ресурсы практически не рассматриваются [17, 18].

Особенностью свекловичного жома как сырья для извлечения целлюлозы и гемицеллюлоз является наличие пектиновых веществ, что несколько усложняет технологию, так как требует учета реакционных свойств большего количества химических веществ. Как показано в работе китайских исследователей, извлечение пектина щелочными растворами так же эффективно, как и классическое применение для этого процесса растворов кислот [19].

Таким образом, применение щелочных растворов для экстракции гемицеллюлоз без предварительного гидролиза пектиновых веществ свекловичного жома приведет к извлечению пектина наряду с гемицеллюлозами, что ухудшит их качество.

Учитывая это, разработка технологии трансформации свекловичного жома, позволяющая извлечь формирующие его химический состав пищевые ингредиенты при их максимальном выходе и высоком качестве, имеет научную новизну и практическую значимость.

На наш взгляд, рациональная структурная схема технологии получения целлюлозы и гемицеллюлоз из свекловичного жома должна включать стадии, представленные на рисунке 1.

Проведенными в нашем институте исследованиями установлены оптимальные режимы извлечения пектина из свекловичного жома [20–22]. Учитывая это, на данном этапе исследований необходимо получить целлюлозно-гемицеллюлозный комплекс с минимальным остаточным содержанием нерастворимых в воде компонентов.

Цель работы – обработка депектинизированного свекловичного жома с получением целлюлозно-гемицеллюлозного комплекса, из которого в дальнейшем планируется извлечь гемицеллюлозы и целлюлозу.

Задачи: провести анализ современных методов гидролиза протопектина и лигнина из растительного сырья; выявить закономерности гидролиза остаточного содержания пектиновых веществ с применением соляной кислоты и пектиназы, а также гидролиза остаточного содержания лигнина с применением перекиси водорода.

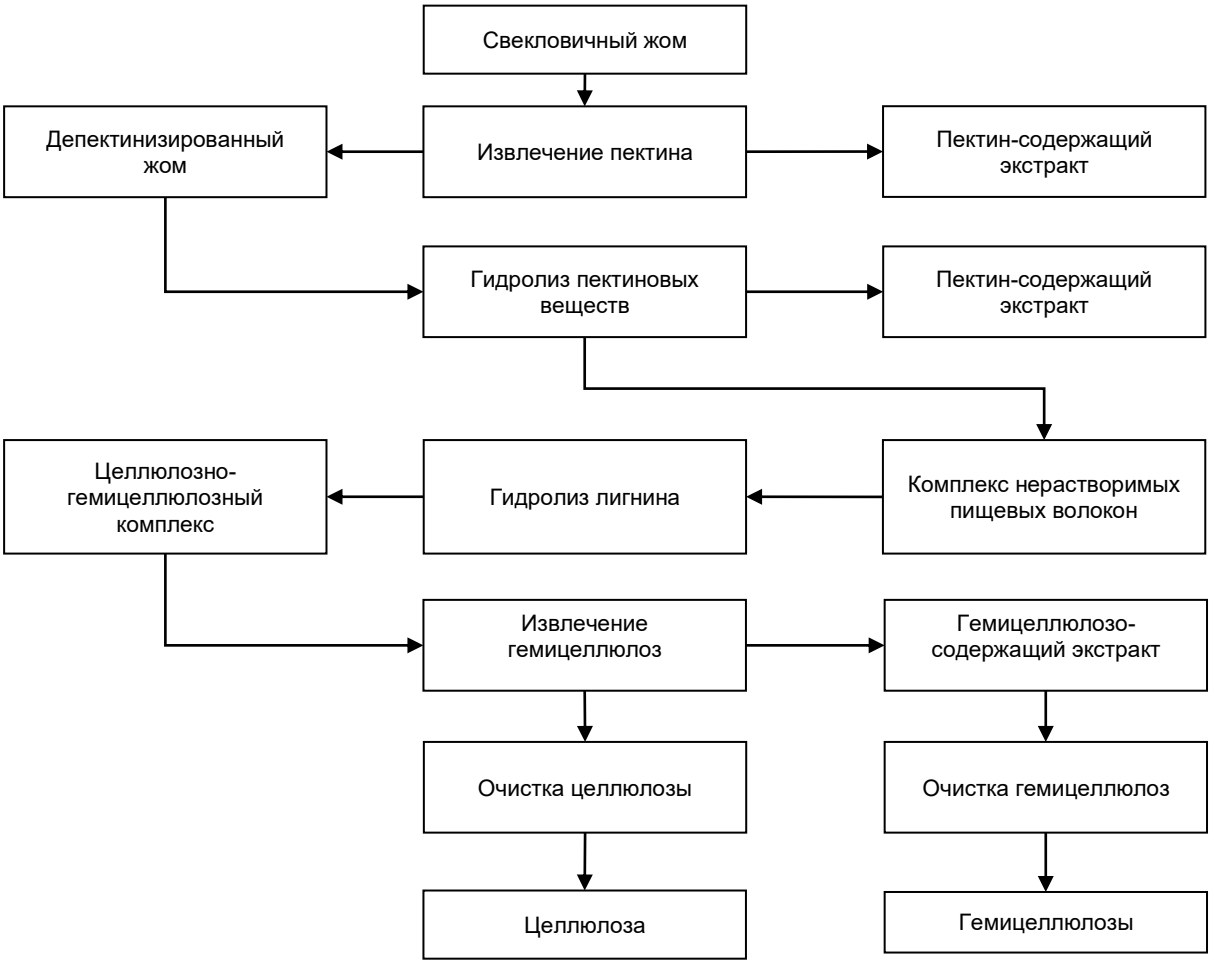


Рисунок 1 – Структурная схема технологии получения целлюлозы и гемицеллюлоз из свекловичного жома

Figure 1 – Structural diagram of the technology for obtaining cellulose and hemicelluloses from sugar beet pulp

Для получения целлюлозно-гемицеллюлозного комплекса из депектинизированного свекловичного жома требуется гидролизовать остаточное содержание балластных веществ – протопектина и лигнина. При этом гидролиз остаточного содержания протопектина и лигнина должен осуществляться без сопутствующего гидролиза целлюлозы и гемицеллюлоз, что будет негативно сказываться на эффективности технологии.

Общеизвестно, что наибольшей гидролизующей способностью по отношению к пектиновым веществам обладают минеральные кислоты [23]. Однако в настоящее время особый научный интерес представляет использование ферментов, так как они имеют точечную направленность и не воздействуют на сопутствующие вещества [24, 25]. Учитывая это, проводили сравнительную оценку эффективности гидролиза пектина с применением минеральной кислоты и пектолитических ферментов.

В качестве минеральной кислоты была выбрана соляная кислота, так как в ходе гидролиза она не образует токсичных побочных соединений, а также является доступным реагентом. В качестве фермента была выбрана коммерческая пектиназа, свободно продаваемая в розницу, а не лабораторно-вырабатываемая в ограниченном количестве, чтобы приблизить лабораторные исследования к реальным условиям.

Эффективными способами гидролиза лигнина являются применение озона, растворов органических кислот или растворов перекиси водорода [26–28]. Для делигнификации брали перекись водорода, так как в ходе гидролиза она не образует токсичных побочных соединений, а также является доступным реагентом. Кроме этого, по литературным данным перекись водорода практически не гидролизует целлюлозу и гемицеллюлозы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований являлись прессованный свекловичный жом, а также получаемые из него в лабораторных условиях депектинизированный свекловичный жом и целлюлозно-гемицеллюлозный комплекс.

На первом этапе осуществляли извлечение пектина из прессованного свекловичного жома, согласно установленным ранее режимам [22]. Для этого прессованный свекловичный жом, полученный на Павловском сахарном заводе, измельчали до размера частиц 2 мм. После этого проводили гидролиз-экстракцию пектина при значении pH 3,0, достигаемого путем подкисления дистиллированной воды соляным буфером – водным раствором с содержанием соляной кислоты 2,5 % и хлорида натрия 2,5 %, температуре 55 ºС, постоянном перемешивании с частотой 2 $с^{-1}$ в течение 3,0 часов. После этого водную фазу отделяли фильтрованием,

а комплекс нерастворимых пищевых волокон отбирали для исследований.

На втором этапе исследовали эффективность гидролизапектиновых веществ депектинизированного свекловичного жома. Для этого депектинизированный свекловичный жом делили на 4 образца. После этого готовили 4 образца экстрагента – с раствором соляной кислоты (Образец 1) и растворами пектиназы при различных дозировках (Образцы 2–4).

Экстрагент 1 готовили подкислением дистиллированной воды до значения pH 3,0 5,0 %-ным соляным буфером, приготовленным из соляной кислоты и хлорида натрия в равной пропорции. Экстрагенты 2–4 готовили путем подкисления дистиллированной воды до значения pH 4,0 20%-ным цитратным буфером, приготовленным из лимонной кислоты и цитрата натрия в равной пропорции, и последующим внесением пектиназы при дозировках: 100, 200 и 300 ед./г СВ свекловичного жома соответственно. Значение pH экстрагента 4,0 обусловлено тем, что при данном значении достигается максимальная активность выбранной для исследований пектиназы (согласно ее паспорту).

Гидролиз-экстрагирование пектиновых веществ проводили при гидромодуле 1 : 4, температуре 55 ºС и постоянном перемешивании 120 об/мин в течение 3,0 часов.

Степень гидролиза пектиновых веществ рассчитывали по формуле:

$$Ст_{гидр.} = \frac{С_{исх.} - С_{образца}}{С_{исх.}} \times 100, \quad (1)$$

где $С_{исх.}$ – исходное содержание пектиновых веществ, %;

$С_{образца}$ – содержание пектиновых веществ в исследуемом образце, %.

На третьем этапе исследовали эффективность удаления лигнина из депектинизированного жома.

Предварительно проведенными исследованиями установлены оптимальные режимы, обеспечивающие гидродинамический режим в системе «жом : раствор перекиси водорода», которые были приняты в качестве постоянных факторов: температура процесса – 25 ºС; соотношение жом : раствор перекиси водорода – 1 : 4; частота перемешивания, $с^{-1}$– 30.

В качестве переменных факторов были выбраны: концентрация раствора перекиси водорода, %, X_1 в диапазоне от 10 до 20 с шагом 5, а также время процесса, минут, X_2 в диапазоне от 20 до 60 с шагом 20.

В качестве функций отклика приняты: $У_1$ – содержание лигнина, %, $У_2$ – содержание целлюлозы, %, и $У_3$ – содержание гемицеллюлоз, %.

Исследование биохимического состава свекловичного прессованного жома и продуктов его биотехнологической и физико-химической трансформации осуществляли согласно общепринятым методам: массовую долю влаги – по ГОСТ 28561-90; массовую долю золы – по ГОСТ 25555.4-91; массовую долю белка – по ГОСТ 26889-86; массовую долю пектиновых веществ – по ГОСТ 29059-91; массовую долю целлюлозы и гемицеллюлоз – согласно Ермакову А.И. и др. (Методы биохимического исследования растений, 1987); массовую долю лигнина по ГОСТ 26177-84; массовую долю пищевых волокон как сумму показателей массовой доли пектина, протопектина, лигнина, гемицеллюлоз и целлюлозы.

Исследования проводили в двух повторениях, полученные данные усредняли.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 представлена степень гидролиза пектиновых веществ с применением различных реагентов.

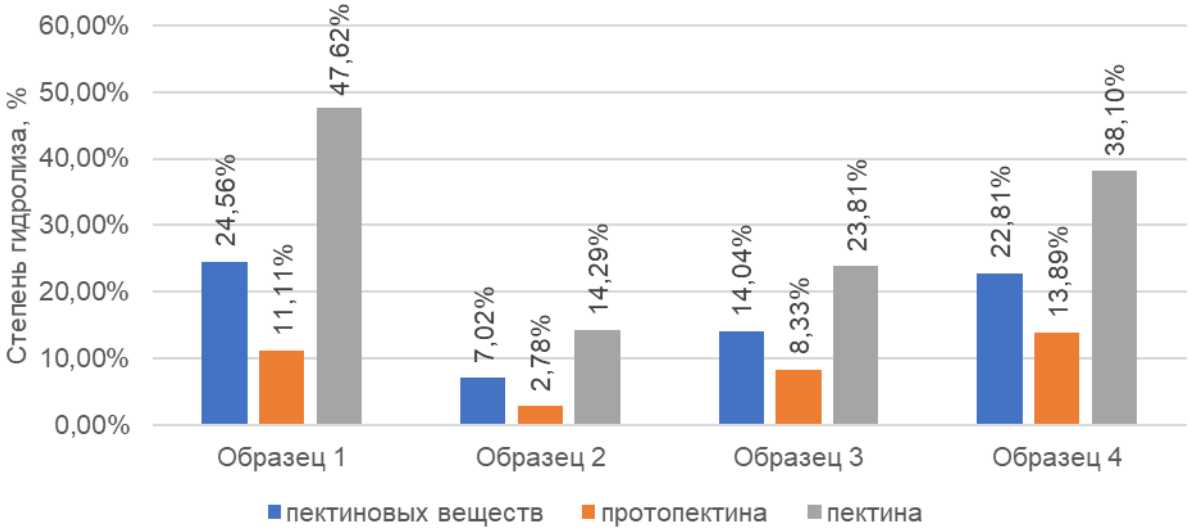


Рисунок 2 – Степень гидролиза пектиновых веществ с применением различных реагентов

Figure 2 – The degree of hydrolysis of pectin substances using various reagents

Из представленных на рисунке 2 данных следует, что процесс гидролиза пектиновых веществ под воздействием соляной кислоты и пектиназы протекает по-разному: соляная кислота в большей степени разлагает пектин, а пектиназа – протопектин. На наш взгляд, это обусловлено тем, что отобранная для исследований пектиназа в большей степени разлагает рамногалактуронановые участки протопектина, а соляная кислота – гомогалактуронановые участки. Тем не менее, в конечном итоге наибольшая степень гидролиза пектиновых веществ обеспечивается при применении соляной кислоты – 24,56 %, в то время как под воздействием пектиназы при дозировке 300 ед./г СВ разлагается 22,81 % пектиновых веществ. Учитывая это, для гидролиза остаточно содержания протопектина следует применять соляную кислоту.

В табл. 1 приведены данные по влиянию режимов обработки депектинизированного свекловичного жома перекисью водорода на содержание лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз.

Полученные данные подтверждают данные из литературных источников, что перекись водорода практически не гидролизует целлюлозу и гемицеллюлозы, а эффективно гидролизует лигнин.

Учитывая это, дальнейшую математическую обработку данных проводили только по влиянию режимов обработки депектинизированного свекловичного жома перекисью водорода на содержание лигнина.

На рисунке 3 представлена графическая интерпретация данных по влиянию режимов обработки депектинизированного свекловичного жома перекисью водорода на содержание лигнина.

Таблица 1 – Влияние режимов обработки депектинизированного свекловичного жома перекисью водорода на содержание лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз

Table 1 – Effect of the modes of processing depectinized sugar beet pulp with hydrogen peroxide on the content of lignin, cellulose and hemicelluloses

Концентрация перекиси водорода, % (X_1)	Время процесса, минут (X_2)	Содержание лигнина, % ($У_1$)	Содержание целлюлозы, % ($У_2$)	Содержание гемицеллюлоз, % ($У_3$)
10	20	0,1300	3,80	2,40
10	40	0,0580	3,80	2,39
10	60	0,0240	3,79	2,38
15	20	0,1020	3,78	2,39
15	40	0,0170	3,79	2,39
15	60	0,0100	3,78	2,39
20	20	0,0140	3,79	2,38
20	40	0,0100	3,78	2,37
20	60	0,0090	3,77	2,37

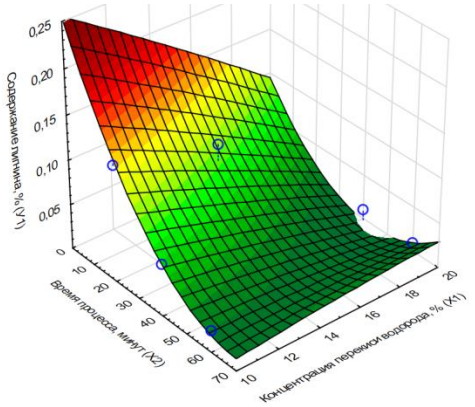


Рисунок 3 – Влияние режимов обработки депектинизированного свекловичного жома перекисью водорода на содержание лигнина

Figure 3 – Effect of the modes of processing depectinized sugar beet pulp with hydrogen peroxide on the content of lignin

Математическая обработка экспериментальных данных позволила вывести уравнение, описывающие влияние режимов обработки депектинизированного свекловичного жома перекисью водорода на содержание лигнина (2):

$$У_1=0,3983-0,0135\cdot X_1-0,0094\cdot X_2-8,67\cdot 10^{-5}\cdot X_1^2+0,0003\cdot X_1\cdot X_2+4,95\cdot 10^{-5}\cdot X_2^2 \quad (2)$$

Для подтверждения адекватности полученного уравнения был проведен анализ его качества.

Показатель коэффициента детерминации R^2 составил 0,945, что свидетельствует о высоком соответствии модели экспериментальным данным. Скорректированный коэффициент детерминации $R_{скорр.}^2$ составил 0,857, что также подтверждает адекватность модели.

В таблице 2 приведена статистическая значимость коэффициентов уравнения 1.

Таблица 2 – Статистическая значимость коэффициентов уравнения 1

Table 2 – Statistical significance of the coefficients of the equation 1

Переменная	Коэффициент	t-статистика	p-значение	Интерпретация
Константа	0,3983	3,18	0,050	Погранично значима
X_1	−0,0135	−0,88	0,443	Не значима
X_2	−0,0094	−3,35	0,044	Значима
X_1^2	$-8,67\cdot 10^{-5}$	−0,18	0,872	Не значима
$X_1\cdot X_2$	0,0003	2,89	0,063	Погранично значима
X_2^2	$4,95\cdot 10^{-5}$	1,61	0,206	Не значима

Из представленных в таблице 2 данных следует, что наиболее существенное влияние на выходную переменную оказывают факторы константы, X_2 и $X_1\cdot X_2$. Вклад факторов X_1,X_1^2и X_2^2 статистически незначим, однако при упрощении модели за счёт их исключения значительно снижались показатели коэффициента детерминации и скорректированного коэффициента детерминации, поэтому в конечном уравнении факторы оставили.

По результатам расчёта F-критерия Фишера, составившего F = 10,22 при p = 0,042, установлено, что совокупное влияние факторов статистически значимо, что позволяет признать полученное математическое уравнение регрессии адекватным в целом.

В результате решения задачи оптимизации уравнения 1, заключающемся в поиске локального экстремума функции, установлено, что полный гидролиз лигнина обеспечивается при концентрации

раствора перекиси водорода 19,5 % и времени процесса 45 минут. При этом перекись водорода практически не оказывает влияние на содержание целлюлозы и гемицеллюлоз в депектинизированном свекловичном жоме.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований выявлены закономерности удаления пектиновых веществ и лигнина из депектинизированного свекловичного жома путем его обработки с применением соляной кислоты, пектиназы и перекиси водорода.

Установлено, что наибольшая степень разложения пектиновых веществ депектинизированного свекловичного жома обеспечивается при применении соляной кислоты – 24,56 %.

Установлено, что полный гидролиз лигнина в депектинизированном свекловичном жоме обеспечивается при концентрации раствора перекиси водорода 19,5 % и времени процесса 45 минут.

Полученные результаты создают предпосылки к разработке технологии трансформации свекловичного жома, позволяющей извлечь формирующие его химический состав пищевых ингредиентов при их максимальном выходе и высоком качестве, имеет научную новизну и практическую значимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Донченко Л.В. Фирсов Г.Г. Пектин: основные свойства, производство и применение. М. : ДеЛи принт, 2005. 276 с.
2. Ильина И.А., Причко Т.Г., Дрофичева Н.В. [и др.]. Технологии производства продуктов здорового питания из растительного сырья. Краснодар : ООО «Просвещение-Юг», 2018. 315 с.
3. Донченко Л.В. Анализ современного рынка пектина и пектинопродуктов. Сахар. 2019. № 8. С. 50–53.
4. Moslemi M. Reviewing the recent advances in application of pectin for technical and health promotion purposes : From laboratory to market. Carbohydrate Polymers, 2020; 254: 117324.
5. Петрова Ж.О. Связывание ионов металлов функциональными пребиотическими порошками. Пищевая промышленность : Наука и технологии. 2017. № 1. С. 17–21.
6. Аверьянова Е.В., Митрофанов Р.Ю. Пектин. Получение и свойства. Бийск, 2006. 59 с.
7. Гранкина Н.А., Черемисов Д.Д., Тыщенко Ю.В. [и др.]. Особенности получения свекловичного пектина. Colloquium-Journal. 2021. № 15–1(102). С. 75–77.
8. Алексеев Г.В., Пальчиков А.Н., Нестеренко И.Г. Совершенствование процесса выделения пектина путем гидратации сырья в ультразвуковом поле. Ползуновский вестник. 2019. № 3. С. 52–55.
9. Abou-Elseoud W.S., Hassan E.A., Hassan M.L. Extraction of pectin from sugar beet pulp by enzymatic and ultrasound-assisted treatments. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2021; 2: 100042.
10. Зелепукин Ю.И., Зелепукин С.Ю., Федорук В.А. [и др.]. К вопросу производства пектина из свекловичного жома. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 2 (68). С. 238–242.
11. Донченко Л.В., Темников А.В., Ковалева С.Е. Характеристика свекловичного пектина как студнеобразователя. Сахар. 2022. № 9. С. 44–48.
12. Кондратенко В.В., Федотова О.Б., Агаркова Е.Ю. Применение пектинов из различных биоресурсов для модификации структурно-механических свойств кисломолочных продуктов. Молочная промышленность. 2024. № 5. С. 15–21.
13. Щетинина Е.М. Применение пектина для производства мягких сыров на основе козьего молока. Ползуновский вестник. 2019. № 2. С. 51–54.
14. Пат. 2580884 РФ. Способ получения пектина и целлюлозы из свекловичного жома / Ревин В.В., Пестов Н.А. БИМП 10.04.2016.
15. Xu R., Doskaliuk N., Pang B. [et al.]. Hemicellulose from mild extraction of biomass: Revealing structural insights and advancing potential value. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2025; 10: 100843.
16. Sun S.-L., Wen J.-L., Ma M.-G. Successive alkali extraction and structural characterization of hemicelluloses from sweet sorghum stem. Carbohydrate Polymers, 2013; 92: 2224–2231.
17. Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В. [и др.]. Древесина как химическое сырье. История и современность. V. Древесная целлюлоза как природное полимерное сырье. Часть I. Лесной вестник. 2023. Т. 27, № 3. С. 128–142.
18. Хакимова Ф.Х., Носкова О.А., Хакимов Р.Р. [и др.]. Комплексная утилизация лигносодержащих древесных отходов. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 3 (399). С. 188–202.
19. Zhang C., Wang Y. , Lv Y. [et al.]. Influence of pectin domains and protein on the viscosity and gelation properties of alkali-extracted pectin from green tea residue. Food Chemistry, 2024; 430: 137039.
20. Семенихин С.О., Фабрицкая А.А., Городецкий В.О. [и др.]. Влияние степени измельчения свекловичного прессованного жома, полученного при различных способах подготовки экстрагента, на эффективность извлечения пектина. Известия ВУЗов. Пищевая технология. 2022. № 6. С. 80–84.
21. Семенихин С.О., Фабрицкая А.А., Городецкий В.О. [и др.]. Исследование эффективности извлечения пектина из свекловичного прессованного жома с применением целлюлазы и ксиланазы. Известия ВУЗов. Пищевая технология. 2023. №1. С. 43–47.
22. Семенихин С.О., Фабрицкая А.А., Городецкий В.О. [и др.]. Сравнительная оценка эффективности химической и ферментативной гидролиз-экстракции пектина из прессованного свекловичного жома. Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2025. № 7. С. 299–312.
23. Донченко Л.В., Фирсов Г.Г., Красноселова Е.А. Особенности процесса гидролиза протопектина из растительной ткани. Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2006. № 1. С. 288–297.
24. Li J., Zhou P., Liu H. Synergism of cellulase, xylanase, and pectinase on hydrolyzing sugarcane bagasse resulting from different pretreatment technologies. Bioresource Technology, 2014; 155: 258–265.
25. Ninga K.A., Desobgo Z.S.C., De S. [et al.]. Pectinase hydrolysis of guava pulp: effect on the physicochemical characteristics of its juice. Heliyon, 2021; Vol. 7, Iss.10: e08141.
26. Бенько Е.М., Чухчин Д.Г., Мамлеева Н.А. [и др.]. Озонолитическая делигнификация соломы пшеницы. Журнал физической химии. 2020. Т. 94, № 8. С. 1153–1160.
27. Пат. 2321696 РФ. Способ получения целлюлозы / Вураско А.В., Дрикер Б.Н., Мозырева Е.А., Галимова А.Р. БИМП 10.04.2008.
28. Liu K.-X., Li H.-Q., Zhang J. [et al.]. The effect of non-structural components and lignin on hemicellulose extraction. Bioresource Technology, 2016; 214: 755–760.

Информация об авторах

С. О. Семенихин – канд. техн. наук, заведующий отделом технологии сахара и сахаристых продуктов КНИИХП – филиала ФГБНУ СКФНЦСВВ.

А. А. Фабрицкая – младший научный сотрудник отдела технологии сахара и сахаристых продуктов КНИИХП – филиала ФГБНУ СКФНЦСВВ.

Н. М. Даишева – канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела технологии сахара и

сахаристых продуктов КНИИХП – филиала ФГБНУ СКФНЦСВВ.

REFERENCES

1. Donchenko, L.V., Firsov, G.G. Pectin: Basic Properties, Production and Applications. Moscow, 2005. 276 p. (In Russ.).
2. Ilyina, I.A., Prichko, T.G., Droficheva, N.V. [et al.]. Technologies for the production of healthy food products from plant materials. Krasnodar : OOO Prosveshchenie-Yug, 2018. 315 p.
3. Donchenko, L.V. Analysis of the modern market of pectin and pectin products. Sugar, 2019; 8: 50-53. (In Russ.).
4. Moslemi, M. Reviewing the recent advances in application of pectin for technical and health promotion purposes: From laboratory to market. Carbohydrate Polymers, 2020; 254: 117324.
5. Petrova, Zh.O. Binding of heavy metal ions by means of functional prebiotic powders. Food Industry: Science and Technology, 2017; 1: 17-21. (In Russ.).
6. Averjanova, E.V., Mitrofanov, R.Ju. Pectin. Production and properties. Bijsk, 2006. 59 p. (In Russ.).
7. Grankina, N.A., Cheremisov, D.D., Tyshchenko, Yu.V. The features of beet pectin producing. Colloquium-Journal, 2021; 15-1(102): 75-77. (In Russ.).
8. Alekseyev, G.V., Palchikov, A.N., Nesterenko, I.G. Sovershenstvovaniye protsessa vydeleniya pektina putem gidratatsii syrya v ultrazvukovom pole. Polzunovskiy vestnik. 2019; 3: 52-55. (In Russ.).
9. Abou-Elseoud, W.S., Hassan, E.A., Hassan, M.L. Extraction of pectin from sugar beet pulp by enzymatic and ultrasound-assisted treatments. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2021; 2: 100042.
10. Zelepukin, Yu.I., Zelepukin, S.Yu., Fedoryuk, V.A. [et al.]. To the question of production of pectin from beet pulp. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies, 2016; (2): 238-242. (In Russ.).
11. Donchenko, L.V., Temnikov, A.V., Kovaleva, S.E. Characteristics of beet pectin as a gelling agent. Sugar, 2022; 9: 44-48. (In Russ.).
12. Kondratenko, V.V., Fedotova, O.B., Agarkova, E.Yu. Modifying structural and mechanical properties of fermented dairy products with various biological pectins. Dairy industry, 2024; 5: 15-21. (In Russ.).
13. Shchetinina YE.M. Primeneniye pektina dlya proizvodstva myagkikh syrov na osnove kozyego moloka. Polzunovskiy vestnik. 2019; 2: 51-54. (In Russ.).
14. Revin V.V., Pestov N.A. Method for obtaining pectin and cellulose from beet pulp. Pat. 2580884 RU. Inventions. Utility models. 10.04.2016. (In Russ.).
15. Xu, R., Doskaliuk, N., Pang, B. [et al.]. Hemicellulose from mild extraction of biomass: Revealing structural insights and advancing potential value. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2025; 10: 100843.
16. Sun, S.-L., Wen, J.-L., Ma, M.-G. Successive alkali extraction and structural characterization of hemicelluloses from sweet sorghum stem. Carbohydrate Polymers, 2013; 92: 2224-2231.
17. Kononov, G.N., Verevkin, A.N., Serdyukova, Yu.V. [et al.]. Wood as a chemical raw material. History and modernity. V. Wood as chemical raw material. History and modernity V. Wood pulp as natural polymer raw material. Part I. Forestry Bulletin, 2023; Vol. 27, 3: 128-142. (In Russ.).
18. Khakimova, F.Kh., Noskova, O.A., Khakimov, R.R. [et al.]. Integrated recycling of lignin-containing wood waste. Russian forestry journal, 2024; 3 (399): 188-202. (In Russ.).
19. Zhang, C., Wang, Y., Lv, Y. [et al.]. Influence of pectin domains and protein on the viscosity and gelation properties of alkali-extracted pectin from green tea residue. Food Chemistry, 2024; 430: 137039.
20. Semenikhin, S.O., Fabritskaya, A.A., Gorodetskiy, V.O. [et al.]. Effect of the degree of grinding of beet pressed pulp obtained by various methods of preparation of the extractant on the efficiency of pectin extraction. Food Technology, 2022; 6: P. 80-84. (In Russ.).
21. Semenikhin, S.O., Fabritskaya, A.A., Gorodetskiy, V.O. [et al.]. Study of the efficiency of extraction of pectin from pressed beet pulp with cellulase and xylanase. Food Technology, 2023; 1: 43-47. (In Russ.).
22. Semenikhin, S.O., Fabritskaya, A.A., Daisheva, N.M. Comparative assessment of the efficiency of chemical and enzymatic hydrolysis-extraction of pectin from pressed beet pulp. Bulletin KrasSAU, 2025; 7: 299-312. (In Russ.).
23. Donchenko, L.V., Firsov, G.G., Krasnoselova, E.A. Features of the process of protopectin hydrolysis from plant tissue. Proceedings of the Kuban State Agrarian University, 2006; 1: 288-297.
24. Li, J., Zhou, P., Liu, H. Synergism of cellulase, xylanase, and pectinase on hydrolyzing sugarcane bagasse resulting from different pretreatment technologies. Bioresource Technology, 2014; 155: 258-265.
25. Ninga, K.A., Desobgo, Z.S.C., De, S. [et al.]. Pectinase hydrolysis of guava pulp: effect on the physicochemical characteristics of its juice. Heliyon, 2021; Vol.7, Iss.10: e08141.
26. Benko, E.M., Chukhchin, D.G., Mamleyeva, N.A. [et al.]. Ozonolytic delignification of wheat straw. Journal of Physical Chemistry, 2020; Vol. 94, No. 8: 1153-1160. (In Russ.).
27. Vurasko, A.V., Driker, B.N., Mozyreva, YE.A., Galimova, A.R. Method for obtaining cellulose. Pat. 2321696 RU. Inventions. Utility models. 10.04.2008. (In Russ.).
28. Liu, K.-X., Li, H.-Q., Zhang, J. [et al.]. The effect of non-structural components and lignin on hemicellulose extraction. Bioresource Technology, 2016; 214: 755-760.

Information about the authors

S.O. Semenikhin - Cand. Tech. Sc., Head of the Department of Sugar and Sugar Products Technology, KRIISP - branch of the FSBSI NCFSCHVW.

A.A. Fabritskaya - Junior Researcher, Department of Sugar and Sugar Products Technology, KRIISP - branch of the FSBSI NCFSCHVW.

N.M. Daisheva - Cand. Tech. Sc., Senior Researcher, Department of Sugar and Sugar Products Technology, KRIISP - branch of the FSBSI NCFSCHVW.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 14–19.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 14–19.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК637.3
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.002 EDN: LLDEXU

ЦИФРОВОЙ СЕРВИС ТЕХНОЛОГА: ПРОЕКТИРОВАНИЕ НОВЫХ РЕЦЕПТУР ПЛАВЛЕНЫХ СЫРОВ

Елена Михайловна Нагорных [1], Ольга Николаевна Мусина [2]

[1, 2] Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия,
[1] elena_nagornikh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3051-1381
[2] musinaolga@gmail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4938-8136

Аннотация. *В статье представлена разработка цифрового сервиса для технологов, включающего базу данных «Рецептуры плавленых сыров», компьютерные программы: «Программа для управления электронным справочником рецептур плавленых сыров» и программы для обучения нейросети «Пищевые системы». Разработанный инструментарий позволяет прогнозировать ожидаемое качество рецептур с достоверностью не менее 80 %, ускоряя разработку новых продуктов и сокращая затраты на опытные выработки.*

Ключевые слова: *плавленые сыры, база данных, нейросеть, прогнозирование качества, цифровой сервис.*

Для цитирования: Нагорных Е. М., Мусина О. Н. Цифровой сервис технолога: проектирование новых рецептур плавленых сыров // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 14–19. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.002. EDN: https://elibrary.ru/LLDEXU.

Original article

DIGITAL TECHNOLOGIST SERVICE: DESIGNING NEW RECIPES FOR MELTED CHEESES

Elena M. Nagornyh [1], Olga N. Musina [2]

[1, 2] Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia,
[1] elena_nagornikh@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3051-1381
[2] musinaolga@gmail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4938-8136

Abstract. *The article presents the development of a digital service for technologists, including the database "Recipes of Processed Cheeses," computer programs: "Program for Managing the Electronic Reference of Processed Cheese Recipes" and programs for training the neural network "Food Systems." The developed toolkit allows predicting the expected quality of recipes with an accuracy of at least 80%, accelerating the development of new products and reducing the costs of pilot production.*

Keywords: *processed cheeses, database, neural network, quality forecasting, digital service.*

For citation: Nagornykh, E. M. & Musina, O. N. (2026). Digital technologist service: designing new recipes for melted cheeses. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 14-19. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.002. EDN: https://elibrary.ru/LLDEXU.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с нестабильными качественными характеристиками сырья, изменениями логистических цепочек поставок промышленного оборудования и сырья, постоянно меняющимися условиями производства, колебаниями спроса и предложения на продукцию, нечеткими целевыми технологическими, социальными и экономическими критериями управления и принятия решений предприятиям пищевой промышленности требуется внедрение цифровых технологий для ускорения разработки новых продуктов и повышения их качества. Плавленые сыры занимают значительную долю рынка молочной продукции, однако процесс создания новых рецептур остается трудоемким и требует обработки больших массивов данных. Актуальной задачей является создание цифрового инструментария, позволяющего технологам накапливать, анализировать и использовать информацию о существующих рецептурах, а также прогнозировать качество разрабатываемых продуктов на ранних этапах.

Цель настоящей работы – разработка цифрового сервиса для технологов, включающего базу данных рецептур плавленых сыров, программу управления справочником и нейросеть для прогнозирования ожидаемого качества рецептур.

МЕТОДЫ

Материалы. Для наполнения базы данных выбор информации о рецептурах плавленых сыров осуществлялся из следующих источников:

- официально изданных сборников технологических инструкций по производству плавленых сыров;

©Нагорных Е. М., Мусина О. Н., 2026

- информации из публикаций, индексированных в международных базах научного цитирования;
- диссертаций, размещенных в «Российской государственной библиотеке»;
- патентов, рецензируемых научных монографий и учебных пособий;
- статистически обработанных результатов собственных исследований.

Методы. При проектировании базы данных использовалась реляционная модель, выбранные инструменты для разработки ИС (Oracle Database Express Edition для базы данных и Oracle Application Express для компьютерной программы), для обучения нейросети Jet Brains Py Charm Community Edition являются свободными. Модель нейросети разработана на основе обучения с учителем. Оценка точности прогнозирования выполнялась по средней абсолютной ошибке (MAE).

РЕЗУЛЬТАТЫ

База данных (БД) «Рецептуры плавленых сыров» предназначена для накопления, хранения, анализа и выдачи информации о рецептурах плавленых сыров.

Модель базы данных была разработана таким образом, чтобы дать возможность оперативно анализировать и выбирать из имеющихся рецептур плавленых сыров необходимую рецептуру, на основе различных параметров, а также практически без изменений адаптировать ее к рецептурам любых пищевых систем.

На рисунке 1 изображена модель базы данных «Рецептуры плавленых сыров».

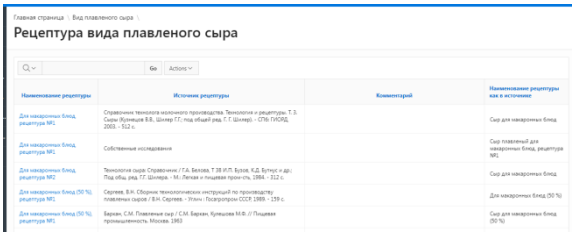
Рисунок 1 – Модель базы данных
«Рецептуры плавленых сыров»

Figure 1 – Model of the
"Processed Cheese Recipes" database

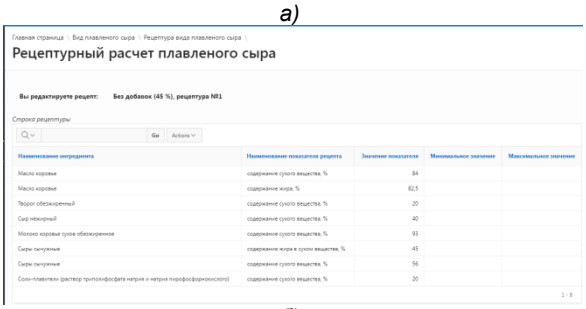
База данных прошла официальную государственную регистрацию под № 2023620806 [1]. На момент регистрации БД в ней содержалось 869 рецептур плавленых сыров. БД предусматривает возможность пополнения новыми рецептурами плавленых сыров и открыта для корректировки имеющихся рецептур.

Для поддержки функционирования БД нами на языке программирования Java написана программа для управления электронным справочником рецептур плавленых сыров (свидетельство о государственной регистрации № 2023618007) [2]. Программа написана в среде разработки Oracle Application Express, что позволяет реализовать web-приложение, поддерживаемое большим количеством браузеров на любой платформе.

На рисунке 2 представлена информация о рецептуре плавленого сыра



а)



б)

Рисунок 2 – Рецептура плавленого сыра:
а – рецептура сыра; б – рецептурный расчет сыра

Figure 2 – Recipe for processed cheese:
a – cheese recipe, b – cheese recipe calculation

«Программа для управления электронным справочником рецептур плавленых сыров» позволяет пользователю в удобном для него интерфейсе на основе данных о внесенных рецептурах плавленых сыров отбирать рецептуры по различным критериям и их сочетаниям, при отсутствии на складе какого-либо вида сырья из базы данных выводит предложения по замене на основе химического состава ингредиентов.

Пример отбора рецептур по ингредиенту представлен на рисунке 3.

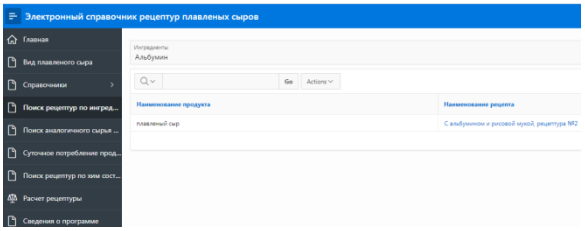


Рисунок 3 – Поиск рецептур по ингредиенту

Figure 3 – Searching for recipes by ingredient

Возможен поиск ингредиентов для замены в составе рецептуры по конкретному показателю пищевой ценности (например, содержание аминокислот) представлен на рисунке 4. Например, программа предложит заменить в рецептуре брынзу (в качестве источника незаменимых аминокислот) на другие конкретные сыры с указанием содержания в них суммы незаменимых аминокислот.

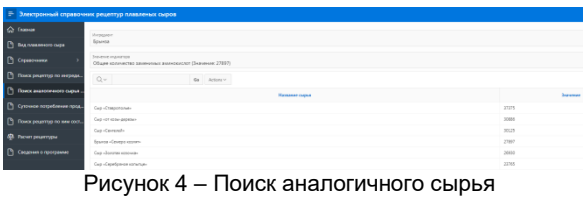


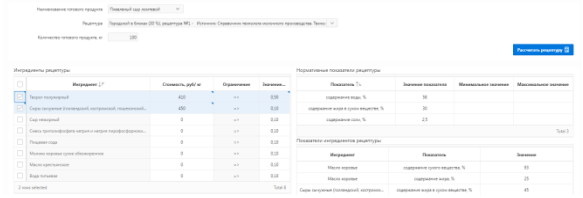
Рисунок 4 – Поиск аналогичного сырья
по химическому составу заданного ингредиента

Figure 4 – Search for similar raw materials based on the
chemical composition of a given ingredient

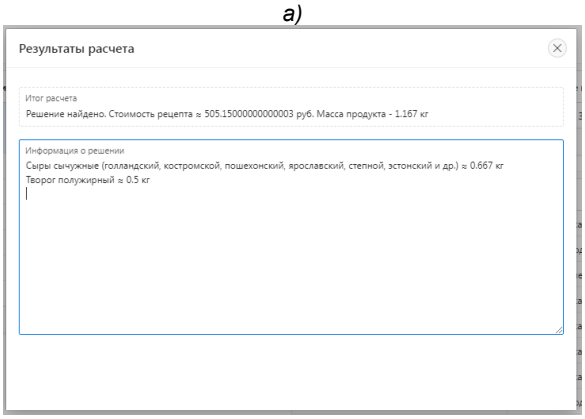
Также в программе реализован поиск рецептур по конкретному ингредиенту. Например, будут отфильтрованы рецептуры плавленого сыра, включающие в перечень используемого сырья молочный альбумин.

Функционал программы позволяет отфильтровать рецептуры плавленого сыра по наличию информации о конкретном показателе пищевой ценности (например, содержание в сыре витамина B_3). В результате будут выведены рецептуры, содержащие данный показатель пищевой ценности, отфильтрованные в порядке возрастания содержания витамина B_3.

Также можно рассчитать рецептуру, указав ингредиенты и нормативные показатели, пример расчета приведен на рисунке 5.



а)



б)

Рисунок 5 – Расчет рецептуры
с применением симплекс-метода

Figure 5 – Recipe calculation using the simplex method

При работе с программой можно при необходимости выгружать рецептуры в формате отчета в формате xls (рисунок 6).

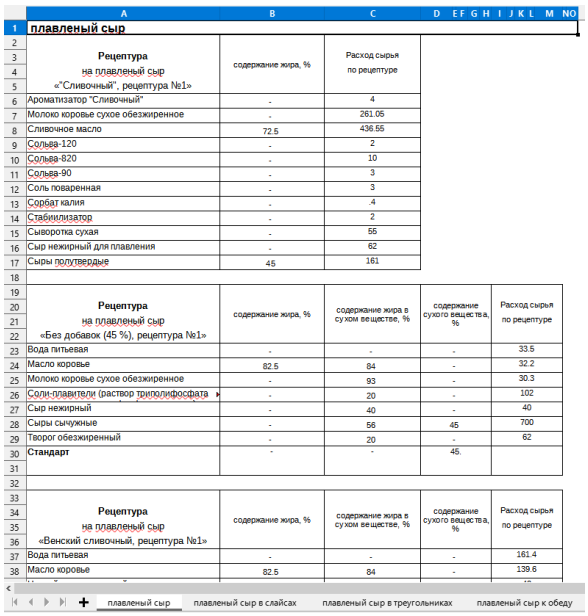
«Программа для управления электронным справочником рецептур плавленых сыров» может использоваться в качестве электронного справочника технологов, других специалистов молочной промышленности, научных работников пищевой отрасли, может быть полезна в расчетах сбалансированных рационов питания.

Для разработки новых рецептур и изменения уже существующих для технологов была разработана специальная программа для обучения нейросети «Пищевые системы» с помощью библиотеки Keras [3].

В связи с относительно небольшим объемом данных, с которыми будет работать нейросеть (менее 1000 рецептур плавленых сыров) и для повышения достоверности прогнозирования, было принято решение разработать модель обучения с учителем (рисунок 7).

При использовании этой модели нейросеть получает входные обучающие данные, содержащие метки правильных ответов, что позволяет нейросети выявлять закономерности на примерах и в дальнейшем самой устанавливать метки для данных.

Входные обучающие данные в нашем случае – значения столбцов рецептур, а меткой, содержащей правильный ответ, или целевой переменной, будет введенный нами условный показатель QUALITY, отражающий интегральное ожидаемое качество рецептуры.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	плавленый сыр														
2															
3	Рецептура														
4	на плавленый сыр	содержание жира, %	Расход сырья												
5	«"Сливочный", рецептура №1»		по рецептуре												
6	Ароматизатор "Сливочный"	-	4												
7	Молоко коровье сухое обезжиренное	-	261.05												
8	Сливочное масло	72.5	436.55												
9	Сольва-120	-	2												
10	Сольва-820	-	10												
11	Сольва-90	-	3												
12	Соль поваренная	-	3												
13	Сорбат калия	-	4												
14	Стабилизатор	-	2												
15	Сыворотка сухая	-	55												
16	Сыр нежирный для плавления	-	82												
17	Сыры полутвердые	45	161												
18															
19	Рецептура														
20	на плавленый сыр	содержание жира, %	содержание жира в сухом веществе, %	содержание сухого вещества, %	Расход сырья										
21	«Без добавок (45 %), рецептура №1»				по рецептуре										
22	Вода питьевая	-	-	-	33.5										
23	Масло коровье	82.5	84	-	32.2										
24	Молоко коровье сухое обезжиренное	-	93	-	30.3										
25	Соли-плавители (раствор триполифосфата	-	20	-	102										
26	Сыр нежирный	-	40	-	40										
27	Сыры сычужные	-	56	45	700										
28	Творог обезжиренный	-	20	-	62										
29	Стандарт	-	-	45.											
30															
31															
32	Рецептура														
33	на плавленый сыр	содержание жира, %	содержание жира в сухом веществе, %	содержание сухого вещества, %	Расход сырья										
34	«Венский сливочный, рецептура №1»				по рецептуре										
35	Вода питьевая	-	-	-	161.4										
36	Масло коровье	82.5	84	-	139.6										

плавленый сыр | плавленый сыр в слайсах | плавленый сыр в треугольниках | плавленый сыр к обеду

Рисунок 6 – Отчет из «Программы для управления электронным справочником рецептур плавленых сыров»

Figure 6 – Report from the "Program for Managing the Electronic Handbook of Processed Cheese Formulations"

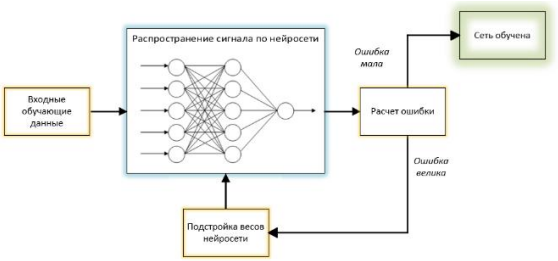


Рисунок 7 – Обучение нейросети с учителем
(схема процесса)

Figure 7 – Neural network training with a teacher

Обучение нейросетей начинается с перемешивания данных в наборе данных, чтобы избежать возможной сортировки по какому-либо признаку и сохранить случайность данных, затем происходит разделение набора на 3 выборки: обучающая выборка, тестовая выборка, проверочная выборка.

Обучающая выборка – это набор данных, на котором модель обучается, настраивая свои веса и определяя зависимости между входными обучающими данными и целевой переменной. Тестовая выборка – это набор данных, на которых модель не обучалась, этот набор нужен для оценки качества и точности будущих прогнозов, необходим разработчику программы для контроля и отладки своего кода. Проверочная выборка – это набор данных, на которых модель не обучалась, этот набор нужен для оценки качества и точности будущих прогнозов. Обучающая выборка необходима для обучения нейросети, тестовая – для оценки качества обучения нейросети, проверочная выборка поможет еще раз оценить качество

обучения нейросети. Обычно при таком разделении выборки соблюдают пропорцию 70/30, где 70 % – обучающая выборка, 30 % – тестовая и проверочная выборки, или 80/20, где 80 % – обучающая выборка, а 20 % – тестовая и проверочные выборки.

Далее необходимо разработать модель нейросети. Под моделью нейросети подразумевается результат работы алгоритма машинного обучения, выполняемый на обучающей выборке и представляющий собой правила, веса и другие данные, специфичные для алгоритма и необходимые для прогнозирования.

Для нашего набора данных мы предлагаем модель нейросети, состоящую из входного слоя на 8 нейронов, двух скрытых слоев по 64 нейронов и выходного слоя из одного нейрона. Входной слой – значения столбцов рецептур: массовая доля (%) жира, белков, влаги, жира в сухом веществе, золы, органических кислот, сахарозы, пищевой соли, сухого вещества (рисунок 8), выходной слой (целевая переменная) – условный показатель QUALITY, отражающий интегральное ожидаемое качество рецептуры и принимающий условное значение от 0 до 10 условных единиц.

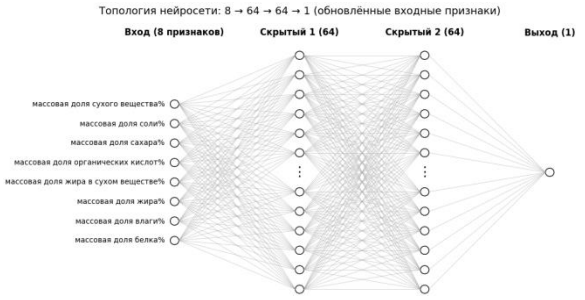


Рисунок 8 – Модель нейросети «Пищевые системы»

Figure 8 – Neural Network Model “Food Systems”

Обучение нейросети происходит до тех пор, пока она не сможет прогнозировать правильные ответы для тестовой выборки. В связи с тем, что нейросеть не в состоянии освоить с первого раза информацию, содержащуюся в обучающей выборке, необходимо несколько циклов обучения (эпох). Под эпохой понимается, что вся обучающая выборка прошла через нейронную сеть в прямом и обратном направлении. Так как обучающая выборка не может вся проходить через нейросеть, ее делят на пакеты (батчи). Количество итераций – это число пакетов (батчей), необходимых для завершения эпохи.

Для того чтобы определить оптимальное количество циклов обучения, необходимо контролировать в процессе обучения модели нейросети среднюю абсолютную ошибку (Mean Absolute Error, MAE), которая позволяет определить точность функционирования предлагаемой нами модели нейросети. Чем ниже MAE, тем точнее модель способна предсказывать (прогнозировать) фактические значения.

Средняя абсолютная ошибка MAE вычисляется по формуле 1:

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \quad , \qquad (1)$$

где y_i – наблюдаемое значение для i-го цикла обучения или эпохи; $\hat{y}_i$ – прогнозируемое значение для i- го цикла обучения или эпохи; n – общее количество циклов обучения или эпох. Нейросеть «Пищевые системы» создана для прогнозирования ожидаемого качества рецептуры. Точность прогноза будем оценивать по значению MAE проверочной выборки (формула 1). Оптимальное количество циклов обучения будем определять исходя из минимального значения средней абсолютной ошибки проверочной выборки.

Для нейросети «Пищевые системы» путем перебора циклов обучения от 8 до 5000 эпох и анализа величины MAE установлено, что среднюю абсолютную ошибку проверочной выборки на уровне не более 20 % позволят обеспечить следующие параметры:

- количество циклов обучения (эпох) – не менее 40;
- количество пакетов (батчей) – 10;
- количество итераций – 10 % от исходного набора данных (для нашего набора данных, содержащего 869 рецептур плавленых сыров, количество итераций 87).

Все этапы машинного обучения нейросети «Пищевые системы» проводились посредством самостоятельно написанной на языке программирования Python программы (№ 2023684297 от 14.11.2023 г.) [3] с использованием датасета «Программа для управления электронным справочником рецептур плавленых сыров». Предварительно было проверено, что все значения в датасете не имеют пропусков, все типы корректные и являются числовыми.

На первом этапе был подготовлен файл данных CSV с разделителями-запятыми (Comma-Separated Values), включающий рецептуры и показатели, типичные для плавленых сыров (массовая доля белка, влаги, сухих веществ, жира в сухом веществе и т.д.), фигурирующие в предлагаемой нами модели нейросети «Пищевые системы». Если единичный показатель для конкретной рецептуры не задан, его значение приравнивалось к 0.

Также в файл CSV включено поле «QUALITY» – введенный нами условный показатель ожидаемого интегрального качества рецептуры. Для обучения нейронной сети «Пищевые системы» поле QUALITY предварительно заполнено на основе органолептических свойств рецептур.

Таким образом, нейросеть «Пищевые системы» получила входные обучающие данные, содержащей метки правильных и неправильных ответов о рецептурах и показателях для плавленого сыра.

Перед обучением нейросети сделана предварительная оценка входных обучающих данных, а затем происходит собственно процесс обучения нейросети.

Обучение начинается с перемешивания данных в наборе, чтобы избежать возможной сортировки по какому-либо признаку и сохранить случайность данных.

Затем набор данных разделяется на 3 выборки: обучающая выборка, тестовая выборка, проверочная выборка, в пропорции 80/20, где 80 % – обучающая выборка, а 20 % – тестовая и проверочные выборки.

Из набора данных, содержащего 869 рецептур плавленых сыров, выделяем обучающую выборку, содержащую 695 рецептур (80 % от общего количества рецептур), тестовую выборку, которая составляет 87 рецептур (10 % от общего количества рецептур) и проверочную выборку, которая также составляет 87 рецептур (10 % от общего количества рецептур).

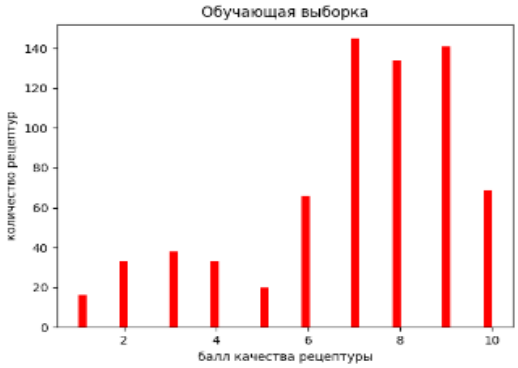
Обучение проведено в соответствии с ранее установленными параметрами: количество циклов обучения 200, количество пакетов – 10, количество итераций – 87.

Сначала нейросетью «Пищевые системы» был проведен анализ, все ли значения заполнены корректно по всей базе рецептур в целом.

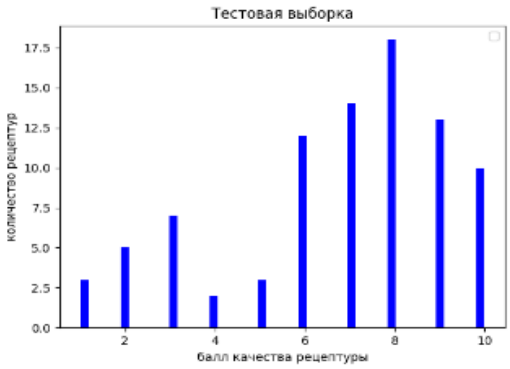
После анализа данных запускаем обучение

нейросети «Пищевые системы», из набора данных, содержащего 869 рецептур плавленых сыров, выделяем обучающую выборку, содержащую 695 рецептур (80 % от общего количества), тестовую выборку, которая составляет 87 рецептур (10 % от общего количества рецептур) и проверочную выборку, которая также составляет 87 рецептур (10 % от общего количества рецептур). Гистограммы, отражающие распределение баллов качества рецептур в этих выборках, представлены на рисунке 9.

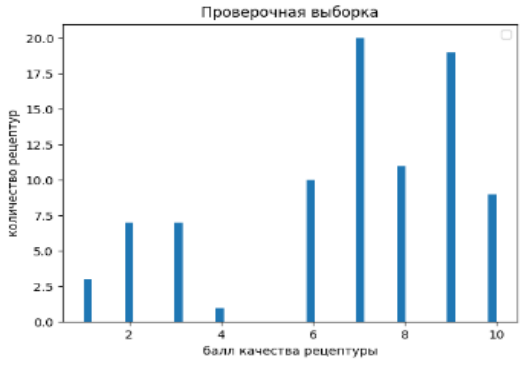
Для смоделированной нами тестовой рецептуры плавленого пастообразного сыра, с входными параметрами, указанными на рисунке 4.2.10, нейросеть «Пищевые системы» прогнозирует ожидаемое значение качества рецептуры QUALITY = 8,91 условных единиц, достоверность прогноза – 81,04 %.



а



б



в

Рисунок 9 – Гистограммы плавленого сыра:
а – обучающая выборка, *б* – тестовая выборка,
в – проверочная выборка

Figure 9 – Histograms of processed cheese: a – training sample, b – test sample, c – validation sample

Целевой показатель достоверности прогнозирования, установленный нами, составляет не менее 80 % (рисунок 10).

Кроме того, в результате анализа процесса обучения нейросети установлено, что для корректной работы нейросети необходимо, чтобы после разделения набора данных на обучающую, тестовую и проверочную выборку все возможные значения баллов качества рецептуры фигурировали в каждой выборке, что обычно достигается при наличии в наборе данных более 200 рецептур.

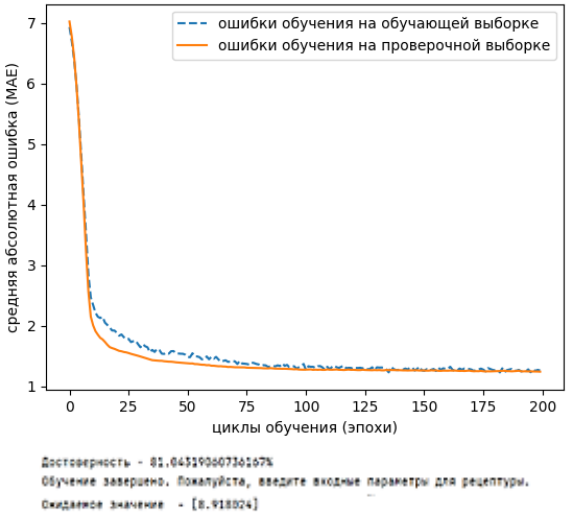


Рисунок 10 – Прогнозирование нейросетью «Пищевые системы» ожидаемого качества рецептуры плавленого сыра

Figure 10 – Prediction of the expected quality of processed cheese by the Food Systems neural network

Апробация нейросети в лаборатории ЦКИ «АлтайБиоЛакт» подтвердила эффективность разработанного инструментария для прогнозирования ожидаемого качества новых вариантов рецептур.

ОБСУЖДЕНИЕ

1. Разработка цифрового инструментария, адаптированного к потребностям сыродельной отрасли, является актуальной научной задачей.

В разработанный нами цифровой сервис для технологов «Разработка новых рецептур плавленых сыров» входит база данных «Рецептуры плавленых сыров», включающая 869 рецептур, и «Программа для управления электронным справочником рецептур плавленых сыров» и нейросеть «Пищевые системы», обученная на наборе данных (рецептурах) из базы данных.

Модель нейросети «Пищевые системы» состоит из входного слоя на 8 нейронов, 2 скрытых слоев по 64 нейронов и выходного слоя из 1 нейрона. Выходной слой (целевая переменная) – введенный нами условный показатель QUALITY, отражающий интегральное ожидаемое качество рецептуры и принимающий значение от 0 до 10 условных единиц.

Обученная нейросеть «Пищевые системы» подтвердила свою эффективность во время апробации для прогнозирования ожидаемого качества новых вариантов рецептур в лаборатории «Центр комплексных исследований и экспертной оценки пищевой продукции «АлтайБиоЛакт».

Установлено, что обученная нейросеть «Пищевые системы» работает эффективно и может быть

рекомендована для практического применения.

Разработанный инструментарий позволяет эффективно применять современные цифровые технологии для сбора, обработки, анализа открытой для редактирования БД «Рецептуры плавленых сыров», прогнозировать с помощью нейросети «Пищевые системы» интегральный ожидаемый показатель качества рецептуры на начальных этапах жизненного цикла продукта. Таким образом, предлагаемый нами цифровой инструментарий позволяет ускорить разработку новых или изменение уже имеющихся рецептур плавленых сыров, прогнозировать их качество перед опытной выработкой и до запуска в производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023620806 Рос. Федерация. Рецептуры плавленых сыров : № 2023620498 : заявл. 22.02.2023 : опубл. 06.03.2023, Бюл. № 3. 2 с.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618007 Российская Федерация. Программа для управления электронным справочником рецептур плавленых сыров : № 2023616639 : заявл. 04.04.2023 : опубл. 18.04.2023, Бюл. № 4. 2 с.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684297 Российская Федерация. Программа для обучения нейросети «Пищевые системы» : № 2023683285 : заявл. 03.11.2023 : опубл. 14.11.2023, Бюл. № 11. 2 с.

Информация об авторах

Е. М. Нагорных – мл. науч. сотр. ЦКИ «АлтайБиоЛакт» ФГБОУ ВО АлтГТУ.

О. Н. Мусина – д-р техн. наук, гл. науч. сотр. ЦКИ «АлтайБиоЛакт» ФГБОУ ВО АлтГТУ.

REFERENCES

1. Musina, O.N. & Nagornykh, E.M. (2023). Recipes of processed cheeses. Certif. No. 2023620806. Russian Federation, published on 06.03.2023. Bull. No. 3. (In Russ.).

2. Musina, O.N. & Nagornykh, E.M. (2023). Program for managing an electronic reference book of recipes of processed cheeses. Certif. No. 2023618007. Russian Federation, published on 18.04.2023. Bull. No. 4. (In Russ.).

3. Musina, O.N. & Nagornykh, E.M. (2023). Program for training the neural network “Food systems”. Certif. No. 2023684297. Russian Federation, published on 14.11.2023. Bull. No. 11. (In Russ.).

Information about the authors

E.M. Nagornykh - junior researcher «AltaiBioLact», Polzunov Altai State Technical University.

O.N. Musina - D.Sc., Professor of the Institute for Biotechnology, Food and Chemical Engineering, Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 20–31.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 20–31.

Обзорная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.8
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.003 EDN: ZGFWRR

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЩЕЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОЛИЗОВАННОЙ ВОДЫ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

Леонид Чеславович Бурак

Общество с ограниченной ответственностью «Белросаква», Минск, Республика Беларусь
leonidburak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6613-439X

Аннотация. *Поиск инновационных технологий, направленных на обеспечения качества и безопасности пищевых продуктов, незначительно снижающих пищевую ценность и оказывающих минимальное воздействие на окружающую среду, является основным приоритетом предприятий пищевой промышленности. Получаемая путем электрохимической диссоциации воды и солей щелочная электролизованная вода обладает дезинфицирующими свойствами, благодаря высокому pH, низкому окислительно-восстановительному потенциалу и повышенной проницаемости. Цель статьи – обзор результатов научных исследований по использованию щелочной электролизованной воды в пищевой промышленности и агропромышленном производстве. В качестве материалов исследования послужили научные статьи, опубликованные в период с 2015 по 2025 год. Научный поиск провели в научных базах данных Scopus и Web of Science, Google Scholaru в Научной электронной библиотеке «eLIBRARY.RU». Среди статей, соответствующих критериям включения для составления данного обзора, было выбрано 63 исследования. Обзор результатов научных исследований показал, что благодаря высокому pH, окислительно-восстановительному потенциалу и проницаемости щелочная электролизованная вода является эффективным средством для применения в пищевой промышленности, здравоохранении и сельском хозяйстве. Использование электролизованной воды в процессах экстракции позволяет значительно увеличить извлечение белков и биоактивных соединений, улучшая текстуру, вкус и удержание влаги в пище, что способствует повышению качества продукта и эффективности переработки. В качестве средства обеззараживания щелочная электролизованная вода эффективно дезинфицирует поверхности, удаляет остатки пестицидов и токсины и снижает микробную нагрузку, значительно повышая безопасность пищевых продуктов. Благодаря своей нетоксичности и экологичности щелочная электролизованная вода может служить эффективной альтернативой традиционным химическим методам, способствуя повышению безопасности, качеству и устойчивости, минимизируя воздействие на окружающую среду. Однако необходимо отметить такие проблемы, как нестабильность щелочной электролизованной воды, ее способность вызывать коррозию оборудования, а также отсутствие утвержденных нормативных документов по ее использованию и недоверие потребителей. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на повышение стабильности щелочной электролизованной воды, оптимизацию параметров обработки различных видов пищевого сырья, производственных процессов по ее использованию и разработке нормативной базы.*

Ключевые слова: *электролиз, электролизованная вода, качество, микробиологическая обсеменённость, патогены, инактивация, дезинфекция, консервант, экстракция, биологически активные вещества, пищевая ценность.*

Для цитирования: Бурак Л. Ч. Перспективы использования щелочной электролизованной воды. Обзор предметного поля // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 20–31. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.003. EDN: https://elibrary.ru/ZGFWRR.

Original article

PROSPECTS OF USING ALKALINE ELECTROLYZED WATER. A REVIEW OF SUBJECT FIELD

Leonid Ch. Burak

Belrosakva Limited Liability Company, Minsk, Republic of Belarus
leonidburak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6613-439X

Abstract. *The search for innovative technologies aimed at ensuring the quality and safety of food products, slightly reducing the nutritional value and having a minimal impact on the environment is the main priority of the food industry. Alkaline electrolyzed water obtained by electrochemical dissociation of water and salts has disinfectant properties due to high pH, low oxidation-reduction potential and increased permeability. The purpose of the article is to review the results of scientific research on the use of alkaline electrolyzed water in the food industry and agro-industrial production. The research materials were scientific articles published between 2015 and 2025. The scientific search was conducted in the*

© Бурак Л. Ч., 2026

scientific databases Scopus and Web of Science, Google Scholar and the Scientific Electronic Library "eLIBRARY.RU". Among the articles that met the inclusion criteria, 63 studies were selected to compile this review. A review of scientific research has shown that alkaline electrolyzed water, due to its high pH, oxidation-reduction potential and permeability, is an effective means for use in the food industry, healthcare and agriculture. The use of electrolyzed water in extraction processes can significantly increase the recovery of proteins and bioactive compounds, improving the texture, taste and moisture retention of food, which contributes to higher product quality and processing efficiency. As a disinfectant, alkaline electrolyzed water effectively disinfects surfaces, removes pesticide residues and toxins and reduces microbial load, significantly improving food safety. Due to its non-toxicity and environmental friendliness, alkaline electrolyzed water can serve as an effective alternative to traditional chemical methods, contributing to increased safety, quality and sustainability, while minimizing the impact on the environment. However, issues such as the instability of alkaline electrolyzed water, its ability to cause corrosion of equipment, as well as the lack of approved regulations for its use and consumer mistrust should be noted. Further scientific research should be aimed at increasing the stability of alkaline electrolyzed water, optimizing the processing parameters of various types of food raw materials, production processes for its use and developing a regulatory framework.

Keywords: *electrolysis, electrolyzed water, quality, microbiological contamination, pathogens, inactivation, disinfection, preservative, extraction, biologically active substances, nutritional value.*

For citation: Burak, L. Ch. (2026). Prospects of using alkaline electrolyzed water. A review of subject field. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 20-31. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.003. EDN: https: //elibrary.ru/ZGFWRR.

ВВЕДЕНИЕ

Пищевая промышленность претерпевает значительные изменения, поскольку она все больше внедряет устойчивые и инновационные технологии переработки, направленные на повышение безопасности пищевых продуктов, улучшение качества и минимизацию воздействия на окружающую среду [1]. Среди новых решений щелочная/основная электролизованная вода (ЩЭВ) привлекла значительное внимание научное сообщество благодаря широкому спектру возможного использования в качестве дезинфицирующего, консервирующего и функционального средства [2, 3, 4]. ЩЭВ генерируется путем электролиза насыщенного солевого раствора, в результате чего получается раствор с высоким pH, повышенным восстановительным потенциалом и эффективной проникающей способностью [4]. В отличие от традиционных химических дезинфицирующих средств ЩЭВ представляет собой нетоксичную, экологически чистую альтернативу, которая снижает содержание химических остатков в пищевых продуктах, тем самым повышая безопасность пищевых продуктов и способствуя устойчивости процессов их производства [4]. Многие годы большинство исследований по применению электролизованной воды для дезинфекции в пищевой промышленности были сосредоточены на слабокислой электролизованной воде (СКЭВ), в то время как ЩЭВ изначально рассматривалась для использования в основном в областях производства водорода, топливных элементов и аккумуляторных технологий [5, 6]. СКЭВ, обладая более низким pH и высоким окислительным потенциалом, эффективна для уничтожения широкого спектра патогенов, но ее агрессивные окислительные свойства иногда могут повредить пищевые продукты, ухудшить пищевую ценность или привести к остаточному количеству нежелательных химических веществ [6]. Напротив, ЩЭВ, которая имеет более высокий pH и восстановительный потенциал, оказывает более щадящее воздействие на обрабатываемый продукт, но при этом не менее эффективное дезинфицирующее действие. Различные свойства ЩЭВ способствуют сохранению качества пищевых продуктов, при этом достигая микробной инактивации, что характеризует ее как эффективный альтернативный метод для процессов, требующих как дезинфекции, так и консервирования. Отличительные физико-химические свойства ЩЭВ, такие как высокий pH, повышенный восстановительный потенциал и отличная способность проникновения в поверхность пищевого продукта и мембраны микробных клеток, делают его особенно эффективным для микробной инактивации, а также для улучшения качества пищевых продуктов и продления срока годности [7, 8]. Эти свойства дают ЩЭВ явное преимущество перед СКЭВ не только в качестве чистящего средства, но и в более широком спектре применений в пищевой промышленности и сельском хозяйстве. Например, ЩЭВ продемонстрировала высокую эффективность в сохранении сенсорных показателей качества и пищевой ценности фруктов, овощей и мяса [4, 9, 10]. Вместе с тем следует отметить, что большая часть научных исследований направлена на использование ЩЭВ в качестве дезинфицирующего средства или консерванта с целью обеспечения микробиологической стабильности и безопасности пищевых продуктов [4, 9]. Потенциальная возможность использования щелочной электролизованной воды в процессах экстракции белка и биологически активных соединений, улучшении органолептических показателей пищевых продуктов пока изучен недостаточно. Более того, необходимо продолжать научные исследования влияния ЩЭВ по снижению микробной биопленки, дезактививации пищевых патогенов, таких как *Escherichia coli* , *Listeria monocytogenes, Salmonella, Legionella* и, возможно, вирусов, таких как SARS-CoV-2, вирус гриппа А, вирус простого герпеса типа 1[9]. В связи с этим цель данного исследования – интегративный обзор современных данных об эффективности использования щелочной электролизованной воды (ЩЭВ) в пищевой промышленности и агропромышленном производстве, анализ основных недостатков ограничений для широкомасштабного использования на всех этапах цепочки, производства и хранения продуктов питания. Такой междисциплинарный подход позволит не только позиционировать ЩЭВ как эффективный инструмент повышения безопасности, качества и устойчивости современной пищевой промышленности, но и создать основу для прикладных инноваций и научных исследований, направленных на трансформацию продовольственных систем в направлении сохранения ресурсов и охраны здоровья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поиск научной литературы на английском и русском языках по исследованию физико-химических свойств, антимикробной активности, технологическим возможностям, практическим аспектам применения и

ограничениям щелочной электролизованной воды в различных отраслях АПК (пищевые производства, растениеводство, животноводство, санитарная обработка оборудования) проводили в библиографических базах «Scopus», «Web of Science», Google Scholar»и «Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU». В качестве дескрипторов использовали «щелочная электролизная вода», «электролизная окислительная вода», «агропромышленное производство», «дезинфекция», «санитарная обработка», «консервирование пищевых продуктов», «послеуборочная обработка», «дезактивация», «экстракция», «извлечение биологически активных соединений». В качестве временных рамок для обзора научных публикаций принят период 2015–2025 гг.

Критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу, были следующими:

Критерии включения:

1. Статья написана в период 2015–2025 гг.

2. Экспериментальные и обзорные работы по применению ЩЭВ в очистке, обработке, хранении, производстве продукции агропромышленного комплекса.

3. Оригинальные исследовательские статьи результатов эффективности ЩЭВ по микробиологической деконтаминации на различных видах пищевых продуктов и технологического оборудования.

4. Публикации и краткие отчеты по оценке влияния ЩЭВ на органолептические показатели, пищевую ценность обрабатываемых продуктов, эффективность экстрагирования белков и биологически активных соединений с использованием ЩЭВ.

Критерии исключения:

1. Статья не соответствует теме данного обзора: не касаются тематики исследования по применению ЩЭВ в агропромышленном комплексе.

2. Фрагментированные сообщения по применению ЩЭВ без указания методов/результатов;

3. Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRIZMA и составляли схему проведения исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получение и свойства щелочной электролизованной воды (ЩЭВ).

ЩЭВ генерируется посредством электролиза насыщенного солевого раствора (например, NaCl). Данный процесс электролиза требует минимального количества электроэнергии, что делает его энергоэффективным методом получения высококачественных многофункциональных растворов. Кроме того, данный метод обладает несколькими преимуществами, такими как низкие производственные затраты, эксплуатационная безопасность и минимальное воздействие на окружающую среду по сравнению с традиционными методами очистки и консервирования на основе химических веществ [8, 10, 12]. Установка электролиза включает электролизную ячейку, которая содержит анод и катод, разделенные диафрагмой. При подаче электрического тока вода (H_2O) на катоде подвергается диссоциации, образуя газообразный водород (H_2) и гидроксид-ионы (OH^-), в то время как на аноде образуются газообразный хлор (Cl_2) и газообразный кислород (O_2). Ионы гидроксида (OH^-), образующиеся на катоде, взаимодействуют с ионами натрия (Na^+) из солевого раствора, что приводит к образованию гидроксида натрия (NaOH), который определяет щелочность полученного раствора. Другие параметры обработки, такие как приложенный ток, время электролиза и температура, также могут влиять на характеристики ЩЭВ. Эти параметры имеют решающее значение для оптимизации производительности и стабильности получаемой электролизованной воды. Свойства ЩЭВ, включая его высокий pH, низкий окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) и повышенную проницаемость, вносят значительный вклад в его универсальность как многофункционального агента по потенциальному применению в пищевой промышленности, консервировании и сельском хозяйстве. Эти свойства не только делают ЩЭВ эффективным чистящим и дезинфицирующим средством, но и подчеркивают его потенциал для улучшения качества продуктов питания, продления срока годности и поддержки устойчивости сельского хозяйства [8, 10]. Раствор щелочной электролизованной воды эффективно расщепляет органические материалы, такие как белки, жиры, масла и другие загрязнители, благодаря высокому pH, сильному восстановительному потенциалу и присутствию небольших количеств HClO. Высокий pH ЩЭВ нарушает структуру органических соединений, заставляя их легче распадаться. Он также эмульгирует масла и жиры, что облегчает удаление жирных или маслянистых остатков с поверхностей [13]. Значительный восстановительный потенциал ЩЭВ также способствует расщеплению сложных органических веществ за счет восстановления окисленных молекулярных компонентов, таких как дисульфидные связи в белках. Кроме того, небольшие количества HClO, образующиеся во время электролиза, способствуют окислению и разложению органических веществ, что дополнительно способствует удалению пятен и остатков жировых отложений [14, 15]. В комплексе эти механизмы способствуют эффективной очистке поверхностей, оборудования и производственных сред от стойких загрязнений, таких как биопленки и остатки пищи [16]. Поэтому с точки зрения снижения остатков химических веществ в пищевых продуктах ЩЭВ может быть эффективным альтернативным средством обычным химическим очистителям, таким как растворы на основе хлора, перекись водорода и синтетические моющие средства.

ЩЭВ также эффективна при использовании в различных процессах переработки пищевых продуктов, особенно в повышении извлечения белков и биоактивных соединений, а также улучшении консистенции, вкуса и удержания влаги в пище. Благодаря этим свойствам ЩЭВ эффективна в производстве растительных пищевых продуктов, где извлечение биоактивных веществ и улучшение эмульсий имеют решающее значение для качества продукта [8]. Например, использование ЩЭВ в переработке растительных пищевых продуктов облегчает извлечение антиоксидантов, полифенолов и других биоактивных соединений, полезных для здоровья человека [4, 18, 19]. Более того, было установлено, что ЩЭВ улучшает характеристики теста в процессах выпечки и улучшает эмульсии в производстве пищевых продуктов, что оказывает положительное влияние на стабильность и внешний вид мучных изделий. Помимо влияния на текстуру и качество пищевых продуктов, антиоксидантные свойства ЩЭВ способствуют сохранению от окисления чувствительных к теплу питательных веществ, витаминов и других биоактивных веществ в пищевых продуктах. Низкий

окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) раствора около −800 до −900 мВ помогает подавлять окисление липидов, что является основной причиной прогорклости жиров и масел. Уменьшая окисление, ЩЭВ может продлить срок годности различных пищевых продуктов, включая мясо, фрукты и овощи [4, 10]. Исследования показали, что ЩЭВ может эффективно снижать уровни остатков пестицидов во фруктах и овощах, что повышает безопасность пищевых продуктов и соответствует растущему спросу потребителей на более натуральные и менее химически обработанные пищевые продукты [4]. В дополнение к антиоксидантным свойствам, низкое содержание растворенного кислорода в ЩЭВ и наличие небольших кластеров воды (5–6 молекул) значительно улучшают проницаемость раствора. Это позволяет ЩЭВ более эффективно проникать в пищевые матрицы, дополнительно подавляя рост микроорганизмов и продлевая свежесть пищевых продуктов [4, 10]. Помимо эффективного действия по очистке, обработке и консервированию пищевых продуктов ЩЭВ обладает значительным потенциалом по использованию в сельскохозяйственном производстве и медицине. Применение ЩЭВ В сельском хозяйстве может эффективно повысить pH почвы, устойчивость сельскохозяйственных культур к болезням и вредителям, а за счет снижения окислительного стресса улучшить здоровье скота [3]. Кроме того, ЩЭВ положительно влияет на здоровье кишечника и улучшает кровообращение у людей [20, 21]. Использование ЩЭВ в уходе за полостью рта также привлекло внимание, поскольку исследования показывают, что ЩЭВ может улучшить гигиену полости рта за счет уменьшения зубного налета и бактерий во рту, что потенциально приводит к улучшению общего состояния здоровья [22]. Широкий спектр функциональных преимуществ позиционирует ЩЭВ как универсальное средство не только для обработки и консервирования пищевых продуктов, но и для поддержания благополучия потребителей. Подводя итог, можно сделать вывод, что ЩЭВ – это универсальное и экологичное решения для пищевой отрасли, имеющее ряд приложений, которые будут способствовать обеспечению безопасности, качества и устойчивости пищевых продуктов. Простое производство на основе электролиза приводит к получению щелочного раствора, который служит мощным чистящим, обрабатывающим и консервирующим средством. Способность ЩЭВ снижать микробиологическую обсеменённость, улучшать эффективность извлечения биологически активных соединений, продлевать срок годности продукта и поддерживать устойчивость сельского хозяйства подчеркивает ее ценность как практичного и экологически безопасного средства для пищевой промышленности и агропромышленного комплекса.

Применение ЩЭВ в качестве дезинфицирующего средства.

В ходе научных исследований установлено, ЩЭВ обладает значительным потенциалом по обеззараживанию и стерилизации поверхностей, контактирующих с пищевыми продуктами, технологического оборудования и сырья. Высокий уровень pH и сильные восстановительные свойства, а также небольшое количество HClO играют решающую роль в нейтрализации широкого спектра патогенов, включая бактерии, вирусы, грибки и другие микроорганизмы. Среда с высоким pH, создаваемая ЩЭВ, нарушает мембраны микробных клеток, делая их более проницаемыми и восприимчивыми к повреждениям, что влечет за собой утечку содержимого клетки и к ее гибели [23]. Низкий окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) ЩЭВ оказывает влияние на восстановление дисульфидных связей в белках и ферментах внутри микробных клеток, это приводит к их денатурации и инактивации и увеличению антимикробной активности. Наличие HClO вызывает окислительный стресс, который повреждает микробную ДНК липидов и белков, что способствует антимикробной активности [24]. Удаление биопленки является одной из основных проблем предприятий по переработке молока, которые также можно решать используя для этих целей ЩЭВ. В исследовании Jiménez-Pichardo R. [et al.] установлено, что использование ЩЭВ значительно снижало образование биопленки на поверхностях из нержавеющей стали на молочных предприятиях [14]. Также Liu [et al.] использовали ЩЭВ для очистки доильных систем на месте, продемонстрировав его способность эффективно удалять биопленки и дезинфицировать оборудование в режиме реального времени, тем самым минимизируя риски заражения [10]. Помимо молочной отрасли ЩЭВ доказал свою эффективность в стерилизации поверхностей, контактирующих с пищевыми продуктами, и уничтожении патогенов в различных других секторах пищевой промышленности. Nakano Y. [et al.] продемонстрировали эффективность ЩЭВ по снижению количества патогенов на металлических поверхностях, используя двухэтапный метод очистки, включающий как щелочную, так и кислотную электролизованную воду [25, 26]. Thomasello [et al.] подтвердили способность ЩЭВ снижать уровень бактериального загрязнения на поверхностях, контактирующих с пищевыми продуктами в процессе переработки мяса [27], а авторы Huang H. [et al.] исследовали способность ЩЭВ разрушать биопленки *Listeria monocytogenes* с помощью протеомного анализа, который дает представление о молекулярных механизмах, ответственных за его эффективность в устранении патогенов [28]. В работе Nyamende N.E. [et al.] изучена эффективность обработки ЩЭВ (доза 50, 100, 200, 300, 400 и 500 мг/л-1) против *Botrytis cinerea* в яблоках. Результат показал, что обработка B. cinerea ЩЭВ привела к значительному уменьшению зон поражения по сравнению с контрольной группой. ЩЭВ концентрацией 200 мг л -1 была эффективна в ингибировании развития B. *cinerea* [29]. Также авторы Turantaş F. [et al.] установили значительное сокращение количества микроорганизмов во фруктах и овощах после промывки электролизованной водой [30]. Tan [et al.] показали, что комбинированная обработка слабощелочной электролизованной водой с фотодинамической инактивацией уничтожила биопленки смешанных видов [10]. Экологические преимущества использования ЩЭВ для малых и средних предприятий по переработке мяса представлены в исследовании Khalid N. [et al.], которые продемонстрировали его преимущества для малых и средних предприятий по переработке мяса [31]. Особо, в контексте глобальной пандемии, следует отметить исследование Suzuki [et al.], которые установили способность ЩЭВ нейтрализовать SARS-CoV-2 и другие вирусные патогены [32]. Эта антимикробная способность широкого спектра доказывает, что ЩЭВ эффективна не только для традиционных пищевых патогенов, но и для новых угроз безопасности пищевых продуктов, таких как вирусы, которые вызывают особую озабоченность в современных системах производства продуктов питания. В заключение следует отметить, что ЩЭВ является эффективным и универсальным обеззараживающим средством, способным дезактивиро-

вать поверхности, контактирующие с пищевыми продуктами, технологическое оборудование и сырье. Способность ЩЭВ дезактивировать широкий спектр патогенов, включая бактерии, вирусы и грибки, подтверждает ее эффективность по обеспечению безопасности пищевых продуктов во многих секторах пищевой промышленности.

Удаление остатков пестицидов и токсинов

Спрос на минимально обработанные и обладающие высокой пищевой ценностью продукты питания способствовал поиску эффективных и экологически безопасных средств для удаления остатков пестицидов и микотоксинов из пищевых продуктов. Использование ЩЭВ представляет собой высокоэффективную и экологически чистую альтернативу традиционным методам обработки на основе химических веществ за счет высокого pH, восстановительному потенциалу и образованию HClO в процессе электролиза. Благодаря этим свойствам ЩЭВ вызывает деградацию остатков пестицидов и других вредных токсинов, при этом не оказывая негативного влияния на качество пищевых продуктов [8, 33]. В ходе исследований доказана эффективность действия ЩЭВ по удалению остатков пестицидов для многих видов фруктов, овощей, мяса и пищевых масел [8, 10]. В исследовании авторов Calvo [et al.] и Liu [et al.] проводили сравнительный анализ эффективности ЩЭВ и диоксида хлора. Результаты показали, что ЩЭВ высокоэффективно снижает остатки пестицидов на различных продуктах, включая косточковые фрукты, капусту, брокколи, болгарский перец и яблоки [34, 35]. Данные исследования доказали, что, ЩЭВ не только эффективно удаляла остатки пестицидов, но и не оказывала негативного влияния на органолептические характеристики обрабатываемых продуктов. Следует отметить, что ЩЭВ также показала свою эффективность в удалении остатков пестицидов из более сложных пищевых матриц, таких как кумкват и коровий горох [36]. Установлено, что кроме остатков пестицидов ЩЭВ способна снизить уровень загрязнения микотоксинами, особенно афлатоксинами, которые являются токсичными метаболитами грибов, обычно встречающимися в зернах, орехах и специях [8, 12]. Zhou [et al.] продемонстрировали, что ЩЭВ эффективно разлагает афлатоксин B1 в образцах риса, способствуя повышению безопасности пищевых продуктов при хранении и обработке зерна [37]. Эффективность ЩЭВ в удалении остатков пестицидов и токсинов из пищевых продуктов в первую очередь объясняется его высоким pH и восстановительными свойствами. Значительные восстановительные свойства раствора обусловлены наличием гидроксид-ионов (OH^-), которые взаимодействуют с молекулами пестицидов, особенно с теми, которые имеют такие функциональные группы, как сложные эфиры, амиды и нитрилы. Это взаимодействие приводит к гидролитическому расщеплению и распаду остатков пестицидов, эффективно нейтрализуя вредные химические вещества, не изменяя качество или пищевую ценность обработанных пищевых продуктов [37]. Щелочная среда, создаваемая ЩЭВ, также способствует гидролизу некоторых токсинов, включая микотоксины, такие как афлатоксины. Высокий pH дестабилизирует химическую структуру этих токсинов, что приводит к их деградации. Афлатоксины, обычно встречающиеся в зернах, орехах и специях, эффективно расщепляются в щелочной среде, тем самым снижется их токсичность и повышается безопасность пищевых продуктов [38].

Применение ЩЭВ в процессах экстракции и повышению качества пищевых продуктов

Процессы экстракции

В сравнении с традиционными методами экстракции применение ЩЭВ в технологии экстрагирования и извлечения биологически активных соединений, белков и питательных веществ из сырья позволило значительно увеличить эффективность и выход экстрагируемого вещества. Воздействие высокого pH, низкого ОВП эффективно разрушает клеточные стенки и мембраны, способствуя высвобождению биоактивных соединений, белков и других питательных веществ из сырья, не нарушая их целостности. Высокий уровень pH ЩЭВ разрывает химические связи, способствуя высвобождению биоактивных молекул, обеспечивая более качественный и эффективный процесс экстракции. Этот процесс оптимизирует использование ресурсов, снижает производственные затраты и повышает рентабельность производства. Традиционные методы экстракции зачастую основаны на использовании агрессивных химических растворителей, которые могут быть вредны как для окружающей среды, так и для здоровья человека. При использовании ЩЭВ отсутствует необходимость в токсичных растворителях, процесс экологически безопасен, а отходы процесса экстракции не оказывают негативного влияния на окружающую среду, значительно сокращая экологический след процесса экстракции. По сравнению с другими нетермическими методами, такими как ультразвук, ЩЭВ обладает дополнительными преимуществами, такими как более низкое потребление энергии и отсутствие высокочастотных звуковых волн, которые могут потенциально повредить чувствительные соединения во время экстракции [10, 15]. Кроме того, способность ЩЭВ извлекать соединения без использования растворителей дает значительное преимущество с точки зрения устойчивости и безопасности [18]. Установлена эффективность применения ЩЭВ для извлечения белков и биоактивных соединений из различных источников, пищевого сырья. Так, например, Zhang J., [et al.] использовали ЩЭВ для извлечения ценных соединений из панцирей омаров [19], в то время как Li [et al.] применили его для улучшения извлечения биоактивных соединений из абрикосов. Результаты показали, что при условии одинакового pH (pH = 9,5) эффективность экстракции электролизованной воды изолята абрикосового белка была выше, чем у сверхчистой воды. Более того, абрикосовый белок, экстрагированный электролизованной водой, показал лучшую пенообразующую способность и стабильность эмульсии [18]. Экстракции с использованием ЩЭВ показана и в других исследованиях, которые подчеркивают способность ЩЭВ эффективно извлекать белки, полисахариды и другие биологически активные соединения, значительно увеличивая как выход, так и чистоту извлеченного материала [1, 10]. Дальнейшая оптимизация процессов экстракции на основе ЩЭВ привела к еще большей эффективности и расширенной функциональности. Например, Tan [et al.] использовали ЩЭВ в комплексе с ферментативной обработкой для извлечения белков из остатков чая, достигнув при этом превосходных показателей экстракции, более высокой растворимости и эмульгирующих свойств белковых изолятов [40]. Результаты исследований подтверждают потенциал ЩЭВ для повышения как количества, так и качества извлекаемых биоактивных соединений. Помимо увеличения выхода продуктов экстракции ЩЭВ улучшает функциональные свойства извлечен-

ных белков и биоактивных соединений. Использование ЩЭВ повышает растворимость, эмульгирующую способность, пенообразующую способность и антиоксидантную активность извлеченных соединений, которые затем могут быть включены в широкий спектр пищевых продуктов для улучшения текстуры, стабильности и пищевой ценности. Авторы Li [et al.] продемонстрировали, что экстракция белков антарктического криля с помощью ультразвука и ЩЭВ значительно улучшила их растворимость и эмульгирующую активность, которые являются критически важными характеристиками для их использования в пищевых продуктах [17]. Аналогичным образом Song [et al.] установили, что экстракция ЩЭВ улучшила свойства и антиоксидантную активность полисахаридов, полученных из грибов *Morchella,* которые ценятся за их пользу для здоровья [41]. Soquetta [et al.] наблюдали аналогичные результаты увеличения выхода и антиоксидантной активности при экстракции биоактивных соединений из кожуры *Citrus reticulata* [42]. В целом экстракция с использованием ЩЭВ имеет ряд преимуществ для пищевой промышленности: более высокий выход и эффективность экстракции, улучшенные функциональные свойства извлеченных соединений и устойчивый, экологически безопасный процесс.

Влияние ЩЭВ на качество пищевых продуктов

ЩЭВ является эффективным средством по обеспечению микробиологической стабильности и улучшению качества пищевых продуктов, включая мясо, овощи и фрукты, злаки и даже функциональные вещества. В таблице 1 представлен краткий обзор результатов исследования эффективности ЩЭВ по обеспечению качества пищевых продуктов.

Таблица 1 – Эффективность щелочной электролизованной воды (ЩЭВ) по обеспечению микробиологической стабильности и улучшении качества пищевых продуктов

Table 1 – Efficiency of alkaline electrified water (AEW) in ensuring microbiological stability and improving the quality of food products

Наименование пищевого сырья и продуктов	Параметры обработки	Эффективность обработки	Источник
Яблоки (плоды)	ЩЭВ pH: 10−11,5	ЩЭВ подавляла рост естественных микробов на поверхности яблок (*Staphylococcus epidermidis*, *S. capitis*, *Ochrobactrum soli* и *Aspergillus inuii*) во время хранения	[43]
Нарезанные яблоки	ЩЭВ и аскорбиновая кислота	Снижение активности ПФО примерно до 66 % при использовании отдельно и улучшение антиоксидантных свойств при сочетании с аскорбиновой кислотой	[10]
Зерно пшеницы	ЩЭВ, pH: 9,5	Скорость выведения микотоксина дезоксиниваленола составляет 61,60 %, после обработки наличие живых грибов не обнаружено	[44]
Нектарин	ЩЭВ	Сохранение цвета е цвета кожуры L^*, a^*, b^*, снижена частота потемнения ($h°$) и поверхностного распада по сравнению с обработанными хлором и контрольными фруктами	[45]
Свинина	ЩЭВ	Высокая антимикробная активность в сочетании с отсутствием повреждения белков	[46]
Колбаса вареная «Мартаделла»	ЩЭВ,pH: 11; УЗ-175 Вт, 20 мин	Подавление роста молочнокислых бактерий до 0,36 log КОЕ/г	[47]
Замороженные креветки	ЩЭВ pH: 10,5; УЗ -35 кГц	По сравнению с традиционными методами размораживания время размораживания сократилось на 48,9 %, сохранилась эластичность и целостность мышечных волокон	[48]
Филе белого амура	ЩЭВ	Подавление роста преобладающих бактерий, равномерная структура миофибриллярных белков способствует сохранению качества рыбы	[49]

Примечание : ПФО – полифенолоксидаза; УЗ – ультразвук

Использование ЩЭВ в мясной промышленности показала свою эффективность в улучшении стабильности эмульсии и удержания воды, которые являются критическими факторами качества мясных продуктов. Leães [et al.] комбинировали ЩЭВ с ультразвуковым методом для улучшения мясных эмульсий, в продуктах с пониженным содержанием хлорида натрия (NaCl) [47]. Это соответствует растущим предпочтениям потребителей в отношении продуктов здорового питания, а также улучшает качество и текстуру мясных продуктов. Athayde D.R. [et al.] установили, что обработка ЩЭВ не только снизила микробную нагрузку свинины, но и улучшила ее общее качество [46]. Аналогично в исследовании Shimamura [et al.] показано, что обработка ЩЭВ значительно снизила микробное загрязнение в курице и говядине, подтверждая ее стерилизующий эффект на мясные продукты. Это снижение микробной нагрузки имеет решающее значение для предотвращения порчи и обеспечения безопасности мясных продуктов по всей цепочке поставок [50]. Как уже показано в таблице 1, использование ЩЭВ эффективно для увеличения срока годности и качества рыбы и морепродуктов. Авторы Lin, Hung, and Deng показали, что обработка ЩЭВ эффективно заменила традиционные полифосфатные добавки в филе сома, сохранив текстуру и вкус филе, одновременно предотвратив рост микроорганизмов [51]. Сочетание ЩЭВ с ультразвуковой технологией повышает эффективность размораживания, способствуя равномерному распределению тепла и ускоряя процесс размораживания, а также снижая окислительное повреждение. Это инновационное применение демонстрирует потенциал ЩЭВ для повышения качества обработки замороженных морепродуктов и может служить альтернативой традиционным методам размораживания, которые часто приводят к ухудшению текстуры [10]. Результаты исследова-

ния Lin Y. [et al.] показали, что обработка ЩЭВ улучшила качество филе белого амура, сохранив структуру белка и предотвратив рост микроорганизмов, что в итоге продлило срок годности и сохранило качество продукта [49]. При обработке фруктов и овощей технология ЩЭВ продемонстрировала свою способность улучшать вкусовые характеристики, продлевать срок годности и действовать как мощный антимикробный агент [4, 8]. Nyamende N.E. установили, что яблоки, обработанные ЩЭВ, сохранили физико-химические свойства (твердость, цвет, консистенция), увеличение содержание полифенолов и флавоноидов и антиоксидантной активности. Кроме того, было достигнуто значительное снижение микробной нагрузки с 3-кратным снижением общего количества бактерий [43]. Сочетание ЩЭВ с современными упаковочными технологиями, такими как вакуумная упаковка или упаковка в модифицированной атмосфере, представляет собой перспективное направление для будущих исследований. Интеграция обработки ЩЭВ с современными способами упаковки будет служить увеличению срока годности и микробиологической стабильности.

Потенциальные возможности использования ЩЭВ в сельском хозяйстве

Результаты научных исследований показали, что ЩЭВ обладает потенциалом использования в сельском хозяйстве, так как способствует улучшению роста растений, положительно влияет на качество почвы, профилактике заболеваний и повышению урожайности. Краткий обзор представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Использование щелочной электролизованной (ЩЭВ) воды в сельскохозяйственном производстве

Table 2 – Use of alkaline electrolyzed water (AEW) in agricultural production

Наименование образца	Параметры обработки	Полученные результаты	Источник
Куркума	ЩЭВ (500 мг/л)	Полное подавление *Fusarium sp* ., вызывающее гниение корневища куркумы	[9]
Солод тритикале	ЩЭВ (pH: 8,59); КЭВ (pH: 5,32)	Значительное увеличение в солоде: активность α-амилазы, фитазы, кислой протеазы и липазы составила 0,11, 1,24 × 10^{-4}, 0,62 и 0,51 ед./мг белка соответственно)	[52]
Почва	ЩЭВ; КЭВ	По сравнению с КЭВ, ЩЭВ обеспечивает более стабильную регуляцию pH почвы, создавая среду, благоприятную для оптимального роста сельскохозяйственных культур	[53]
Томаты	ЩЭВ (pH: 11,5 ± 0,2)	Применение ЩЭВ эффективно для прорастания семян томатов и уничтожения личинок, не вызывая никаких побочных эффектов или негативных явлений	[54]
Шелковица	ЩЭВ	Опрыскивание растений шелковицы щелочной электролизованной водой повышает концентрацию общего количества органических кислот, ТА, антоцианов и витамина С, тем самым повышая их пищевую ценность	[55]
Брокколи	ЩЭВ (pH: 13,0 ± 0,5)	Полив с применением ЩЭВ оказывает эффективное мелиоративное действие на закисленные почвы, а также обеспечивает улучшенный контроль над порошистой паршой картофеля и ризоктониозом крестоцветных	[56]
Томаты	ЩЭВ	ЩЭВ эффективно борется с болезнями томатов и уничтожает мелких белокрылок, блокируя их устьица	[57]
Брокколи	ЩЭВ (pH: 13,5)	ЩЭВ эффективно удаляет остатки пестицидов, стимулируя рост овощей, но при этом она может снижать содержание витаминов	[10]

В процессе анализа результатов научных исследований использования ЩЭВ в сельском хозяйстве следует отметить, что основной клад принадлежит китайским ученым, в работах которых показано, что ЩЭВ положительно влияет на рост растений за счет усиления ферментативной активности во время прорастания растений. Например, Yu Z.-L. & Liu R. установили, что электролизованная вода стимулирует активность ферментов во время прорастания солода тритикале, поэтому справедливо предположить, что ЩЭВ может улучшить прорастание семян и раннее развитие растений, что особенно эффективно для устойчивого производства сельскохозяйственных культур [52]. Tian Q. [et al.] продемонстрировали, что ЩЭВ улучшает pH почвы и предотвращает заболевания томатов, что может использоваться как экологически безопасная технология для улучшения качества почвы, а также для здоровья растений [53]. Эта способность улучшать условия почвы, такие как pH и микробный баланс, имеет решающее значение для улучшения роста растений и оптимизации урожайности сельскохозяйственных культур. ЩЭВ также оказывает положительное влияние на пищевую ценность. L. Liu [et al.] показали, что ЩЭВ не только сохраняла шелковичные деревья от болезней, но и способствовала повышению пищевой ценности плодов, включая повышенные уровни антиоксидантов и витаминов. Результаты подтвердили, что предуборочное применение ЩЭВ повышает уровень витамина С в овощах, улучшая их пищевой профиль и способствует производству более здоровых продуктов питания [10, 55]. Эффективность использования ЩЭВ также было исследовано в животноводстве. Результаты показали, что слабокислая электролизованная вода (СКЭВ), используемая в качестве добавки к питьевой воде для кур-несушек, улучшает здоровье птицы и производство яиц [10, 58]. Добавление ЩЭВ в питьевую воду для животных оказывает положительное влияние на общее состояние здоровья, что приводит к повышению производительности и улучшению качества мяса и яиц [10]. Следует отметить исследования Петровой [и др.], которые изучили влияние электролизованной восстановленной воды на производительность уток, указав на ее потенциаль-

ные преимущества в водном птицеводстве [59]. Подводя итог, можно сказать, что ЩЭВ является перспективной технологией для применения в сельском хозяйстве и животноводстве, способствуя росту растений, улучшая качество почвы и контролируя заболевания, а также улучшая здоровье и продуктивность скота.

Влияние ЩЭВ на здоровье человека

Ряд результатов научных исследований, таких как исследования Xia [et al.], Kondo [et al.], Tanaka [et al.] показывают преимущества ЩЭВ для здоровья, позиционируя ее как эффективное функциональное средство с применением в различных аспектах здоровья человека [10, 20, 60]. ЩЭВ продемонстрировала потенциал для улучшения здоровья полости рта, улучшения желудочно-кишечной функции, поддержки здоровья сердечно-сосудистой системы, уменьшения воспаления и окислительного стресса. Эти преимущества приписываются уникальным биоактивным компонентам ЩЭВ, которые включают OH^-, ClO^-, HClO и растворенный кислород/водород, каждый из которых играет важную роль в модуляции здоровья. Одно из самых эффективных преимуществ ЩЭВ заключается в его свойствах, улучшающих здоровье полости рта. Kondo [et al.] установили, что полоскание ЩЭВ (15 мл в течение 30 дней) противодействует кислотности полости рта, эффективно поддерживая баланс pH во рту и потенциально снижая эрозию зубов [20]. Результаты данного исследования показали, что ЩЭВ можно эффективно использовать в качестве эффективного компонента для средств по уходу за зубами. Научные исследования показали, что ЩЭВ оказывает благотворное влияние на желудочно-кишечный тракт [61]. Участники эксперимента ежедневно принимали 500 мл ЩЭВ, в результате наблюдений было отмечено отсутствие желудочно-кишечных расстройств, таких как вздутие живота и несварение желудка. Результаты исследования подтверждают благотворное влияние антиоксидантной активности ЩЭВ на здоровье пищеварительной системы и микробиом кишечника [10, 61]. Weidman [et al.] показали, что ЩЭВ способствует улучшению кровотока и оказывает положительное влияние на сердечно-сосудистую систему [62]. В ходе четырехнедельного эксперимента участники ежедневно употребляли 500 мл щелочной воды с высоким pH (pH 9,5). Результаты показали значительное снижение вязкости крови и улучшение кровообращения, что позволяет предполагать об эффективности ЩЭВ [61]. Следует отметить исследования ученых Rias [et al.], которые установили, что прием ЩЭВ в сочетании с регулярной физической активностью, такой как ходьба, может уменьшить воспаление и окислительный стресс у пациентов с диабетом 2 типа [21]. Более того, ЩЭВ продемонстрировал защитное действие против повреждения печени. Результаты исследования Jackson [et al.] показали, что ЩЭВ обеспечивает защиту от неалкогольной жировой болезни печени (НАЖБП) мышей, которых кормили диетой с высоким содержанием жиров, что подтверждает потенциал ЩЭВ для смягчения прогрессирования НАЖБП, которая часто связана с нарушениями обмена веществ [62]. По сравнению с нейтральной водой ЩЭВ за счет низкого ОВП (от –600 до –900 мВ) проявляет значительно более высокую антиоксидантную активность [10]. Xia [et al.] исследовали ЩЭВ при различных уровнях ОВП и установили, что растворы с более низким ОВП проявляют более сильную антиоксидантную активность и кислотонейтрализующую способность. Эти растворы благотворно влияют на здоровье кишечника и общее состояние организма за счет снижения окислительного стресса и поддержание здорового уровня pH в организме. В совокупности все исследования показали, что ЩЭВ обладает свойствами, которые благоприятно влияют на здоровье организма. Способность ЩЭВ уменьшать воспаление, окислительный стресс и метаболическую дисфункцию может быть использована в медицинских целях, направленные на улучшение благополучия и профилактику хронических заболеваний.

Ограничения и проблемы применения ЩЭВ

1) Результаты исследований показали, что ЩЭВ обладает значительным потенциалом использования в различных областях пищевой промышленности, таких как извлечение, сохранение и функциональность. Вместе с тем, для максимального и широкомасштабного использования данного потенциала необходимо решить ряд проблем и ограничений. Существенным ограничением ЩЭВ является нестабильность раствора с течением времени. Дезинфицирующие и антимикробные свойства электролизованной воды ухудшаются по мере отстаивания раствора, что требует его свежего приготовления для оптимальной эффективности. Ограниченный срок хранения создает логистические проблемы для крупномасштабного промышленного использования, где поддержание постоянного запаса свежеприготовленного ЩЭВ будет трудоемким и экономически невыгодным. Вместе с тем сохранение свойств ЩЭВ может быть обеспечена при определенных условиях хранения, например, 4 ºС или ниже может замедлить деградацию и сохранить антимикробные и антиоксидантные свойства ЩЭВ. Также поддержание pH в щелочном диапазоне способствует стабильности, поэтому для хранения целесообразно использование герметичных контейнеров или герметичной среды, которые защитят от воздействия воздуха и света и соответственно от разрушения

2) Эффективность воздействия ЩЭВ значительно варьируется в зависимости от таких факторов, как тип пищевого продукта, концентрация раствора и конкретные условия, при которых она применяется. Пищевой состав обрабатываемого продукта, уровень pH и наличие других веществ в пищевой матрице могут оказывать влияние на антимикробные и консервирующие свойства ЩЭВ. Поэтому с целью определения и стандартизации оптимальных режимов обработки для различных пищевых продуктов.

3) Немаловажной проблемой является коррозионная природа ЩЭВ, в особенности, если среда является сильнощелочной. Раствор может быть агрессивным для технологического оборудования, контейнеров для хранения и труб, что приводит к повышенному износу. Эта коррозия может привести к более высоким расходам на техническое обслуживание и необходимости использования специализированных коррозионно-стойких материалов, что может значительно увеличить общую стоимость внедрения ЩЭВ на предприятиях по переработке пищевых продуктов. Поэтому одним из направлений исследований должна быть разработка и использование коррозионностойких материалов в системах ЩЭВ или поиск методов снижения коррозионной активности ЩЭВ при сохранении ее эффективности

4) Несмотря на то, что ЩЭВ принято считать безопасной, во многих странах и регионах отсутству-

ет нормативная база по широкому внедрению ЩЭВ в процесс обработки и консервирования пищевых продуктов, согласованная с органами здравоохранения и утвержденная на законодательном уровне. Например, в Соединенных Штатах FDA и EPA разработаны и утверждены руководящие документы по использованию электролизованной воды в качестве дезинфицирующего средства для поверхностей, контактирующих с пищевыми продуктами, а в ЕС установлены правила безопасности пищевых продуктов, которые должны гарантировать, что антимикробные свойства электролизованной воды безопасны для использования в процессе обработки пищевых продуктов [63]. Однако единых нормативных стандартов в странах и регионах нет. Кроме того, поскольку область биотехнологий быстро развивается, нормативные рамки часто отстают от технологических достижений. Для преодоления этих проблем решающее значение будут иметь комплексные оценки безопасности, исследования эффективности и гармонизация международных нормативных стандартов, позволяющие получить одобрение регулирующих органов и способствовать широкому использованию ЩЭВ в производстве продуктов питания.

Регулирующие органы различных стран должны сотрудничать для создания единых руководящих принципов, которые касаются безопасности, эффективности и маркировки пищевых продуктов, обработанных ЩЭВ. Опираясь на существующие стандарты безопасности пищевых продуктов, такие как установленные Комиссией Codex Alimentarius, возможны разработка и утверждение Свода основных правил для обеспечения качества и безопасности в любой стране мира. В качестве примера и основы вполне возможно использовать Стандарты Codex, которые признаны на международном уровне и регулируют правила безопасности пищевых продуктов. Содействие сотрудничеству между исследователями, заинтересованными сторонами в отрасли и регулирующими органами имеет важное значение для быстрой разработки и внедрения технологий ЩЭВ. Совместные усилия могут ускорить процесс устранения текущих ограничений и разработки практических решений для их внедрения. Партнерство между академическими кругами, промышленностью и государственными учреждениями может помочь объединить ресурсы и знания, что приведет к прорывам в исследованиях, производстве и одобрении регулирующих органов ЩЭВ. Сотрудничество также поможет преодолеть такие проблемы, как масштабирование производства, повышение эффективности и получение одобрения регулирующих органов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря высокому pH, окислительно-восстановительному потенциалу и эффективной проницаемости щелочная электролизованная вода (ЩЭВ) обладает значительным потенциалом и перспективой использования в производстве продуктов питания, здравоохранении и сельском хозяйстве. Использование ЩЭВ в качестве обеззараживающего средства позволяет эффективно дезинфицировать поверхности, удалить остатки пестицидов и токсины, снизить микробиологическую обсеменённость и обеспечить безопасность пищевых продуктов. Процессы экстракции с применением ЩЭВ позволяют значительно увеличить извлечение белков и биоактивных соединений, улучшая текстуру, вкус и удержание влаги в пище, способствуя повышению качества продукта и эффективности переработки. В качестве консерванта щелочная электролизная вода способствует увеличению срока годности скоропортящихся продуктов, сохраняя при этом пищевую ценность, органолептические показатели качества и снижая количество образования отходов и не оказывает значительного влияния на окружающую среду. Кроме того, ЩЭВ положительно влияет на здоровье человека, улучшая работу кишечника, кровообращение и гигиену полости рта, одновременно снижая окислительный стресс и воспаление, а использование ее в сельском хозяйстве благотворно влияет на pH почвы, повышает устойчивость к болезням сельскохозяйственных культур, увеличивает их урожайность. Вместе с тем, для широкого промышленного использования ЩЭВ в производстве продуктов питания существует ряд проблем и ограничений, такие как нестабильность раствора, возможность вызывать коррозию оборудования, отсутствие единой утвержденной законодательной базы по применению ЩЭВ в производстве пищевых продуктов. Будущие исследования должны быть направлены на обеспечение стабильности ЩЭВ, оптимизации производственных процессов и режимов обработки для конкретных пищевых продуктов. Необходимо обеспечить тесное сотрудничество с органами здравоохранения и регулирующими органами для установления четких руководящих принципов, разработке масштабируемых методов по применению ЩЭВ как отдельно, так и в комбинации с другими технологиями. Решение проблем и ограничений позволит максимально использовать потенциал ЩЭВ в сельском хозяйстве, переработке растительного сырья, экстракции, консервировании пищевых продуктов и способствовать созданию качественных, безопасных и минимально обработанных продуктов питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Burak L.Ch., Ermoshina T.V., Samankova N.V. Achieving sustainable development through the use of new food processing technologies // Fundamental research. 2024. No. 10. P. 171–179. (In. Russ.). https://doi.org/ 10.17513/fr.43705.

2. Khalid N.I., Sulaiman N.S., Ab Aziz N., Taip F.S., Nor-Khaizura M.A.R., Sobri S. & Abd Rahim M.H. Assessing the efficacy of electrolyzed water for sanitizing contaminated stainless-steel surfaces in the meat industry // Journal of Food Engineering. 2024. V. 382. p. 112199. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112199.

3. Wu T., Sakamoto M., Phacharapan S., Inoue N. & Kamitani Y. Antioxidant characteristic changes, sensory evaluation, processing and storage of functional water modified juice // Food Bioscience. 2023. V. 52. p. 102468. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102468.

4. Burak L.Ch. Influence of modern methods of processing and sterilization on the quality of fruit and vegetable raw materials and juice products // Moscow : Limited Liability Company "Scientific Publishing Center INFRA-M". 2025. P. 236. (In. Russ.). https://doi.org/10.12737/ 0.12737/2154991.

5. Brauns J. & Turek T. Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review // Processes. 2020. V. 8(2). p. 248. https://doi.org/10.3390/pr8020248.

6. Dash S., Singh A., Jose S., Elangovan D., Surapraraju S.K. & Natarajan S.K. Advances in green hydrogen production through alkaline water electrolysis: A comprehensive review // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. V. 83. pp. 614–629. https://doi.org/10.1016/ j.ijhydene.2024.08.157.

7. Rebezov M., Saeed K., Khaliq A., Rahman S.J.U., Sameed N., Semenova A., Khayrullin M., Dydykin A., Abramov, Y., Thiruvengadam, M., Shariati, M.A., Bangar, S.P. & Lorenzo, J.M. Application of electrolyzed water in the food industry: A review // Applied Sciences. 2022. V. 12(13). p. 6639. https://doi.org/10.3390/app12136639.

8. Burak L.Ch. Influence of electrolyzed water on the quality and safety of fruit and vegetable raw materials // Scientific review. Biological sciences. 2024. No. 3. P. 59–70. (In. Russ.). https://doi.org/10.17513/srbs.1375.

9. Keatsirirote S., Chuajedton A., Uthaibutra J. & Whangchai K. Biorefinery-driven approach to managing Fusarium sp. causing agent rhizome rot in turmeric using electrolyzed water // Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. V. 14. pp. 22805–22813. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04243-4.

10. Du Y., Tian Q., Kuang X., Deng Y., Jiang Y., Yi J. Advanced application of alkaline/basic electrolyzed water in the food and agriculture industry as cleaning, processing, preserving, and functional agents // Compr Rev Food Sci Food Saf. 2025. V. 24(2). e70129. https://doi.org/10.1111/1541-4337.70129.

11. Leães Y.S.V., Pinton M.B., de Aguiar Rosa C.T., Robalo S.S., Wagner R., de Menezes, C.R. Smanioto Barin J., Cezar Bastianello Campagno, P. & Cichoski A.J. Ultrasound and basic electrolyzed water: A green approach to reduce the technological defects caused by NaCl reduction in meat emulsions // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. V. 61. p. 104830. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104830.

12. Villarreal-Barajas T., Vázquez-Durán A. & Méndez-Albores A. Effectiveness of electrolyzed oxidizing water on fungi and mycotoxins in food // Food Control. 2022. V. 131. p. 108454. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108454.

13. Ampiaw R.E., Yaqub M. & Lee W. Electrolyzed water as a disinfectant: a systematic review of factors affecting the production and efficiency of hypochlorous acid // Journal of Water Process Engineering. 2021. V. 43. p. 102228. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102228.

14. Jiménez-Pichardo R., Hernández-Martínez I., Regalado-González C., Santos-Cruz J., Meas-Vong Y., Wacher-Rodarte M.D.C., Carrillo-Reyes J., Sánchez-Ortega I. & García-Almendárez B.E. Innovative control of biofilms on stainless steel surfaces using electrolyzed water in the dairy industry // Foods. 2021. V. 10(1). p. 103. https://doi.org/10.3390/foods10010103.

15. Tan L., Zhao Y., Li Y., Peng Z., He T., Liu Y., Zeng Q. & Wang J.J. Potent eradication of mixed-species biofilms using photodynamic inactivation coupled with slightly alkaline electrolyzed water // Lwt. 2022. V. 155. p. 112958. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112958.

16. Li Y., Wang J., Tan L., Zeng S., Liu F. & Zhao Y. Research Progress on Properties of Basic Electrolyzed Water and Its Application in Food // Chinese Institute of Food Science & Technology. 2023. V. 12. pp. 421–432. https://10.16429/j.1009-7848.2023.12.041. (in Chinese with English abstract).

17. Li Y., Zeng Q.-H., Liu G., Peng Z., Wang Y., Zhu Y., Liu H., Zhao Y. & Jing Wang J. Effects of ultrasound-assisted basic electrolyzed water (BEW) extraction on structural and functional properties of Antarctic krill (Euphausia superba) proteins // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. V. 71. p. 105364. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105364.

18. Li Z.-H., Zhou B., Li X.-T. & Li S.-G. Effect of alkaline electrolyzed water on physicochemical and structural properties of apricot protein isolate // Food Science and Biotechnology. 2019. V. 28. pp. 15–23. https://doi.org/10.1007/s10068-018-0439-5.

19. Zhang J., Wang X., Sun Y., Gong J., Sang Y. & Sun J. Application of electrolyzed water in demineralization and protein removal from crayfish shells // Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology. 2021. V. 21(01). pp. 157–165. https://doi.org/10.16429/j.1009-7848.2021.01.019.

20. Kondo K., Kanenaga R., Tanaka Y., Hotta K. & Arakawa S. The neutralizing effect of mouth rinsing with alkaline electrolyzed water on different regions of the oral cavity acidified by acidic beverages // Journal of Oral Science. 2022. V. 64(1). pp. 17–21. https://doi.org/10.2334/josnusd.21-0262.

21. Rias Y.A., Kurniawan A.L., Chang C.W., Gordon C.J. & Tsai H.T. Synergistic effects of regular walking and alkaline electrolyzed water on decreasing inflammation and oxidative stress, and increasing quality of life in individuals with type 2 diabetes: A community based randomized controlled trial // Antioxidants. 2020. V. 9(10). p 946. https://doi.org/10.3390/antiox9100946.

22. Ramírez Orejel J.C. & Cano-Buendía J.A. Applications of electrolyzed water as a sanitizer in the food and animal-by products industry // Processes. 2020. V. 8(5). p. 534. https://doi.org/10.3390/pr8050534.

23. Tango C.N., Hussain M.S. & Oh D.-H. Application of electrolyzed water on environment sterilization // Electrolyzed Water in Food: Fundamentals and Applications. 2019. p. 177–204. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-3807-6_7.

24. Jiménez-Pichardo R., Regalado C., Castaño-Tostado E., Meas-Vong Y., Santos-Cruz J. & García-Almendárez B.E. Evaluation of electrolyzed water as cleaning and disinfection agent on stainless steel as a model surface in the dairy industry // Food Control. 2016. V. 60. pp. 320–328. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.08.011.

25. Nakano Y., Akamatsu N., Mori T., Sano K., Satoh K., Nagayasu T., Miyoshi Y., Sugio T., Sakai H., Sakae E., Ichimiya K. & Sakae E. Sequential washing with electrolyzed alkaline and acidic water effectively removes pathogens from metal surfaces // Plos One, 2016. V. 11(5). e0156058. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156058.

26. Fukuda A., Tominaga T., Matsumoto T. [et al.]. Feasibility and efficacy of newly developed eco-friendly, automatic washer for endoscope using electrolyzed alkaline and acidic water // Asian J. Endosc Surg. 2024. V. 17(1). e13245. doi: 10.1111/ases.13245.

27. Tomasello F., Pollesel M., Mondo E., Savini F., Scarpellini R., Giacometti F., Lorito L., Tassinari M., Cuomo S., Piva S. & Serraino A. Effectiveness of alkaline electrolyzed water in reducing bacterial load on surfaces intended to come into contact with food // Italian Journal of Food Safety. 2021. V. 10. https://doi.org/10.4081/ijfs.2021.9988.

28. Huang H., HeJ., Gao X., Lei J., Zhang Y., Wang Y., Liu X. & Hao J. Mechanism of acid and alkali electrolyzed water on the elimination of Listeria monocytogenes biofilm based on proteomic analysis // Journal of Proteomics. 2023. V. 286. p. 104952. https://doi.org/10.1016/j.jprot.2023.104952.

29. Nyamende N.E., Domtchouang F.R., Belay Z.A., Zanephyn K., Ayodeji O., Oluwafemi C.J. Alternative post-harvest pre-treatment strategies for quality and microbial safety of 'granny smith' apple // Heliyon. 2021. Vol. 7. № e07104. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07104.

30. Turantaş F., Ersus-Bilek S., Sömek Ö. & Kuşçu A. Decontamination effect of electrolyzed water washing on fruits and vegetables // The Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences. 2018. V. 7(4). p. 337. https://doi.org/10.15414/jmbfs.2018.7.4.337-342.

31. Khalid N., Ab Aziz N., Thani N., Shapi'ia R. & Abd Rahmana N.F. Electrolyzed water as a sustainable cleaning and disinfection chemical for SMEs Malaysian meat processing food industries: Challenges and uncertainties // Journal of Agricultural and Food Engineering Research. 2020. V. 1(6). pp. 1–2. https://doi.org/10.37865/jafe.2020.0006.

32. Suzuki Y., Hishiki T., Emi A., Sakaguchi S., Itamura R., Yamamoto R., Matsuzawa T., Shimotohno K., Mizokami M., Nakano T. & Yamamoto N. Strong alkaline electrolyzed water efficiently inactivates SARS-CoV-2, other viruses, and Gram-negative bacteria // Biochemical and

Biophysical Research Communications. 2021. V. 575. pp. 36–41. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2021.08.048.

33. Yang J., Song L., Pan C., Han Y. & Kang L. Removal of ten pesticide residues on/in kumquat by washing with alkaline electrolysed water // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2022. V. 102(15). pp. 3638–3651. https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1772775.

34. Calvo H., Redondo D., Remón S., Venturini M.E. & Arias E. Efficacy of electrolyzed water, chlorine dioxide and photocatalysis for disinfection and removal of pesticide residues from stone fruit // Postharvest Biology and Technology. 2019. V. 148. pp. 22–31. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.10.009.

35. Liu Y., Wang J., Zhu X., Liu Y., Cheng M., Xing W., Wan Y., Li, N., Yang L. & Song P. Effects of electrolyzed water treatment on pesticide removal and texture quality in fresh-cut cabbage, broccoli, and color pepper // Food Chemistry. 2021. V. 353. p. 129408. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129408.

36. Han Y., Song L., An Q. & Pan C.Removal of six pesticide residues in cowpea with alkaline electrolysed water // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2017. V. 97(8). pp. 2333–2338. https://doi.org/10.1002/jsfa.8043.

37. Zhou D.-R., Xu L. & Pan G.-D. Removal function of aflatoxin B_1 from rice samples by alkaline electrolytic water // Journal of Food Safety and Quality. 2019. V. 10(20). pp. 6957–6962. https://doi.org/10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2019.20.039.

38. Burak L.Ch. The use of modern processing technologies to increase the shelf life of fruits and vegetables. Review of the subject field // Polzunovsky Bulletin. 2024. No. 1. P. 99–119. (In. Russ.). https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013.

39. Wang J.J., He T., Li H., Dong H., Liu Y., Zeng Q. & Zhao Y. Enhancement of riboflavin-mediated photodynamic inactivation against Salmonella on tuna fillets coupled with slightly basic electrolyzed water // Food Control. 2024. V. 162. p. 110441. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110441.

40. Tan X.-Y., Sun J.-S., Ning H.-J., Pei H.-S., Zeng W.-H., Hu J. & Zhang X.-Q. Optimization of extraction process of protein from exhausted tea by alkaline electrolyzed-reducing water synergized with protease // Science and Technology of Food Industry. 2018. V. 39(15). pp. 213–218+227. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.15.038. (in Chinese with English abstract).

41. Song G., Deng L., Zhao Y., Zeng Y., Liu J. & Zhong G. Effects of alkaline water extraction on the properties and antioxidant activity of Morchella polysaccharides // Food and Fermentation Industries. 2023. V. 49(22). pp. 208–214. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033411. (in Chinese with English abstract).

42. Soquetta M.B., Tonato D., Quadros M.M., Boeira C.P., Cichoski A.J., de Marsillac Terra L. & Kuhn R.C. Ultrasound extraction of bioactive compounds from Citrus reticulata peel using electrolyzed water // Journal of Food Processing and Preservation. 2019. V. 43(12). e14236. https://doi.org/10.1111/jfpp.14236.

43. Nyamende N.E., Hoff J.W., van Brede V., Belay Z.A., Oyenihi A.B. & Caleb O.J. Isolation and characterization culturable microbes on the surface of 'Granny Smith' apples treated with electrolyzed water during cold storage // Food Science and Biotechnology. 2022. V. 31(12). pp. 1603–1614. https://doi.org/10.1007/s10068-022-01148-2.

44. Lyu F., Gao F., Zhou X., Zhang J. & Ding Y. Using acid and alkaline electrolyzed water to reduce deoxynivalenol and mycological contaminations in wheat grains // Food Control. 2018. V. 88. pp. 98–104. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.12.036.

45. Belay Z.A., Botes W. & Caleb O.J. Effects of alkaline electrolyzed water pretreatment on the physicochemical quality attributes of fresh nectarine during storage // Journal of Food Processing and Preservation. 2021. V. 45(10). e15879. https://doi.org/10.1111/jfpp.15879.

46. Athayde D.R., Flores D.R.M., da Silva J.S., Genro A.L.G., Silva M.S., Klein B., Mello R., Campagnol P.C.B., Wagner R., de Menezes C.R., Barin J.S. & de Menezes C.R. Application of electrolyzed water for improving pork meat quality // Food Research International. 2017. V. 100. pp. 757–763. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.08.009.

47. Leães Y.S.V., Silva J.S., Robalo S.S., Pinton M.B., dos Santos S.P., Wagner R., Brasil C.C.B., de Menezes C.R., Barin, J.S., Campagnol P.C.B. & Cichoski A.J. Combined effect of ultrasound and basic electrolyzed water on the microbiological and oxidative profile of low-sodium mortadellas // International Journal of Food Microbiology. 2021. V. 353. p. 109310. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109310.

48. Li Y., Wang J., Zeng Q.-H., Wang L., Wang J.J., Li S., Zhu J. & Zeng X.-A. Novel thawing method of ultrasound-assisted slightly basic electrolyzed water improves the processing quality of frozen shrimp compared with traditional thawing approaches // Ultrasonics Sonochemistry. 2024. V. 107. p. 106931. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106931.

49. Lin Y., Liang S., Liu W., Jiao W., Zhang Y. & Yu Y. Effect of alkaline ionised water on grass carp fillets: Insight into physicochemical, microbial composition and miofibrillar proteins // International Journal of Food Science & Technology. 2023. V. 58(10). pp. 5366–5375. https://doi.org/10.1111/ijfs.16653.

50. Shimamura Y., Shinke M., Hiraishi M., Tsuchiya Y. & Masuda S. The application of alkaline and acidic electrolyzed water in the sterilization of chicken breasts and beef liver // Food Science & Nutrition. 2016. V. 4(3). pp. 431–440. https://doi.org/10.1002/fsn3.305.

51. Lin H.-M., Hung Y.-C. & Deng S.-G. Effect of partial replacement of polyphosphate with alkaline electrolyzed water (AEW) on the quality of catfish fillets // Food Control. 2020. V. 112. p. 107117. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107117.

52. Yu Z.-L. & Liu R. Effect of electrolyzed water on enzyme activities of triticale malt during germination // Journal of Food Science and Technology. 2019. V. 56. pp. 1495–1501. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03637-5.

53. Tian Q., Xiao W., Han Q., Kudakwashe Z.O., & Mai D.T. Electrolytic water or alkaline electrolytic water on pH value of cultivated soil // Journal of Changjiang Vegetables. 2023. V.00(22). pp. 21–23. (in Chinese with English abstract).

54. Yi C. & Xiao W. Study on control effect of soybean oil emulsified by alkaline electrolyzed water on tomato diseases // Journal of Changjiang Vegetables. 2023. V. 00(14). pp. 16–18. (in Chinese with English abstract).

55. Liu L., Zheng D., Ke H., Ren J. & Li Q. Effect of alkaline electrolyzed water application on the nutritional quality of mulberries // Sichuan Sericulture. 2023. V. 51(02). pp. 39–40. https://doi.org/10.13886/j.cnki.sccy.2023.02.008. (in Chinese with English abstract).

56. Zhang J., Xiao W., Zhu P., Huang S., Yi C. & Liu W. Efficacy of alkaline electrolyzed water in the control of rhizoctonia in broccoli // Journal of Changjiang Vegetables. 2021. V. 00(24). pp. 22–23. (in Chinese with English abstract).

57. Huang S., Xiao W., Zhang J. & Fan W. Effective measures on controlling tomato leaf mold in early spring by using agriculture technology system of electrolytic water // Journal of Changjiang Vegetables. 2021. V. 00(18). pp. 27–28. (in Chinese with English abstract).

58. Li J., Wang Y., Zheng W., Xia T., Kong X., Yuan Z., Niu B., Wei G. & Li B. Comprehensive evaluation of treating drinking water for laying hens using slightly acidic electrolyzed water // Poultry Science. 2024. V. 103(1). p. 103176. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103176.

59. Petrova T., Kurtenkov A., Shindarska Z., Radanski S. & Ivanov S. Study of the effect of electrolyzed reduced water (catholyte) on the indices productivity of ducks // Tradition and Modernity in Veterinary Medicine. 2023. V. 7(2). pp. 57–63. https://doi.org/10.5281/ zenodo.7705178.

60. Xia R., Zhong G., Li, T., Yang W. & Gao Y. Study on physicochemical properties, antioxidant and relieve hyperchlorhydria of alkaline electrolyzed water with different negative ORP value // Fundamental Research. 2022. V. 38(3). pp. 1–7. https://doi.org/10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90017. (in Chinese with English abstract).

61. Tanaka Y., Saihara Y., Izumotani K., & Nakamura H. Daily ingestion of alkaline electrolyzed water containing hydrogen influences human health, including gastrointestinal symptoms // Medical Gas Research. 2018. V. 8(4). pp. 160–166. https://doi.org/10.4103/2045-9912.248267.

62. Weidman J., Holsworth Jr.R.E., Brossman B., Cho D.J., St Cyr J. & Fridman G. Effect of electrolyzed high-pH alkaline water on blood viscosity in healthy adults // Journal of the International Society of Sports Nutrition. 2016. V. 13(1). p. 45. https://doi.org/10.1186/s12970-016-0153-8.

63. Burak L.Ch. Modern methods of processing and preserving fruit and vegetable raw materials // St. Petersburg: Lan. 2024. 488 p. (In Russ). ISBN 978-5-507-48119-4.

Информация об авторах

Л. Ч. Бурак – доктор философии в области пищевых наук, кандидат технических наук, профессор РАЕ, директор Общества с ограниченной ответственностью «Белросакава».

Information about the authors

L.Ch. Burak - Doctor of Philosophy in the field of food sciences, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Natural Sciences, Director of the Limited Liability Company "Belrosakava".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 32–38.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 32–38.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.1.055
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.004 EDN: VLNGRH

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ УТФЕЛЯ I КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ СИЛОВОМ ПОЛЕ

Анатолий Анатольевич Славянский [1], Вера Анатольевна Грибкова [2], Дарья Петровна Митрошина [3], Наталья Валерьевна Николаева [4]

[1, 2, 3, 4] Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ), Москва, Россия
[1] mgutu-sahar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0262-8841
[2] vera_gribkova@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-5079-8132
[3] d_mitr96@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8724-3368
[4] nata_nik@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-4349-1287

Аннотация. *В структуре АПК Российской Федерации сахарная промышленность занимает важное место. Ее продукцию (белый сахар) относят к социально значимым углеводам, и она является составной частью ежедневного рациона питания населения России. К наиболее эффективным и значимым в обеспечении выхода, качества и безопасности белого сахара относят завершающие технологические операции сахарного производства. В большей степени это касается вопросов образования и наращивания кристаллов сахара при уваривании утфелей I ступени кристаллизации (суспензия из кристаллов сахара и межкристального раствора), а также проблем их выделения из межкристального раствора в центробежном силовом поле. Отделение сахарозы в виде кристаллов из утфельных масс I ступени кристаллизации осуществляют в автоматизированных фильтрующих центрифугах периодического действия. В соответствии с результатами проведенных экспериментов разработан эффективный способ разделения утфеля I кристаллизации в режиме «гибкой» временной программы цикла его центрифугирования и устройство для его реализации. В основу системы управления процессом центрифугирования по «гибкой» временной программе положен принцип определения момента отделения межкристального раствора по величине его ударного воздействия на чувствительный элемент соответствующего устройства. При этом в режиме «гибкого» центрифугирования разработанный способ предусматривает комбинированное промывание кристаллов сахара сначала насыщенным сахаросодержащим раствором (второй оттек), а затем горячей водой с добавлением в нее перекиси водорода. Реализация способа повышает выход сахара из центрифуг на 2,2 % к массе утфеля, уменьшает время цикла разделения утфеля примерно на 10–20 % и обеспечивает более высокие качественные показатели готовой продукции.*

Ключевые слова: *белый сахар, утфель I кристаллизации, чувствительный элемент, пневмосиловой преобразователь, «гибкое» центрифугирование, поровое пространство слоя сахара, капилляр, закожушное пространство центрифуги, перекись водорода.*

Для цитирования: Повышение эффективности разделения утфеля I кристаллизации в центробежном силовом поле / А. А. Славянский [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 32–38. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.004. EDN: https://elibrary.ru/VLNGRH.

Original article

INCREASING EFFICIENCY OF MASSFEED SEPARATION AND CRYSTALLIZATION IN A CENTRIFUGAL FORCE FIELD

Anatoliy A. Slavyanskiy [1], Vera A. Gribkova [2], Daria P. Mitroshina [3], Natalia V. Nikolaeva [4]

[1, 2, 3, 4] Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University), Moscow, Russia
[1] mgutu-sahar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0262-8841
[2] vera_gribkova@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-5079-8132
[3] d_mitr96@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8724-3368
[4] nata_nik@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-4349-1287

Abstract. *The sugar industry occupies an important place in the structure of the agro-industrial complex of the Russian Federation. Its products (white sugar) are classified as socially significant carbohydrates and are an integral part of the daily diet of the population of Russia. The final technological operations of sugar production are considered the most effective and significant in ensuring the yield, quality and safety of white sugar. To a greater extent, this con-*

© Славянский А. А., Грибкова В. А., Митрошина Д. П., Николаева Н. В., 2026

cerns the issues of formation and growth of sugar crystals during boiling of the massecuite of the first crystallization stage (suspension of sugar crystals and intercrystalline solution), as well as problems of their separation from the intercrystalline solution in a centrifugal force field. Separation of sucrose in the form of crystals from the massecuite masses of the first crystallization stage is carried out in automated filtering centrifuges of periodic action. In accordance with the results of the experiments, an effective method for separating the massecuite of the first crystallization in the mode of a "flexible" time program of its centrifugation cycle and a device for its implementation have been developed. The control system for the centrifugation process according to the "flexible" time program is based on the principle of determining the moment of separation of the intercrystal solution by the magnitude of its impact on the sensitive element of the corresponding device. In this case, in the "flexible" centrifugation mode, the developed method provides for combined washing of sugar crystals first with a saturated sugar-containing solution (second runoff), and then with hot water with the addition of hydrogen peroxide. The implementation of the method increases the sugar yield from centrifuges by 2,2 % of the massecuite weight, reduces the massecuite separation cycle time by approximately 10-20 % and ensures higher quality indicators of the finished product.

Keywords: *white sugar, massecuite of the first crystallization, sensitive element, pneumatic power transducer, "flexible" centrifugation, pore space of the sugar layer, capillary, behind-the-shell space of the centrifuge, hydrogen peroxide.*

For citation: Slavyanskiy, A. A., Gribkova, V. A., Mitroshina, D. P. & Nikolaeva, N. V. (2026). Increasing the efficiency of massfeed separation and crystallization in a centrifugal force field. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 32-38. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.004. EDN: https: //elibrary.ru/VLNGRH.

ВВЕДЕНИЕ

Пищевая промышленность России в последние годы претерпела существенные технические и технологические масштабные изменения как в плане совершенствования ее определяющих процессов, так и повышения производственной мощности самих предприятий отрасли [1, 2, 9]. В современных сложных рыночных условиях непрерывное развитие техники и технологий при переработке сырья растительного происхождения, в том числе и длительного хранения, а также готовой продукции, обуславливает появление разнообразных, требующих скорейшего и компетентного решения научно-технических задач [3, 4, 7]. В настоящее время в России заметно вырос интерес к проблематике здорового питания как к одному из важнейших факторов повышения уровня жизни населения. Современная концепция управления качеством и безопасностью пищевой продукции базируется на том, что их контроль должен осуществляться именно в ходе производственного процесса, а не по его завершению. Исходя из этого, производственному контролю как хорошо выстроенной и отлаженной системе внутри предприятия отводится определяющая роль в обеспечении качества и безопасности пищевой продукции [5, 8, 13].

Продовольственная независимость России по сахару уже в 2021 г достигла 100 %, превысив ее пороговое значение в 90 % [1]. В настоящее время свеклосахарные заводы России вырабатывают белый сахар, который подразделяют на четыре категории в зависимости от требований к их качеству: Экстра, ТС1, ТС2 и ТС3 [6, 16].

Следует отметить, что сахар относится к немногочисленной группе пищевых продуктов, при производстве которых достигается высокая степень чистоты [28]. О качестве белого сахара судят по совокупности ряда органолептических, физико-химических, микробиологических, гигиенических требований с учетом показателей его безопасности. Считается, что ключевыми процессами сахарных заводов отрасли, непосредственно влияющих на выход, безопасность, органолептические и физико-химические свойства товарного белого сахара, являются такие процессы, как уваривание и центрифугирование утфеля I кристаллизации [14, 24, 25]. Именно в ходе этих процессов белый сахар приобретает кристаллическую форму, ставшую уже давно привычной, в том числе и для населения России.

Процесс центрифугирования представляет собой один из эффективных методов механического разделения суспензий на твердую и жидкую фазы и находит широкое применение в пищевой промышленности, а также в ряде смежных отраслей [12, 30]. Утфель, образующийся в процессе кристаллизации сахарозы под разрежением, относится к данному типу дисперсных систем и представляет собой двухфазную суспензию, состоящую из кристаллов сахара (твердая фаза) и межкристального раствора (жидкая фаза). Максимальная массовая доля твердых частиц (кристаллов) в утфеле I кристаллизации варьируется в количестве от 50 до 56 % [26]. На рисунке 1 показана структура его слоя на фильтрующей поверхности ротора центрифуги.

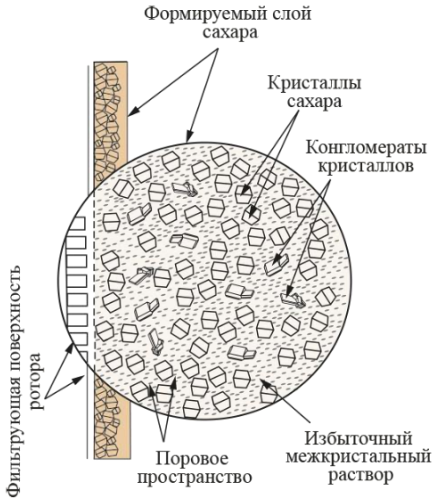


Рисунок 1 – Схема распределения утфельной массы на фильтрующей поверхности ротора центрифуги в момент ее загрузки

Figure 1 – Scheme of massecuite distribution on the filter surface of the centrifuge rotor at the moment of its loading

При этом в состав утфельной массы кроме кристаллов сахарозы могут входить кристаллообразования из двух и более кристаллов (конгломераты) [10, 27]. Они появляются в результате срастания двух и более кристаллов сахара при неблагоприятных условиях формирования их затравочных центров или в

процессе их роста в увариваемом утфеле. Наличие конгломератов ухудшает фильтрацию межкристального раствора при разделении утфеля в центробежном силовом поле и промывание кристаллов сахарозы при удалении из слоя сахара остатков его оттеков. Кроме этого, их наличие способствует снижению качественных показателей готовой продукции, отрицательно воздействует наоднородность и чистоту кристаллов сахара и др.

Работа центрифуг на утфеле I кристаллизации осуществляется циклично. Использование с этой целью центрифуг непрерывного действия не обеспечивает качество белого сахара в соответствии с требованиями ГОСТ 33222-2015. Каждый отдельный цикл, например центрифуг марки ФПН 1251Т- 01, включает в себя следующие операции [14, 15, 17]: пуск центрифуги в ход и загрузка утфеля; отделение межкристального раствора (первого оттека); промывание кристаллов сахара с отделением второго оттека; подсушка кристаллов сахара в центробежном силовом поле; торможение центрифуги; выгрузка сахара из центрифуги для завершающего высушивания до требуемой влажности [11, 22].

В ходе проведенных исследований особое внимание было обращено не только на организацию процесса и основные операции цикла центрифугирования утфеля I кристаллизации, но и на особенности его подготовки к разделению в центробежном силовом поле. В частности, это касается механизма разделения первого и второго оттеков из утфелей первого продукта, например, различающихся своим гранулометрическим составом. Помимо этого, немаловажным оказалась подготовка и отработка технологических условий для разделения оттеков в центробежном силовом поле. На основе проведенных в этом направлении исследований уточнены условия повышения эффективности центрифугирования утфеля I кристаллизации. При этом особое внимание было обращено на его возможность разделения в режиме «гибкого» центрифугирования [15].

МЕТОДЫ

Объектом исследования является как способ, так и устройство для организации работы центрифуги по «гибкой» временной программе цикла разделения утфеля, а методом исследования – контроль и управление процессом разделения утфеля на основе непрерывного измерения ударной силы отделяемых оттеков.

Устройство для регулирования работы центрифуг по «гибкой» временной программе устанавливается в верхней части кожуха центрифуги (рисунок 2). Оно включает в себя: чувствительный элемент 6, воспринимающий механическое воздействие отделяемого оттека; пневмосиловой преобразователь 5, трансформирующий его в стандартный выходной сигнал и обеспечивающий его подачу через электроконтактный манометр 8 на блок их управления в автоматическом режиме.

Работа пневмосилового преобразователя 5 регулируется подводом сжатого воздуха через фильтр-редуктор 4.

Расход сжатого воздуха для питания пневмосилового преобразователя составляет не более 3 л/мин при давлении питания 0,14 МПа подаваемого от коллектора сжатого воздуха центрифуг. Механическое воздействие, фиксируемое чувствительным элементом 6, пропорционально только скорости центробежного фильтрования, так как остальные параметры данного процесса остаются постоянными при разделении утфеля. Поэтому независимо от технологических свойств утфеля по величине измеряемого усилия его оттеков чувствительным элементом можно оперативно контролировать момент их отделения и управлять основными операциями цикла работы центрифуг [23].

Конструкция чувствительного элемента устройства «гибкого» центрифугирования показана на рисунке 2, *а*. Он имеет вид плоской пластины 11, закрепленной на вертикальном валу 10 в игольчатых опорах 12 по его вертикали. В верхней части вала 10 предусмотрен рычаг 9, для передачи ударного воздействия отделяемого оттека с пластины чувствительного элемента 11 на пневмосиловой преобразователь 5. Данное устройство закрепляют в верхней части центрифуги между ротором и кожухом (закожушное пространство). Такая установка устройства исключает возможное его повреждение в случае отклонения вращающегося ротора от своей вертикальной оси.

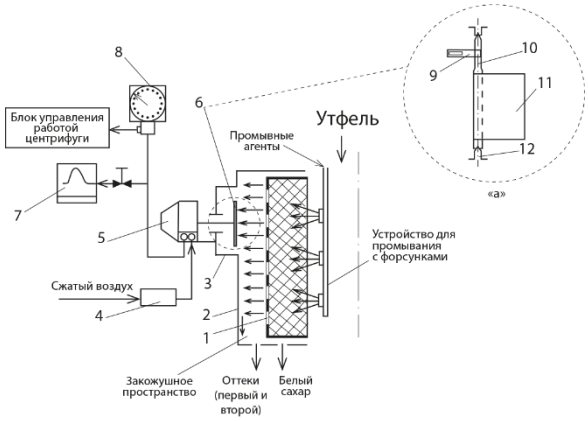


Рисунок 2 – Устройство для работы центрифуг по «гибкой» временной программе их цикла: *1 – перфорированная поверхность барабана ротора; 2 – кожух центрифуги; 3 – защитный корпус чувствительного элемента устройства; 4 – фильтр-редуктор сжатого воздуха; 5 – пневмосиловой преобразователь; 6 – чувствительный элемент; 7 – регистрирующий прибор; 8 – электроконтактный манометр*

Figure 2 – Device for Operating Centrifuges under a "Flexible" Time Program: *1 – Perforated surface of the rotor drum; 2 – Centrifuge housing; 3 – Mounting body for the sensor element; 4 – Compressed air filter-reducer; 5 – Pneumatic power converter; 6 – Sensor element; 7 – Recording instrument; 8 – Electro-contact pressure gauge*

Корпус самого устройства 3 (рисунок 2) с установкой в нем чувствительного элемента 6 монтируют на верхней внешней стороне кожуха центрифуги 2. С этой целью в кожухе центрифуги вырезают квадратное отверстие по размерам пластины чувствительного элемента 6. Для снижения скоростного давления воздушной среды на чувствительный элемент с обеих его сторон могут быть закреплены пластины, препятствующие попаданию на его поверхность межкристального раствора с внутренней поверхности кожуха, что повышает его чувствительность. Поэтому их установка может повысить достоверность и стабильность результатов работы центрифуг.

Чувствительный элемент может иметь любой вид, но оптимальной считается форма прямоугольника. Величину ударной силы отделяемого межкристального раствора в виде первого оттека на чувствительный элемент устройства для «гибкого» центрифугирования измеряют непрерывно. По завершении отделения первого оттека срабатывает исполнитель-

ный механизм блока управления для подачи промывных агентов (сахаросодержащий раствор, горячая вода). Отделяемый при этом оттек называют вторым, и он так же, как и первый, воздействует на чувствительный элемент устройства и им же фиксируется. По окончании отделения второго оттека блок управления центрифугой дает команду на проведение дальнейших операций цикла разделения утфеля.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе проведенных исследований разработана технология разделения утфеля I кристаллизации в режиме его «гибкого» центрифугирования. Основной акцент при этом был обращен на условия отделения первого и второго оттеков. При этом был уточнен интервал их механического воздействия на чувствительный элемент устройства «гибкого» центрифугирования для утфелей различного технологического состава [29]. Кроме того, в этом же режиме была отработана технология комбинированного промывания кристаллов сахара: сначала сахаросодержащим раствором, а затем горячей водой. Предварительно был подобран сахаросодержащий раствор (второй оттек) для промывания кристаллов сахара и его технологические параметры для использования. Помимо этого, были уточнены требования к температуре промывных агентов. Причем особое внимание было обращено на возможность комбинированного промывания кристаллов сахара в режиме «гибкого» центрифугирования. Опыты подтвердили целесообразность двухэтапного промывания кристаллов сахара: сначала сахаросодержащим раствором, близким к состоянию насыщения, а на втором – горячей водой с вводом в нее перекиси водорода [12].

Кроме того, были уточнены условия снижения вязкости, разделяемого в центрифугах утфеля. При этом оценена возможность улучшения подготовки и разделения утфеля в силовом центробежном поле для условий его «гибкого» центрифугирования.

В итоге все это позволило разработать новый способ разделения утфеля I кристаллизации в фильтрующих центрифугах периодического действия с получением патента на изобретение [18]. Основные операции для реализации процесса центрифугирования утфеля I кристаллизации по разработанному способу приведены на рисунке 3, из которого видна последовательность их реализации в соответствии с разработанным способом. Причем уточнены основные его технологические параметры и требования к ним с учетом их перераспределения в продуктовом отделении сахарного завода.

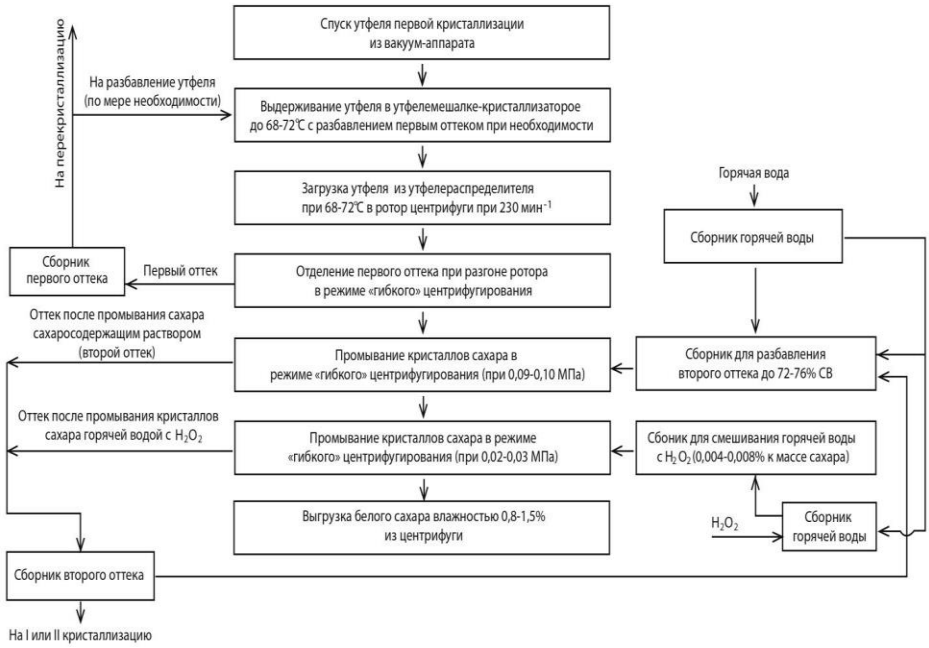


Рисунок 3 – Технологические операции разработанного способа разделения утфеля I кристаллизации

Figure 3 – Technological Operations of the Developed Method for Separating Massecuite of the First Crystallization

В соответствии с разработанной технологией, по завершении загрузки ротора утфелем его разгон начинали с 230 мин$^{-1}$ и далее до 500 и 980 мин$^{-1}$ (1000 мин$^{-1}$). При этом под действием центробежных сил сначала отделяли межкристальный раствор в виде первого оттека, а затем его остатки удаляли с использованием промывных агентов и отделением жидкой фазы в виде второго оттека.

В ходе этих исследований основное внимание обращали на подготовку утфеля к центрифугированию. С этой целью в нем определяли содержание сухих веществ ($СВ_{утфI}$, %) и его чистоту ($Ч_{утфI}$, %).

По предлагаемому способу температуру утфеля I кристаллизации после спуска из вакуум-аппарата выдерживали в утфелемешалке до 68–72 ºС и после чего направляли в утфелераспределитель, устанавливаемый над центрифугами.

Эксперименты по центрифугированию проводили с использованием центрифуги марки ФПН 125 Т1, которую загружали утфелем в количестве 750 кг при частоте вращения ее ротора 230 мин$^{-1}$. После чего начинали разгон ротора с утфелем с 230 до 980 (1000) мин$^{-1}$. Так как центрифуга снабжена устройством для контроля разделения утфеля в режиме «гибкого» центрифугирования, то в момент освобождения слоя осадка кристаллов сахара от основной массы оттеков их контролировали по величине механического воздействия на данный чувствительный элемент. Так, момент освобождения кристаллов сахара от основной массы первого оттека фиксировали по его давлению на чувствительный элемент, равный 0,095 МПа. Остатки первого оттека удаляли из слоя кристаллов сахара, промывая их разбавленным до

74 % СВ вторым оттеком первой кристаллизации температурой 85 ºС. Эту операцию реализовывали с использованием форсунки под давлением 0,04 МПа из расчета в количестве 2,0 (1,5–2,5) % к массе утфеля.

Эксперименты по уточнению требований к горячей воде для промывания кристаллов позволили уточнить диапазон ее температур и расход. Лучшие результаты промывания кристаллов сахара были получены при температуре воды 85 ºС и среднем ее расходе 1,5 % к массе утфеля.

С целью повышения эффективности освобождения кристаллов сахара от пленки оттеков в промывную воду добавляли перекись водорода из расчета 0,004–0,008 % (в среднем 0,006 %) к массе сахара. Использование перекиси водорода и добавление в промывную воду обусловлено ее существенным воздействием на цветность сахара [20]. Принцип такого воздействия перекисных окислителей основан на образовании при этом атомарного кислорода. Он способствует окислению редуцирующих веществ, окрашенных комплексов фенолов с катионами железа, ускоряет переход меланоидинов и нерастворимых соединений, дезаминирование высокомолекулярных и веществ коллоидной дисперсии с окислением продуктов, и их деструкции до органических кислот. Существует предположение, что при окислении красящих веществ пероксид водорода расщепляет их ненасыщенные участки, а также дикетонные группы в полифенолы. Они являются наиболее важными предшественниками цветности, и постепенно удаляют их, преобразуя в легкоудаляемые кислоты. Перекись распадается на кислород и воду и поэтому не оказывает отрицательного воздействия на организм человека.

В процессе разделения утфеля I кристаллизации, отбираемые первый и второй оттеки направляли в соответствующие сборники (рисунок 3). Часть второго оттека использовали в качестве промывного сахаросодержащего раствора. С этой целью его в отдельном сборнике разбавляли горячей водой до содержания в нем 72–76 % (в среднем 74 %) СВ. По завершении вышеуказанных операций кристаллы сахара подсушивали при торможении ротора в центробежном поле до влажности 0,8 % к их массе, выгружали из центрифуги и направляли на сушку.

Параллельно были проведены подобные эксперименты с известным способом. Опыты проводили с использованием тех же центрифуг, что и для реализации разработанного способа (ФПН-125 1Т) и условиями их загрузки утфелем в том же количестве. По известному способу кристаллы промывали только горячей водой температурой 85 ºС через форсунки под давлением 0,4 МПа. Расход воды устанавливали пробным центрифугированием, что в среднем составляло 3,35 % к массе утфеля. По завершении промывания кристаллы сахара подсушивали при торможении ротора до влажности 0,8 % к его массе, затем их выгружали из ротора центрифуги и направляли на сушку.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление результатов исследований разработанного и известного способов [19] проводили, сравнивая технологические показатели утфеля по его чистоте ($Ч_{утф\ I}$, %), сухим веществам ($СВ_{утф\ I}$, %), выходу сахара из центрифуги (К, % к массе утфеля) и времени центрифугирования ($Т_ц$,с). Кроме того, были сопоставлены некоторые физико-химические показатели качества белого сахара по цветности ($Ц_{сах}$, ед.опт.пл.), наличию в нем редуцирующих веществ (РВ, %); содержанию золы (Зол, %), а также получаемый сахар оценивали по его гранулометрическому составу: средний размер кристаллов (Ср, мм) и коэффициент неоднородности ($К_н$. %).

Усредненные данные сопоставления по разработанному [18] и известному (прототипу [19]) способам представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сопоставление результатов исследований по известному (прототипу) и разработанному (по патенту)

Table 1 – Comparison of Research Results between the Known Method (Prototype) and the Developed Method (Patented)

Наименование показателя	Известный способ	Разработанный способ
Время, мин	3,4	2,7
Чистота утфеля, %	90,85	90,82
Содержание сухих веществ утфеля, %	92,59	92,61
Выход кристаллов сахара из центрифуги, % к массе утфеля	45,1	47,3
Физико-химические показатели качества белого сахара: Цветность, ед. опт. пл.	104,0	97,0
Зола, %	0,045	0,02
Редуцирующие вещества, %	0,055	0,03
Гранулометрический состав: Ср, мм $К_н$, %	 0,67 28,1	 0,72 25,6

Из таблицы видно, что разработанный способ по сравнению с известным позволяет повысить выход сахара из центрифуги на 2,2 % к массе утфеля. При этом на 20,6 % сократилась длительность цикла центрифугирования и улучшились физико-химические показатели качества белого сахара. Снижение расхода промывной воды (почти в два раза) тесно связано с уменьшением количества оттеков и продуктов их перекристаллизаций. Это, в свою очередь, позволяет работать с более низкими потерями сахарозы в продуктовом отделении. По приблизительным подсчетам, потери сахара в кристаллизационном отделении могут быть уменьшены на 0,03–0,035 % к массе свеклы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработан новый способ разделения утфеля I кристаллизации по «гибкой» временной программе цикла центрифугирования с промыванием кристаллов комбинированно в два этапа: сначала насыщенным сахаросодержащим раствором (второй оттек), а затем горячей водой с предварительным добавлением в нее H_2O_2.

Анализ полученных результатов показал, что разработанный способ позволяет повысить эффективность процесса центрифугирования утфеля I кристаллизации: увеличить выход сахара на 2,2 % по массе утфеля, сократить цикл центрифугирования на 20,6 %, улучшить физико-химические показатели качества готовой продукции за счет снижения цветности сахара, содержания редуцирующих веществ и зольности.

Применение комбинированного промывания са-

хара обеспечило не только повышение его выхода из центрифуг, но и положительно отразилось на его органолептических и технологических показателях. При этом расход промывной воды сократился почти в два раза, что обеспечило более низкие потери сахарозы в продуктовом отделении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 29 июня 2016 г. № 1364-р "Об утверждении "Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года" // Собрание законодательства РФ. 2016. № 28. Ст. 4758.

2. Банникова Н.В., Воробьева Н.В., Костюченко Т.Н. Перспективы развития экспорта сахара и сахарной продукции // Аграрный вестник Урала. 2023. Т. 23. № 11. С. 120–137. doi: 10.32417/1997-4868-2023-23-11-120-137.

3. Борцова Е.Л., Лаврова Л.Ю., Калугина И.Ю. Изучение зависимости между системой ценности потребителя и качеством пищевой продукции // Российское предпринимательство. 2017. Т. 18. № 19. С. 2841–2848.

4. Влияние сахара на структурно-механические свойства хлебобулочных изделий из муки пшеничной первого сорта / Н.С. Лаптенок [и др.] // Пищевая промышленность: наука и технологии (Беларусь). 2022. № 3. С. 62–68.

5. Горбашко Е.А. Управление качеством. Москва : Изд-во Юрайт, 2016. 463 с.

6. ГОСТ 33222-2015. Сахар белый. Технические условия. введ. 01-07-2016. Москва, 2015. 16 с.

7. Дешевая И.Ю., Славянский А.А., Тарасова Е.А. Современные тенденции стандартизации в области сахарной промышленности // Сахар. 2016. № 5. С. 33–36.

8. Егорова М.И. Сахар: эволюция требований потребителей // Сахар. 2014. № 7. С. 16–17.

9. Егорова М.И., Казакова С.И. Анализ технологического потока сахарного производства как инструмент обеспечения безопасности и качества белого сахара // Стратегия развития свеклосахарного комплекса России : материалы международной научно-практической конференции. Курск : ГНУ РНИИСП. Курск, 2007. С. 64–67.

10. Егорова М.И., Милых А.А., Райник В.В. Совершенствование метода определения гранулометрического состава сахара // Кондитерские изделия XXI века : материалы девятой международной конференции. Москва : Пищепромиздат, 2013. С. 176–178.

11. Инструкция по ведению технологического процесса свеклосахарного производства: утв. зам. министра пищевой промышленности СССР 11.05.85 г. Москва,1985. 372 с.

12. Славянский А.А., Сапронов А.Р. Пути повышения качества и выхода сахара-песка // Международный сельскохозяйственный журнал. 1988. № 6. С. 75–80.

13. Панфилов В.А. Диалектическое обеспечение развития технологий АПК // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2021. № 1. С. 87–98.

14. Славянский А.А. Специальная технология сахарного производства. 2-е издание, исправленное. Санкт-Петербург : Изд-во "Лань", 2020. 216 с.

15. Славянский А.А. Центрифугирование и его влияние на выход и качество сахара (монография). Москва : Издательский комплекс МГУПП, 2007. 180 с.

16. Развитие национальной инфраструктуры качества в области сахарной промышленности / Е.А. Тарасова [и др.] // Сахар. 2021. № 5. С. 20–23. doi:10.24412/2413-5518-2021-5-20-23.

17. Совершенствование технологии центрифугирования утфеля I кристаллизации в фильтрующих центрифугах периодического действия / А.А. Славянский [и др.] // Сахар. 2024. № 1. С. 48–56. doi:10.24412/2413-5518-2024-1-48-56.

18. Способ разделения утфеля первой кристаллизации: пат. 2264472 Рос. Федерация № 2004107116 ; заявл. 11.03.2004; опубл. 20.11.2005, Бюл. № 32. 7 с.

19. Оптимизация работы автоматизированных центрифуг на утфеле I кристаллизации / В.Г. Андреев [и др.] // Сахарная промышленность. 1988. № 8. С. 30–33.

20. Химия и технология пероксида водорода : учеб. пособие / Л.И. Мухортова [и др.]. Чебоксары : Изд-во Чувашского университета, 2020. 104 с.

21. Семенов Е.В., Славянский А.А., Алексеев А.А. Комбинированное промывание кристаллов сахара-песка в центрифугах: обоснование эффективности // Сахар. 2006. № 4. С. 50–53.

22. Грибкова В.А., Семенов Е.В., Славянский А.А. Инновационные разработки в области переработки растительного сырья (в сахарном и крахмалопаточном производствах) : монография. Москва : РУСАЙНС, 2024. 176 с.

23. Семенов Е.В., Славянский А.А. Процесс центрифугирования утфелей в технологии сахара // Теоретические основы пищевых технологий : в 2 книгах / Ответственный редактор В.А. Панфилов. Том Книга 1. Москва : Изд-во КолосС, 2009. С. 497–509.

24. Сапронов А.Р., Сапронова Л.А., Ермолаев С.В. Технология сахара : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 260203 «Технология сахаристых продуктов» направления подготовки дипломированного специалиста 260200 «Производство продуктов питания из растительного сырья». Санкт-Петербург : Профессия, 2013. 294 с.

25. Славянский А.А. Технологическое оборудование сахарных заводов: классификация, техническая характеристика, расчеты, компоновка : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 260203. Москва : МГУПП, 2006. 120 с.

26. Физико-химические процессы сахарного производства / И.С. Гулый [и др.]. Москва : Агропромиздат, 1987. 264 с.

27. Кристаллы сахарозы как основа сахарсодержащих продуктов / Н.В. Николаева [и др.] // Сахар. 2021. № 8. С. 34–38. doi: 10.24412/2413-5518-2021-8-34-38.

28. Развитие национальной инфраструктуры качества в области сахарной промышленности / Е.А. Тарасова [и др.] // Сахар. 2021. № 5. С. 20–23. doi: 10.24412/2413-5518-2021-5-20-23.

29. Промывание кристаллов сахара-песка в роторе центрифуги / Е.В. Семенов [и др.] // Сахар. 2004. № 5. С. 36–38.

30. Славянский А.А., Семенов Е.В., Сергеева Е.А. Особенности разделения утфеля I кристаллизации в силовом центробежном поле // Сахар. 2013. № 12. С. 44–46.

Информация об авторах

А. А. Славянский – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инновационных технологий продуктов из растительного сырья Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ).

В. А. Грибкова – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инновационных технологий продуктов из растительного сырья Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ).

Д. П. Митрошина – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий продуктов из растительного сырья Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ).

Н. В. Николаева – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инновационных технологий продуктов из растительного сырья Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ).

REFERENCES

1. Government of the Russian Federation. (2016). Strategy for improving the quality of food products in the Russian Federation until 2030. Order No. 1364-r from 29 June 2016. Sobranie zakonodatel'stva RF, (28), art. 4758. (In Russ.).

2. Bannikova, N.V., Vorobyova, N.V. & Kostyuchenko, T.N. (2023). Prospects for the Development of Exports of Sugar and Sugar Products. Agrarian Bulletin of the Urals. 23 (11), 120-137. (In Russ.). doi: 10.32417/1997-4868-2023-23-

11-120-137.

3. Bortsova, E.L., Lavrova, L.Yu. & Kalugina, I.Yu. (2017). Study of the relationship between the consumer value system and the quality of food products. Russian entrepreneurship. 18 (19), 2841-2848. (In Russ.).

4. Laptenok, N.S., Dudareva, A.N., Sevastey, L.I. & Goroshnyakova, S.D. (2022). Influence of sugar on structural and mechanical properties of bakery products made from first grade wheat flour. Food industry: science and technology (Belarus), (3), 62-68. (In Russ.).

5. Gorbashko, E.A. (2016). Quality Management. Moscow : Yurait Publishing House. (In Russ.).

6. White sugar. Technical specifications. (2015). GOST 33222-2015 from 01.07.2016. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

7. Deshevaya, I.Yu., Slavyanskiy, A.A. & Tarasova, E.A. (2016). Modern trends in standardization in the sugar industry. Sakhar, (5), 33-36. (In Russ.).

8. Egorova, M.I. (2014). Sugar: evolution of consumer demands. Sakhar, (7), 16-17. (In Russ.).

9. Egorova, M.I. & Kazakova, S.I. Analysis of the technological flow of sugar production as a tool for ensuring the safety and quality of white sugar. Proceedings of the International scientific and practical conference «Strategy for the development of the beet sugar complex of Russia». Kursk : GNU RNIISP. (In Russ.).

10. Egorova, M.I., Milykh, A.A. & Rainik, V.V. Improving the method for determining the granulometric composition of sugar. Proceedings of the ninth international conference «Confectionery products of the XXI century». Moscow : Pishchepromizdat. (In Russ.).

11. Instructions for the technological process of beet sugar production: approved by the Deputy Minister of the Food Industry of the USSR on May 11, 1985. Moscow.

12. Slavyanskiy, A.A. & Sapronov, A.R. (1988). Ways to improve the quality and yield of granulated sugar. International Agricultural Journal, (6), 75-80. (In Russ.).

13. Panfilov, V.A. (2021). Dialectical support for the development of agro-industrial complex technologies. Bulletin of the Kerch State Marine Technological University, (1), 87-98.

14. Slavyanskiy, A.A. (2020). Special technology of sugar production. St. Petersburg : Lan Publishing House. (In Russ.).

15. Slavyanskiy, A.A. (2007). Centrifugation and its influence on sugar yield and quality (monograph). Moscow : Publishing complex of MGUPP. (In Russ.).

16. Tarasova, E.A., Guryeva, K.B., Slavyansky, A.A., Lebedeva, N.N. & Mitroshina, D.P. (2021). Development of national quality infrastructure in the sugar industry. Sugar, (5), 20-23. (In Russ.). doi: 10.24412/2413-5518-2021-5-20-23.

17. Slavyanskiy, A.A., Gribkova, V.A. & Nikolaeva, N.V. (2024). Improving the technology of centrifugation of massecuite I crystallization in filter centrifuges of periodic action. Sugar, (1), 48-56. (In Russ.). doi: 10.24412/2413-5518-2024-1-48-56.

18. Slavyanskiy, A.A., Il'ina, V.V. & Shterman, V.S. (2005). Method of separation of fill mass (massecuite) of first crystallization. Pat. 2264472. Russian Federation, published on 20.11.2005. Bull. No. 32. (In Russ.).

19. Andreev, V.G., Slavyanskiy, A.A. & Sapronov, A.R. (1988). Optimization of the operation of automated centrifuges on crystallization massecuite. Sugar industry, (8), 30-33.

20. Mukhortova, L.I., Efimov, Yu.T., Glushkov, I.V. & Konstantinova, T.G. (2020). Chemistry and technology of hydrogen peroxide: Textbook. Cheboksary : Chuvash University Publishing House.

21. Semenov, E.V., Slavyanskiy, A.A. & Alekseev, A.A. (2006). Combined washing of granulated sugar crystals in centrifuges: substantiation of efficiency. Sakhar, (4), 50-53. (In Russ.).

22. Gribkova, V.A., Semenov, E.V. & Slavyanskiy, A.A. (2024). Innovative developments in the field of processing plant raw materials (in sugar and starch production): monograph. Moscow: RUSAINS. (In Russ.).

23. Semenov, E.V. & Slavyanskiy, A.A. (2009). The process of centrifugation of massecuite in sugar technology. Moscow : KolosS Publishing House, 2009. (In Russ.).

24. Sapronov, A.R., Sapronova, L.A. & Ermolaev, S.V. (2013). Sugar technology: a textbook for students of higher educational institutions studying in the specialty 260203 "Technology of sugar products" of the direction of training a certified specialist 260200 "Production of food products from plant raw materials". St. Petersburg: Profession. (In Russ.).

25. Slavyanskiy, A.A. (2006). Technological equipment of sugar factories: classification, technical characteristics, calculations, layout: a teaching aid for students of higher educational institutions studying in specialty 260203. Moscow : MGUPP. (In Russ.).

26. Guly, I.S., Lysyansky, V.M. & Reva, L.P. (1984). Physicochemical processes of sugar production. Moscow : Agropromizdat. (In Russ.).

27. Nikolaeva, N.V., Mitroshina, D.P., Slavyanskiy, A.A., Gribkova, V.A. & Lebedeva, N.N. (2021). Sucrose crystals as the basis of sugar-containing products. Sugar, (8), 34-38. (In Russ.). doi: 10.24412/2413-5518-2021-8-34-38.

28. Tarasova, E.A., Guryeva, K.B., Slavyanskiy, A.A., Lebedeva, N.N. & Mitroshina, D.P. (2021). Development of national quality infrastructure in the sugar industry. Sugar, (5), 20-23. (In Russ.). doi: 10.24412/2413-5518-2021-5-20-23.

29. Semenov, E.V., Slavyanskiy, A.A., Ilyina, V.V. & Alekseev, A.A. (2004). Washing granulated sugar crystals in a centrifuge rotor. Sugar, (5), 36-38. (In Russ.).

30. Slavyanskiy, A.A., Semenov, E.V. & Sergeeva, E.A. (2013). Features of separation of massecuite I crystallization in a force centrifugal field. Sakhar, (12), 44-46. (In Russ.).

Information about the authors

A.A. Slavyanskiy - Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Innovative Technologies of Products from Plant Raw Materials at the Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (PKU).

V.A. Gribkova - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Innovative Technologies of Products from Plant Raw Materials at the Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (PKU).

D.P. Mitroshina - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Innovative Technologies of Products from Plant Raw Materials at the Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (PKU).

N.V. Nikolaeva - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Innovative Technologies of Products from Plant Raw Materials of the Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (PKU).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 39–45.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 39–45.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 66.094.941-594
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.005 EDN: PMASNI

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЛИЗА АНАДАРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА

Любовь Михайловна Есина [1], Зоя Евгеньевна Ушакова [2], Ольга Николаевна Кривонос [3], Ирина Андреевна Белякова [4], Дарья Васильевна Штенина [5]

[1, 2, 3, 4, 5] Южный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («Южный»), Ростов-на-Дону, Россия
[1] esinalm@azniirkh.vniro.ru, https://orcid.org/0000-0002-6332-426X
[2] ushakovaze@azniirkh.vniro.ru, https://orcid.org/0000-0002-8917-9611
[3] krivonoson@azniirkh.vniro.ru, https://orcid.org/0000-0002-1300-0697
[4] belyakovaia@azniirkh.vniro.ru, https://orcid.org/0000-000-2-6382-0896
[5] shteninadv@azniirkh.vniro.ru, https://orcid.org/0000-0001-7057-514x

Аннотация. *Исследования по переработке двустворчатого моллюска Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна Anadara kagoshimensis являются актуальными, поскольку биомасса анадары достигла объемов, достаточных для организации промысла. В связи с этим целью исследования являлось установление с помощью методологии поверхности отклика параметров ферментативного гидролиза анадары, измельченной вместе со створками раковин, что будет способствовать ее рациональной переработке, не требующей разделки моллюска. Получено уравнение регрессии, описывающее накопление формольно-титруемого азота (функция отклика) в гидролизате в зависимости от продолжительности процесса, количества фермента алкалазы и гидромодуля. Для трехфакторного эксперимента определен оптимальный режим гидролиза: продолжительность 449 мин, количество фермента алкалазы – 1,7 % к массе мягких тканей анадары с полостной жидкостью, гидромодуль – 3 %. Для установления целесообразности добавления 3 % воды проведен двухфакторный эксперимент и показано, что на данные гидролиза не оказывает существенного влияния гидромодуль из-за наличия в гидролизуемой массе полостной жидкости моллюска. В связи с этим оптимальным режимом гидролиза без гидромодуля является продолжительность процесса 414 мин, количество алкалазы – 1,7 %, что обеспечивает накопление 479 мг% формольно-титруемого азота, степень гидролиза 46,1 %. Учитывая, что проведение гидролиза в течение почти 7 ч приведет к высоким энергозатратам, на основании анализа экспериментальных данных по накоплению формольно-титруемого азота и величины степени гидролиза за рациональный режим для анадары предлагается режим продолжительностью 230 мин и количеством алкалазы – 1,3 % при температуре* 55±2 ºС, *pH = 6,5 ед. Гидролизат, полученный по указанному режиму после концентрирования до содержания сухих веществ 50 %, характеризуется достаточно высоким содержанием белка (≈30 %) и степенью гидролиза 44,1±1,4 %.*

Ключевые слова: *анадара Anadara kagoshimensis, алкалаза, гидролиз, методология поверхности отклика, функция отклика, гидромодуль, формольно-титруемый азот, степень гидролиза.*

Для цитирования: Моделирование параметров гидролиза анадары с использованием методологии поверхности отклика / Л. М. Есина [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 39–45. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.005. EDN: https://elibrary.ru/PMASNI.

Original article

MODELING HYDROLYSIS PARAMETERS OF HALF-CRENATED ARK USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Lubov M. Esina [1], Zoya E. Ushakova [2], Olga N. Krivonos [3], Irina A. Belyakova [4], Daria V. Shtenina [5]

[1, 2, 3, 4, 5] Southern Branch of the SRC RF FSBSI ‘‘VNIRO’’ (‘‘Southern’’), Rostov-on-Don, Russia
[1] esinalm@azniirkh.vniro.ru, https://orcid.org/0000-0002-6332-426X
[2] ushakovaze@azniirkh.vniro.ru, https://orcid.org/0000-0002-8917-9611
[3] krivonoson@azniirkh.vniro.ru, https://orcid.org/0000-0002-1300-0697
[4] belyakovaia@azniirkh.vniro.ru, https://orcid.org/0000-000-2-6382-0896
[5] shteninadv@azniirkh.vniro.ru, https://orcid.org/0000-0001-7057-514x

© Есина Л. М., Ушакова З. Е., Кривонос О. Н., Белякова И. А., Штенина Д. В., 2026

Abstract. *Studies on the processing of the bivalve mollusc Anadara kagoshimensis (half-crenated ark), inhabiting the Azov and Black Sea Fishery Basin, are of immediate relevance due to its biomass reaching volumes sufficient for its commercial exploitation. This necessitated research aimed at identification of the parameters for enzymatic hydrolysis of half-crenated ark using Response Surface Methodology; the molluscs subjected to hydrolysis are ground with their shells, which ensures their rational processing without preliminary dressing. A regression equation has been derived to descibe the accumulation of formol-titratable nitrogen (the response function) in the hydrolysate depending on the process duration, the dosage of alcalase enzyme, and a hydromodulus. The optimal hydrolysis regime for a three-factor experiment has been identified: duration of 449 minutes, alcalase enzyme dosage of 1.7 % relative to the weight of half-crenated ark soft tissues with perivisceral fluid, and a hydromodulus of 3 %. A two-factor experiment was conducted to determine the feasibility of adding 3 % of water, and its results indicate that a hydromodulus does not exert a significant effect on the hydrolysis outcome due to the presense of molluscan perivisceral fluid in the pulp subjected to hydrolysis. Thus, the optimal hydrolysis regime without a hydromodulus involves the process duration of 141 minutes and the alacalase enzyme dosage of 1.7 %, which ensures the accumulation of 479 mg% of formol-titratable nitrogen and the hydrolysis degree of 46.1 %. Considering the high energy demand associated with the 7-hour-long hydrolysis process, the analysis of experimental data on the accumulation of formol-titratable nitrogen and the degree of hydrolysis provides the ground to recommend as rational for half-crenated ark the following regime: process duration of 230 minutes and alcalase enzyme dosage 1.3 % at the temperature of 55±2 °C and pH=6.5. The hydrolysate obtained following the specified regime, after its concentration to 50 % of dry matter content, is characterized by a relatively high protein content (≈30 %) and degree of hydrolysis 44.1±1.4 %.*

Keywords: *half-crenated ark Anadara kagoshimensis, alcalase, hydrolysis, Response Surface Methodology, response function, hydromodulus, formol-titratable nitrogen, degree of hydrolysis*.

For citation: Esina, L. M., Ushakova, Z. E., Krivonos, O. N., Belyakova, I. A. & Shtenina, D. V. (2026). Modeling hydrolysis parameters of half-crenated ark using Response Surface Methodology. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 39-45. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.005. EDN: https: //elibrary.ru/PMASNI.

ВВЕДЕНИЕ

В результате уменьшения материкового стока, повышения солености и температурного фона воды Азовского моря наблюдается сокращение запасов основных промысловых объектов (хамсы, тюльки, бычков). При этом отмечается интенсивный рост численности и биомассы промысловых беспозвоночных, среди которых следует выделить зарывающегося двустворчатого моллюска анадару [1].

Анадара в Азово-Черноморском рыбохозяйственном бассейне является инвазивным видом, впервые была обнаружена в Черном море в районе Туапсе в 1968 г., в Азовском море – в 1989 г. В научно-исследовательских работах моллюск упоминается под наименованиями скафарка (*Scapharca cornea, Scapharca inaequivalvis*), кунеарка (*Cunearca cornea*). Проведенная генетическая экспертиза подтвердила принадлежность данного моллюска к виду *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) [2].

An. kagoshimensis колонизировала все Азовское море, ее запас является достаточным для организации рентабельного промысла, однако в настоящее время данный сырьевой ресурс не осваивается. В отличие от таких азово-черноморских моллюсков, как мидии, устрицы, рапана, для анадары не разработаны технологические способы ее обработки, поэтому исследования по переработке *An. kagoshimensis* являются актуальными.

Сложность переработки анадары заключается в незначительном размере моллюска, промысловый размер которого в соответствии с правилами рыболовства Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна составляет 3 см, что значительно отличает *An. kagoshimensis* от дальневосточной анадары *An. broughtoni c* промысловым размером 8 см.

Мясо анадары отличается повышенной жесткостью, обусловленной своеобразным гистологическим строением ткани моллюсков и высоким содержанием соединительнотканных белков, которые в *An. kagoshimensis* составляют 31 % от общего количества белка [3]. Как правило, соединительнотканные белки представлены коллагеном и коннектином. Высокий молекулярный вес коннектина (более 2000 кДа) и стабильность *in vivo* являются факторами, определяющими прочность мышечных волокон моллюска [4], что сказывается на органолептических свойствах пищевой продукции из анадары.

Механизированные способы разделки анадары отсутствуют, ручная разделка из-за незначительных размеров моллюска является трудоемким процессом и сопровождается большими технологическими потерями, поскольку из всей массы мягких тканей используют только двигательный мускул (ногу), который для *An. kagoshimensis* составляет 6–9 % от массы моллюска.

В связи с этим рациональным способом обработки *An. kagoshimensis* может быть гидролиз, при котором будет использоваться все мягкое тело моллюска вместе с полостной жидкостью.

Исследования аминокислотного состава, рассчитанные аминокислотные скоры белка *An. kagoshimensis* показали высокую биологическую ценность данного моллюска, что позволяет рассматривать азовскую анадару как сырьевой ресурс для производства гидролизатов [3].

Целью данной работы являлось определение параметров гидролиза с использованием методологии поверхности отклика (RSM – Response Surface Methodology). Данная методология успешно используется для оптимизации процессов переработки пищевого сырья, в т.ч. рыбного [5–7]. Задачей исследования являлось установление влияния продолжительности гидролиза, количества фермента и гидромодуля на накопление аминного (формольно-титруемого) азота с последующим определением степени гидролиза.

МЕТОДЫ

Для исследований использовали анадару, добытую в октябре 2024 г. в Керченском проливе Азовского моря. Анадара в целом (неразделанном) виде после тщательной мойки была упакована в пакеты из полимерных материалов, хранилась в замороженном виде при температуре минус 18 ºС. Срок хранения андары перед проведением исследований составлял 4–6 мес.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЛИЗА АНАДАРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА

Перед гидролизом мороженую анадару в створках мыли в проточной воде и после стекания дробили. Размер кусочков дробленых створок раковин в наибольшем измерении составлял 1–1,5 см.

Гидролиз проводили с использованием сериновой эндопептидазы алкалазы 24L активностью 2,4 AU/г (производство Китай). Преимуществом использования алкалазы является достижение высокой степени гидролиза в течение относительно короткой продолжительности процесса, а также возможность гидролиза при естественном pH, свойственном рыбному сырью [8].

Необходимое количество алкалазы рассчитывали от массы мышечной ткани с полостной жидкостью, которая составляла около 30 % от массы моллюска.

Для изучения влияния различных факторов гидролиза на накопление формольно-титруемого азота (функция отклика) использовали ортогональный центральный композиционный план второго порядка.

Планирование эксперимента по гидролизу проводили с помощью программного пакета Statgraphics Plus 5.0 для трех факторов: продолжительности гидролиза (x1), количества фермента (x2) и гидромодуля (x3) (табл. 1).

Таблица 1 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Table 1 – Design matrix for a three-factor experiment

№ точки эксперимента	Точки плана	Продолжительность гидролиза (x1), мин	Количество ферментного препарата (x2), %	Гидромодуль (x3), %
1	ядро	100,0	0,6	15,0
2		360,0	0,6	15,0
3		100,0	2,0	15,0
4		360,0	2,0	15,0
5		100,0	0,6	50,0
6		360,0	0,6	50,0
7		100,0	2,0	50,0
8		360,0	2,0	50,0
9	звездные точки	11,0	1,3	32,5
10		449,0	1,3	32,5
11		230,0	0,1	32,5
12		230,0	2,5	32,5
13		230,0	1,3	3,0
14		230,0	1,3	62,0
15	центр плана	230,0	1,3	32,5
16		230,0	1,3	32,5

В соответствии с планом эксперимента продолжительность гидролиза составляла от 11 до 449 мин, количество ферментного препарата – от 0,1 до 2,5 % к массе мягких тканей анадары с полостной жидкостью, гидромодуль (количество воды к измельченной анадаре со створками) – от 3 до 62 %. За постоянные величины была принята температура гидролиза 55±2 ºС (температурный оптимум используемого ферментного препарата), а также pH, принятый на уровне естественного значения сырья, равном 6,5 ед.

Гидролизуемую массу периодически перемешивали. После гидролиза фермент инактивировали нагреванием при температуре 80 ºС в течение 15 мин. После инактивации фермента гидролизат охлаждали до температуры 30 ºС, отделяли от створок раковин с помощью сита из мельничного газа и отстаивали при температуре 6±2 ºС в течение 8 ч для седиментации непрогидролизованной массы и разделения гидролизата на жидкую фракцию и плотный остаток. После отстаивания гидролизат декантировали, непрогидролизованную плотную часть центрифугировали, центрифугат смешивали с декантированным гидролизатом. Концентрирование гидролизата осуществляли на ротационном испарителе Stegler R-213b.

Массовую долю общего азота и белка с использованием комплекса «Кельтран» («Keltrum»), содержание воды (сухих веществ (СВ)), золы, жира определяли по ГОСТ 7636-85, pH измеряли с помощью потенциометрического титратора «Титрион» по ГОСТ 28972-91, углеводы – расчетным методом.

Процесс гидролиза контролировали по накоплению аминного азота (формольно-титруемого азота (ФТА)) по ГОСТ 29311–92 (расчет проводили в мг на 100 г (мг%)) и по степени гидролиза (СГ) – отношению количества выделившегося аминного азота к общему азоту [9, 10].

Анализ полученных данных осуществляли с использованием программ Statgraphics Plus 5.0, Microsoft Excel. Представленные результаты являются средними значениями не менее трех измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты реализации трехфакторного ортогонального плана для фермент-субстратной системы, состоящей из дробленой анадары со створками раковин и фермента алкалазы, представлены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что минимальное значение ФТА составляло 106 мг% при использовании 0,1 % фермента (точка № 11), максимальное – 448 мг% при использовании 2,0 % фермента (точка № 4). Близкой к точке № 4 по накоплению ФТА является точка № 10 (444 мг%). Точка № 10 характеризуется наибольшей степенью расщепления белков (СГ = 46,8 %) при дозе ферментного препарата 1,3 %, гидромодуле 32,5 %, продолжительности 449 мин.

На основании данных, представленных в таблице 2, было получено уравнение регрессии, описывающее процесс накопления ФТА в гидролизате (формула 1):

$$Y = -107{,}006 + 1{,}35836 \cdot x_1 + 311{,}735 \cdot x_2 + 2{,}45656 \cdot x_3 - 0{,}00131356 \cdot x_1^2 + 0{,}0206762 \cdot x_1 \cdot x_2 - \\ -0{,}00637956 \cdot x_1 \cdot x_2 - 92{,}3744 \cdot x_2^2 - 0{,}172936 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0{,}0333292 \cdot x_3^2 \quad (1)$$

Результаты дисперсионного анализа экспериментальных данных (ANOVA) приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Функция отклика (ФТА), содержание белка, сухих веществ и степень гидролиза белковых веществ для трехфакторного эксперимента

Table 2 – Response function (formol-titratable nitrogen), content of protein and dry matter, and degree of hydrolysis of protein substances in a three-factor experiment

№ точки	Факторы (натуральные значения) гидролиза			Функция отклика (ФТА, мг%)	Показатели гидролизата		
	Продолжительность (x1), мин	Количество фермента (x2), %	Гидромодуль (x3), %		Белок, %	Сухие вещества, %	СГ, %
1	100,0	0,6	15,0	215	4,6	7,3	35,6
2	360,0	0,6	15,0	387	6,1	9,9	39,7
3	100,0	2,0	15,0	271	5,0	9,4	33,9
4	**360,0**	**2,0**	**15,0**	**448**	**5,9**	**10,0**	**41,8**
5	100,0	0,6	50,0	201	4,1	6,6	31,3
6	360,0	0,6	50,0	290	4,7	7,7	38,6
7	100,0	2,0	50,0	246	4,2	7,6	36,6
8	360,0	2,0	50,0	369	5,2	9,0	44,4
9	11,0	1,3	32,5	184	3,6	10,7	30,4
10	**449,0**	**1,3**	**32,5**	**444**	**6,1**	**13,4**	**46,8**
11	230,0	0,1	32,5	106	2,3	4,3	28,8
12	230,0	2,5	32,5	380	5,9	10,4	40,3
13	**230,0**	**1,3**	**3,0**	**390**	**6,2**	**10,4**	**42,0**
14	230,0	1,3	62,0	306	4,5	7,9	42,5
15	230,0	1,3	32,5	393	6,4	9,8	38,8
16	230,0	1,3	32,5	372	5,6	10,7	44,9

Таблица 3 – Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) / Table 3 – Results of variance analysis (ANOVA)

Переменные величины (Variables)	Сумма квадратов (Sum of squares)	Степень свободы (DF)	Средний квадрат (Mean square)	F-значение (F value)	P-значение (P value)
x1	17182,1	1	17182,1	10,54	0,0175
x2	14915,3	1	14915,3	9,15	0,0232
x3	3937,02	1	3937,02	2,42	0,1711
$x1^2$	4584,41	1	4584,41	2,81	0,1445
x1x2	29,2779	1	29,2779	0,02	0,8978
x1x3	1682,1	1	1682,1	1,03	0,3488
$x2^2$	20483,6	1	20483,6	12,57	0,0121
x2x3	37,1159	1	37,1159	0,02	0,8850
$x3^2$	971,39	1	971,39	0,60	0,4694
Совокупная ошибка (Total error)	9777,08	6	1629,51	–	–
Общая корреляция (Total (corr.))	15276,0	15	–	–	–
Коэффициент детерминации R^2 – 93,5999%					
Скорректированный коэффициент детерминации Adj. R^2 – 83,9997 %					
Коэффициент вариации CV – 2,40297%					

Из таблицы 3 видно, что наибольшее влияние на накопление ФТА оказывают факторы x1, x2 и квадрат переменной x2. Модель показала хорошее соответствие экспериментальным данным с высокими значениями коэффициента детерминации R^2 (93,6 %) и скорректированного коэффициента детерминации Adj. R^2 (84,0 %). Невысокое значение коэффициента вариации (2,4 %) предполагает высокую степень точности и надежности экспериментальных значений. Этот результат подразумевает, что процесс гидролиза дробленой анадары со створками раковин с использованием фермента алкалазы может быть проанализирован и предсказан с помощью модели.

Поверхность отклика, характеризующая накопление ФТА в фермент-субстратной системе, представлена на рисунке 1.

Как было указано выше (табл. 2), точка № 10 показывает наибольшую степень расщепления белков (46,8 %) при дозе алкалазы 1,3 %, гидромодуле 32,5 % и продолжительности 449 мин. При этом программой Statgraphics Plus 5.0 для оптимизации гидролиза продолжительностью 449 мин рекомендуется увеличить количество ферментного препарата до 1,7 % и снизить гидромодуль до 3 %.

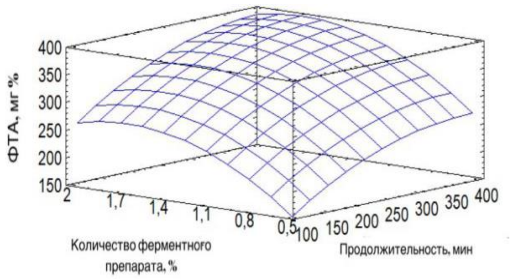


Рисунок 1 – График поверхности отклика, характеризующий накопление ФТА в процессе гидролиза дробленой анадары со створками

Figure 1 – Three-dimensinal graph of the response surface characterizing the accumulation of formol-titratable nitrogen in the hydrolysis of ground half-crenated ark with shells

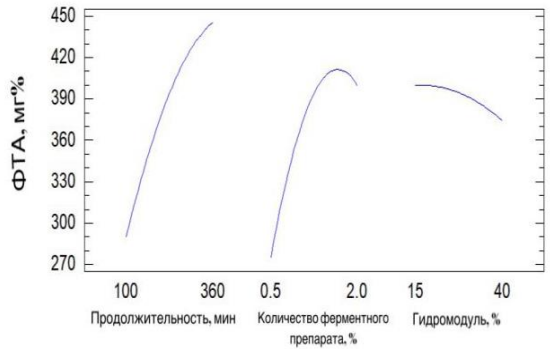


Рисунок 2 – Динамика накопления ФТА в зависимости от факторов x1, x2, x3

Figure 2 – Dynamics of formol-titratable nitrogen accumulation depending on the factors x1, x2 and x3

Данное предложение закономерно, поскольку на накопление ФТА влияет прежде всего продолжительность процесса (x1) и количество фермента (x2) (рис. 2).

Учитывая, что гидролизуемая дробленая анадара включает полостную жидкость, для определения целесообразности добавления 3% воды в гидролизуемую дробленую анадару был проведен двухфакторный эксперимент, при котором в качестве переменных величин были взяты продолжительность гидролиза (x1) и количество фермента (x2). Гидромодуль не учитывался в эксперименте, т.е. перед гидролизом вода не добавлялась в дробленую анадару. Температура гидролиза, как и в первом эксперименте, составляла 55±2 ºС, pH соответствовала естественному значению сырья, равному 6,5 ед. Планирование двухфакторного эксперимента осуществляли аналогично трехфакторному эксперименту (таблица 1).

Результаты реализации двухфакторного ортогонального плана для фермент-субстратной системы представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Функция отклика (ФТА), содержание белка, сухих веществ и степень гидролиза белковых веществ для двухфакторного эксперимента

Table 4 – Response function (formol-titratable nitrogen), content of protein and dry matter, and degree of hydrolysis of protein substances in a two-factor experiment

№ точки	Факторы (натуральные значения) гидролиза		Функция отклика (ФТА, мг%)	Показатели гидролизата		
	Продолжительность (x1), мин	Количество фермента (x2), %		Белок, %	Сухие вещества, %	Степень гидролиза, %
1	100,0	0,5	226	3,7	8,2	38,2
2	360,0	0,5	385	7,3	10,9	33,0
3	100,0	2,0	255	3,9	8,8	40,9
4	**360,0**	**2,0**	**398**	**5,3**	**11,5**	**46,9**
5	46,0	1,3	175	3,6	7,4	30,4
6	**414,0**	**1,3**	**479**	**6,5**	**13,1**	**46,1**
7	230,0	0,2	228	3,8	7,8	37,5
8	230,0	2,3	360	5,6	10,7	40,2
9	**230,0**	**1,3**	**317**	**4,9**	**8,7**	**40,4**
10	**230,0**	**1,3**	**325**	**5,2**	**9,8**	**39,1**

Согласно таблице 4, максимальное накопление ФТА наблюдалось для точек № 4 и № 6. Значения степени гидролиза для этих точек близки и составляют 46,9 % и 46,1 % соответственно. Эти точки по степени гидролиза близки с точкой № 10 трехфакторного эксперимента (таблица 2).

Получено уравнение регрессии, описывающее накопление ФТА в гидролизате в зависимости от продолжительности процесса (X1) и количества фермента (X2) (формула 2).

$$Y = -3{,}97281 + 1{,}31352 \cdot x_1 + 169{,}777 \cdot x_2 - 0{,}00124279 \cdot x_1^2 + 0{,}0300468 \cdot x_1 \cdot x_2 - -45{,}6135 \cdot x_2^2 \quad (2)$$

Данные дисперсионного анализа двухфакторного эксперимента (R^2 ≈ 88 %, CV = 1,9 %) показывают высокую степень точности и надежности экспериментальных значений с учетом двух переменных.

Параметры, которые рекомендует программа Statgraphics Plus 5.0 для оптимизации технологического процесса без добавления воды, составляют:

- продолжительность гидролиза – 414 мин;
- количество ферментного препарата – 1,72 %.

Таким образом, при гидролизе дробленой анадары без добавления воды количество алкалазы совпадает с рекомендуемым значением для гидролиза с добавлением 3 % воды (1,7 % алкалазы). При этом продолжительность гидролиза уменьшена с 449 мин до 414 мин.

Следует отметить, что рекомендуемая продолжительность гидролиза в течение 414 мин (6,9 ч) неизбежно приведет к возрастанию энергозатрат и себестоимости продукции. В связи с этим представляют интерес точка № 13 (таблица 2) и точки № 9 и № 10 (таблица 4), согласно которым предусматривается использование 1,3 % фермента в течение 230 мин (3,8 ч). Для точки № 13 с добавлением 3 % воды (таблица 2) накопление ФТА составляет 390 мг% (СГ = 42 %). Для точек № 9 и № 10 без гидромодуля (таблица 4) ФТА составляет 317 мг% (СГ = 40,4 %) и 325 мг% (СГ = 39,1 %) соответственно.

На основании анализа полученных данных в качестве рационального режима гидролиза дробленой анадары со створками раковин может быть рекомендован режим без гидромодуля продолжительностью 230 мин с использованием алкалазы в количестве 1,3%.

Характеристика гидролизата, полученного по данному режиму из дробленой анадары со створками раковин, представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристика гидролизата из дробленой анадары со створками раковин (продолжительность гидролиза 230 мин, количество алкалазы 1,3 %)

Table 5 – Characterization of the hydrolysate derived from ground half-crenated ark with shells (hydrolysis duration 230 minutes, alcalase enzyme dosage 1.3 %)

Наименование показателя	Характеристика гидролизата	
	после гидролиза	после концентрирования
Сухие вещества, %	9,3±0,6	49,2±1,1
Белок, %	5,4±0,7	29,6±0,6
Жир, %	0,1±0,02	0,9±0,2
Зола, %	2,0±0,15	9,0±0,8
Углеводы, %	0,4±0,03	9,7±0,6
ФТА, мг%	345,5±32,8	2010±41,6
СГ, %	41,3±2,0	44,1±1,4

Концентрированный гидролизат анадары характеризуется содержанием сухих веществ на уровне 50 %, белка – 30 %, высокой степенью гидролиза (44,1±1,4 мг%), обладает приятным вкусом и запахом, свойственным для гидролизатов из моллюсков, без наличия горечи.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение аминокислотного состава, молекулярно-массового распределения пептидных фракций, наличия эссенциальных минеральных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием методологии поверхности отклика показано, что гидромодуль оказывает незначительное влияние на степень накопления формольно-титруемого азота при гидролизе дробленой анадары со створками раковин, оптимальные параметры гидролиза составили: продолжительность гидролиза – 414 мин, количество фермента алкалазы – 1,3 %.

Для снижения энергозатрат при гидролизе в течение почти 7 ч (414 мин) предлагается следующий рациональный режим гидролиза: продолжительность гидролиза – 230 мин, количество фермента алкалазы – 1,3 %.

Концентрированный до ≈50 % содержания сухих веществ гидролизат, полученный по указанному рациональному режиму из дробленой анадары со створками раковин, характеризуется достаточно высоким содержанием белка (≈30 %) и степенью гидролиза 44,1±1,4 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирзоян А.В., Саенко Е.М., Дудкин С.И. Сырьевая база промысловых беспозвоночных в Азовском море и динамика ее освоения в 2000–2022 гг. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2023. Т. 6, № 4. С. 51–67. DOI: 10.47921/2619-1024_2023_6_4_51.

2. Терентьев А.С. Биоценоз Anadara kagoshimensis (Tokunaga, 1906) в Керченском проливе (Азово-Черноморский бассейн) // Экосистемы. 2023. № 36. С. 87–101. DOI: 10.5281/zenodo.10374274.

3. *Anadara Kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) – перспективный объект переработки Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна / З.Е. Ушакова, Л.М. Есина, И.А. Белякова, Д.В. Штенина // Рыбное хозяйство. 2025. 1(4): С. 43–51. DOI: 10.36038/0131-6184-2025-4-43-51.

4. Фракционный состав белков мягких тканей анадары и его изменения при термообработке / А.С. Гришин, Т.А. Давлетшина, С.В. Леваньков [и др.] // Изв. ТИНРО. 2004. Т. 138. С. 368–380.

5. Optimization of enzymatic hydrolysis by alcalase and flavourzyme to enhance the antioxidant properties of jasmine rice bran protein hydrolysate / K Hunsakul, T. Laokuldilok, V. Sakdatorn [et al.] // Sci Rep. 2022. Vol. 12:12582. DOI: 10.1038/s41598-022-16821-z.

6. Optimization of enzymatic hydrolysis of visceral waste proteins of yellowfin tuna (Thunnus albacares) / M. Ovissipour, A.A. Kenari, A. Motamedzadegan [et al] // Food Bioprocess Technol. 2012. Vol. 5. PP. 696–705. DOI: 10.1007/s11947-010-0357-x.

7. Ферментативный гидролиз соевого белка / Д.В. Соколов, Б.А. Болхонов, С.Д. Жамсаранова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53, № 1. С. 86–96. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-1-2418. EDN DHXSAX.

8. Review: Enzymatic hydrolysates of fish by-products: technological advantages and bioactive properties / S.S Robalo, L.P. da Silva, C.R. De Menezes [et al.] // Ciência Rural. 2024. .Vol. 54. DOI: 10.1590/0103-8478cr20230523.

9. Разумовская Р.Г. Получение гидролизатов, белковой массы и концентратов из мелкой рыбы // Рыбное хозяйство. 1973. № 6. С. 66–69.

10. Мухин В.А., Новиков В.Ю. Ферментативные белковые гидролизаты тканей морских гидробионтов: получение, свойства и практическое использование. Мурманск : Изд-во ПИНРО, 2001. 97 с.

Информация об авторах

Л. М. Есина – заведующий сектором технологий переработки водных биоресурсов «Южный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («Южный»).

З. Е. Ушакова – специалист сектора технологий переработки водных биоресурсов «Южный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («Южный»).

О. Н. Кривонос – главный специалист сектора технологий переработки водных биоресурсов «Южный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («Южный»).

И. А. Белякова – специалист сектора технологий переработки водных биоресурсов «Южный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («Южный»).

Д. В. Штенина – специалист сектора технологий переработки водных биоресурсов «Южный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («Южный»).

REFERENCES

1. Mirzoyan, A.V., Sayenko, E.M. & Dudkin, S.I. (2023). Exploitable resources of commercial invertebrates in the Azov Sea and the dynamics of their exploi-

tation in 2000-2022. *Aquatic Bioresources and Environment*. (4). 51-67. (In Russ.). DOI: 10.47921/2619-1024_2023_6_4_51. EDN: DWJMXZ.

2. Terentyev, A.S. (2023). Biocoenosis of the ark clam *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) in the Kerch Strait (Azov and Black Sea Basin). *Ecosystems*. (36). 87-101. (In Russ.). DOI: 10.5281/zenodo.10374274.

3. Ushakova, Z.E., Esina, L.M., Belyakova, I.A. & Shtenina, D.V. (2025). *Anadara Kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) as promisingsubject for food processing in the Ason and Black sea fishery basin. *Fisheries.* (4). 43-51. (In Russ.). DOI: 10.36038/0131-6184-2025-4-43-51.

4. Grishin, A.S., Davletshina, T.A., Levankov, S.V. & Shulgina, L.V. (2004). Fractional structure of proteins of anadara muscular tissue and its changes at heat processing. *Proceedings of TINRO*. (Vol 138). 368-380. (In Russ.).

5. Hunsakul, K., Laokuldilok, T., Sakdatorn, V., Wannaporn Klangpetch & Utama-ang, N. (2022). Optimization of enzymatic hydrolysis by alcalase and flavourzyme to enhance the antioxidant properties of jasmine rice bran protein hydrolysate. *Sci Rep*. (Vol. 12:12582). DOI: 10.1038/s41598-022-16821-z.

6. Ovissipour, M., Kenari, A.A., Motamedzadegan, A. & Nazari, R.M. (2012). Optimization of enzymatic hydrolysis of visceral waste proteins of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Food Bioprocess Technol*. (Vol. 5.). 696-705. DOI: 10.1007/s11947-010-0357-x.

7. Sokolov, D.V., Bolkhonov, B.A., Zhamsaranova, S.D., Lebedeva, S.N. & Bazhenova, B.N. (2023). Enzymatic hydrolysis of soy protein. *Food Processing* : *Techniques and Technology* (1). 86-96. (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2023-1-2418.

8. Robalo, S.S., Da Silva, L.P., De Menezes, C.R., Barin, J., Campagnol, B.P.C. & Cichoski, A.J. (2024). Review: Enzymatic hydrolysates of fish by-products: technological advantages and bioactive properties. *Ciência Rural.* (Vol. 54). DOI: 10.1590/0103-8478cr20230523.

9. Razumovskaya, R.G. (1973). Producing hydrolyzates, protein mass and concentrates from small fish. *Fisheries.*(6). 66-69.(In Russ.).

10. Mukhin, V.A. & Novikov, V.Yu. (2001). Enzymatic protein hydrolysates of tissues of marine aquatic living resources: production, properties, and practical application. Murmansk : PINRO Publ. (In Russ.).

Information about the authors

L.M. Esina - Head of the Sector for Processing Technology of Aquatic Biological Resources of the Southern Branch of the SRC RF FSBSI "VNIRO" ("Southern").

Z.E. Ushakova - Specialist of the Sector for Processing Technology of Aquatic Biological Resources of the Southern Branch of the SRC RF FSBSI "VNIRO" ("Southern").

O.N. Krivonos - Chief Specialist of the Sector for Processing Technology of Aquatic Biological Resources of the Southern Branch of the SRC RF FSBSI VNIRO (Southern).

I.A. Belyakova - Specialist of the Sector for Processing Technology of Aquatic Biological Resources of the Southern Branch of the SRC RF FSBSI "VNIRO" ("Southern").

D.V. Shtenina - Specialist of the Sector for Processing Technology of Aquatic Biological Resources of the Southern Branch of the SRC RF FSBSI "VNIRO" ("Southern").

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 46–52.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 46–52.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.665
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.006 EDN: QITJNX

ПРИМЕНЕНИЕ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МУЧНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Ольга Леонидовна Ладнова [1], Светлана Яковлевна Корячкина [2], Елена Геннадьевна Меркулова [3], Артем Иванович Горлатых [4]

[1, 3, 4] ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ Среднерусский институт управления – филиал», Орел, Россия
[1] ladnovaol@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4747-7116
[2] ФГБОУ ВО Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия,
[2] koryachkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0481-4936
[3] lenamerkulova1972@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9280-6498
[4] pangorlatykh@gmail.com

Аннотация. *Актуальным направлением расширения ассортимента функциональных хлебобулочных изделий является разработка и оптимизация состава мучных смесей для хлебобулочных изделий с применением нетрадиционного сырья, отличающегося высоким содержанием белковых веществ и пищевых волокон. В статье рассмотрена возможность применения для мучных смесей муки соевой полуобезжиренной, муки льняной, овсяной и пшеничной хлебопекарной высшего сорта или цельнозерновой. Установлено, что при соотношении муки соевой 20 %, льняной 5 %, овсяной 30 %, пшеничной высшего сорта или цельнозерновой 10 % и глютена пшеничного 35 % мучные смеси имели влажность 8,5±0,5 %, кислотность – 16±0,5 град., водосвязывающую способность – 182–185 г/100 г смеси. Тесто, приготовленное из мучных смесей, отличалось быстрым набором кислотности и увеличением в объеме, продолжительность брожения и расстойки составили 90±3 минут. Это связывали с комплексным действием компонентов мучных смесей. Установлено, что увеличение в составе мучных смесей глютена пшеничного оказывало положительное влияние на качество выпеченных хлебобулочных изделий. Хлеб из мучных смесей отличался большим выходом – 178–179 %, высоким удельным объемом – 2,28–2,26 см^3/г, хорошо развитой пористостью – 72±0,5 %. Предложенные составы мучных смесей оказывали положительное влияние на пищевую ценность хлеба. Хлеб имел высокие значения содержания белков 23,4±0,5 г/100 г, пищевых волокон – 4,0±0,5 г/100 г, магния, фосфора, железа, витаминов группы В и РР. Энергетическая ценность хлеба составляла 202±2 ккал. Установлено улучшение биологической ценности хлеба. Аминокислотный скор лизина составил 64 %, что больше по сравнению с хлебом пшеничным из муки высшего сорта на 16 %. Употребление 100 г хлеба удовлетворяет суточную потребность организма человека в белке на 20–38 %, в пищевых волокнах – на 18–20 %, в магнии – 18–19 %, в фосфоре – 28–30 %, в железе – 30–32 % и в ниацине – на 20 %. Это позволяет* отнести данные хлебобулочные изделия к функциональным продуктам.

Ключевые слова: *мука соевая, мука льняная, мука овсяная, мука пшеничная цельнозерновая, глютен пшеничный, мучные смеси, функциональные хлебобулочные изделия, пищевая ценность хлеба.*

Для цитирования: Применение нетрадиционного сырья при разработке мучных смесей для функциональных хлебобулочных изделий / О. Л. Ладнова [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 46–52. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.006. EDN: https://elibrary.ru/QITJNX.

Original article

USE OF NON-TRADITIONAL RAW MATERIALS IN DEVELOPMENT OF FLOUR MIXTURES FOR FUNCTIONAL BAKERY PRODUCTS

Olga L. Ladnova [1], Svetlana Ya. Koryachkina [2], Elena G. Merkulova [3], Artem I. Gorlatykh [4]

[1, 3, 4] Central Russian Institute of Management - Branch of The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Orel, Russia
[1] ladnovaol@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4747-7116
[2] Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
[2] koryachkinas@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0481-4936
[3] lenamerkulova1972@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9280-6498
[4] pangorlatykh@gmail.com

© Ладнова О. Л., Корячкина С. Я., Меркулова Е. Г., Горлатых А. И., 2026

ПРИМЕНЕНИЕ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МУЧНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Abstract. *An important direction for expanding the range of functional bakery products is the development and optimization of the composition of flour mixtures for bakery products using non-traditional raw materials characterized by a high content of proteins and dietary fiber. The article discusses the possibility of using semi-skimmed soy flour, flaxseed, oatmeal and premium or whole-grain wheat flour for flour mixtures. It was found that with a ratio of 20 % soy flour, 5 % flaxseed, 30 % oatmeal, 10 % premium or whole-grain wheat and 35 % wheat gluten, the flour mixtures had a moisture content of 8.5±0.5 %, acidity of 16±0.5 degrees, and a water-binding capacity of 182-185 g/100 g of mixture. The dough prepared from flour mixtures was characterized by a rapid increase in acidity and volume, the duration of fermentation and proofing was 90±3 minutes. This was associated with the complex action of the components of the flour mixtures. It was found that an increase in the composition of wheat gluten in the flour mixtures had a positive effect on the quality of baked bakery products. Bread from flour mixtures was characterized by a high yield - 178-179 %, high specific volume - 2.28-2.26 cm^3/g, well-developed porosity of 72±0.5 %. The proposed compositions of flour mixtures had a positive effect on the nutritional value of bread. The bread had high protein content of 23.4±0.5 g/100 g, dietary fiber - 4.0±0.5 g/100 g, magnesium, phosphorus, iron, vitamins B and PP. The energy value of bread was 202±2 kcal. An improvement in the biological value of bread was established, the amino acid score of lysine was 64 %, which is 16 % more than in wheat bread made from premium flour. Consumption of 100 g of bread satisfies the daily need of the human body for protein by 20-38 %, for dietary fiber by 18-20 %, for magnesium - 18-19 %, for phosphorus - 28-30 %, for iron - 30-32 % and for niacin by 20 % - this allows us to classify these bakery products as functional products.*

Keywords: soy flour, flaxseed flour: oat flour, whole grain wheat flour, wheat gluten, flour mixes, functional bakery products, nutritional value of bread.

For citation: Ladnova, O. L., Koryachkina, S. Ya., Merkulova, E. G. & Gorlatykh, A. I. (2026). Use of non-traditional raw materials in development of flour mixtures for functional bakery products. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 46-52. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.006. EDN: https: //elibrary.ru/QITJNX.

ВВЕДЕНИЕ

Полноценное и здоровое питание – одно из наиболее важных и необходимых условий для сохранения жизни и здоровья нации. Рост, нормальное развитие и жизнедеятельность человека – все это обеспечивается качественными, полезными и сбалансированными продуктами питания. Соблюдая правила питания, можно значительно улучшить качество жизни, сократить риск возникновения и развития хронических заболеваний и расстройств [1].

Традиционные продукты в большинстве случаев не всегда содержат необходимые пищевые компоненты в требуемых соотношениях, и именно поэтому сейчас активно ведутся исследования в области разработки продуктов функционального назначения, которые обладают научно обоснованными и подтвержденными свойствами, снижающие риск развития заболеваний, связанных с питанием, предотвращающие дефицит или восполняющие имеющийся в организме человека дефицит питательных веществ, сохраняющие и улучшающие здоровье за счет наличия в их составе функциональных пищевых ингредиентов. В качестве функциональных ингредиентов применяются живые микроорганизмы, вещество или комплекс веществ животного, растительного, микробиологического, минерального происхождения или идентичные натуральным, входящие в состав функционального пищевого продукта в количестве не менее 15 % от суточной физиологической потребности, в расчете на одну порцию продукта (ГОСТ Р 52349-2005).

В настоящее время можно наблюдать рост спроса на продукцию, оптимизированную по своему химическому составу и пищевой ценности, обогащенную белками, полиненасыщенными жирными кислотами, пищевыми волокнами, витаминами и минеральными веществами, обладающую антиоксидантными свойствами [2, 3, 4].

Со стороны государства также взят курс на оздоровление нации путем поддержки проектов по разработке продукции для здорового питания. Активно внедряется «Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года». В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» определены приоритетные направления научно-технологического развития экономики: превентивная и персонализированная медицина, обеспечение здорового долголетия населения страны и установлен перечень критических и сквозных наукоемких технологий, в том числе технологий персонализированного, лечебного и функционального питания для здоровьесбережения.

В настоящее время значительная часть населения России нуждается в специализированных продуктах питания. Однако такие продукты производятся в небольших количества и имеют высокую стоимость. Эти факторы препятствуют включению функциональных продуктов в рацион рядового потребителя [5].

Перспективным направлением разработки функциональных продуктов являются сухие полуфабрикаты для хлебобулочных изделий, которые представляют собой многокомпонентные смеси, предназначенные для выпечки широкого ассортимента хлебобулочных изделий на производственных предприятиях малой мощности, общественного питания и в домашних условиях. Состав полуфабрикатов позволяет моделировать рецептуры изделий с учетом основного сырья, создавать на основе традиционных рецептур новые смеси с включением функциональных ингредиентов, заменять сырьевые компоненты с учетом направленности специализированных продуктов [6, 7].

Перспективными источниками белка являются продукты переработки растительного сырья: мука соевая, овсяная, льняная.

Соевая мука кроме 43 % белка содержит витамины группы В, Е, К, А, большое количество кальция, магния и калия. Применение соевой муки в питании улучшает обмен веществ, снижает уровень сахара в крови, налаживает обмен жиров и способствует потере лишнего веса, выводит из организма накопившиеся токсины и свободные радикалы [8].

Льняная мука также содержит много белка (до 50 %), витамины группы В, А, К, Е, РР. Она богата минеральными соединениями, полиненасыщенными жирными кислотами и клетчаткой. Среди полезных

свойств льняной муки выделяют следующие: укрепляет иммунитет, нормализует микрофлору кишечника, улучшает работу сердечно-сосудистой системы и укрепляет костную систему [9, 10].

Овсяная мука считается одним из самых полезных продуктов для диетического питания. Ее состав богат витаминами группы В, различными минеральными соединениями, такими как железо, цинк, магний и кремний. Также в состав овсяной муки входит тирозин, недостаток которого может приводить к депрессивным состояниям, и холин, улучшающий метаболизм во всех тканях организма и благотворно влияющий на нервную систему. Отмечается, что потребление овсяной муки благотворно влияет на работу печени, нормализует состояние кожи и волос, а также помогает снизить лишний вес [11, 12, 13].

Основным сырьем хлебопекарного производства служит мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта. Несмотря на высокие технологические свойства, она имеет низкую питательную ценность. Это связано с удалением в процессе выработки муки оболочек зерна, зародыша, эндосперма. Цельнозерновая мука по сравнению с пшеничной мукой высшего сорта содержит больше белка – 11,5 %, жира – 2,2 %, почти в 2 раза больше кальция, магния, фосфора, железа, витаминов групп В и пищевых волокон [14].

Цель исследования – разработка состава мучных смесей для хлебобулочных изделий функционального назначения и определение их влияние на свойства теста, качество и пищевую ценность готовых изделий.

МЕТОДЫ

Объекты исследования: мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта (ГОСТ26574-2017), мука пшеничная цельнозерновая (ГОСТ33980-2016), мука соевая дезодорированная полуобезжиренная (СТО 53538590-031-2014), мука овсяная цельносмолотая (ТУ10.61.20-00138744625-2016), мука льняная (ТУ10.41.00-011-38744625-2019), их смеси, тесто из мучных смесей и выпеченные хлебобулочные изделия.

Содержание компонентов в мучных смесях подбирали с учетом обеспечения удовлетворения потребности в белке не менее 15 % от суточной нормы (ГОСТ 52349-2005). Для приготовления мучных смесей все компоненты перемешивали и просеивали. Рецептуры мучных смесей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав мучных смесей функциональных хлебобулочных изделий

Table 1 – The composition of flour mixtures of functional bakery products

Наименование показателя	Мучная смесь 1	Мучная смесь 2	Мучная смесь 3	Мучная смесь 4
Мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта, г/100 г смеси	20		10	
Мука пшеничная цельнозерновая, г/100 г смеси		20		10
Мука соевая, г/100 г смеси	40	40	20	20
Мука овсяная цельносмолотая, г/100 г смеси	30	30	30	30
Глютен пшеничный, г/100 г смеси	5	5	35	35
Мука льняная, г/100 г смеси	5	5	5	5
Итого	100	100	100	100

Влажность мучных смесей определяли по ГОСТ 9404-88, кислотность – по ГОСТ 27493-87. Для определения водосвязывающей способности к исследуемой мучной смеси добавляли воду в соотношении 1:6, пробирки встряхивали в течение 30 секунд и центрифугировали 5 мин при 1000 об/минуту и рассчитывали количество связанной воды в г/100 г смеси.

Тесто для хлебобулочных изделий готовили безопарным способом из мучных смесей с добавлением дрожжей хлебопекарных сухих быстродействующих 1,2 % и соли пищевой 1,5 %. Тесто замешивали на лабораторной тестомесильной машине в течение 2 минут. Продолжительность, брожения образцов теста составила 64–82 минут при температуре 30 ºС. Влажность и кислотность теста после брожения определяли с помощью стандартных методик. Образцы теста массой 350 г после формования и расстойки в течение 22–29 минут при температуре 37 ºС и относительной влажности 85 % выпекали в формах при 200 ºС в течение 30 минут и через 4 часа после выпечки оценивали физико-химические (влажность, кислотность, пористость мякиша, удельный объем хлеба, выход хлеба) и органолептические (внешний вид, форма, цвет, вкус и запах, характер пористости) показатели качества готовых изделий [15].

Для оценки влияния нетрадиционного сырья на пищевую и биологическую ценность расчетным методом определяли содержание белков, жиров, углеводов, минеральных веществ (кальций, магний фосфор, железо), витаминов (B_1, B_2, PP), энергетическую ценность и аминокислотный скор хлебобулочных изделий [16].

РЕЗУЛЬТАТЫИ ОБСУЖДЕНИЯ

Значения влажности мучных смесей находились на одном уровне и составили 8,5±0,5 %. Кислотность мучных смесей 1 и 2 составила 24 и 21 градус, что было больше значений кислотности мучных смесей 3 и 4 на 33 и 23,8 % соответственно.

Водосязывающая способность является показателем, оказывающим влияние на процесс замеса теста, свойства теста, выход хлеба, уровень потерь влаги и органолептические показатели качества хлеба. Водосвязывающая способность мучных смесей 1 и 2 была 174 и 175 г/100 г, что ниже значений водосвязывающей способности образцов 3 и 4 на 4,6 и 5,7 % соответственно 182 и 185 г/100 г. Увеличение водосвязывающей способности объясняли снижением содержания соевой муки и увеличением дозировки глютена пшеничного в составе мучных смесей 3 и 4, который имеет более высокие значения водосвязывающей способности (308 г/100 г) по сравнению с соевой мукой (232 г/100 г).

Значения водосвязывающей способности мучных смесей 2 и 4 по сравнению с данными мучных смесей 1 и 3 были больше, это связывали с добавлением муки пшеничной цельнозерновой, которая имеет большую водосвязывающую способность (134 г/100 г) по сравнению с мукой пшеничной высшего сорта (120 г/100 г).

Результаты влияния разных составов мучных смесей на параметры технологического процесса, физико-химические показатели теста и выпеченного

хлеба приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели качества теста и хлебобулочных изделий из мучных смесей

Table 2 – Quality indicators of dough and bakery products from flour mixtures

Наименование показателя	Образец теста и хлеба с мучной смесью 1	Образец теста и хлеба с мучной смесью 2	Образец теста и хлеба с мучной смесью 3	Образец теста и хлеба с мучной смесью 4
Влажность теста, %	51,8	52,1	52,4	52,5
Продолжительность брожения теста, мин	77	82	64	65
Продолжительность расстойки, мин	28	25	29	22
Кислотность теста в конце брожения, град	9,3	8,5	4,2	4,8
Выход хлеба, %	174,7	175,5	178,5	179,5
Удельный объем хлеба, $см^3/г$	1,52	1,36	2,28	2,26
Влажность мякиша хлеба, %	50,9	51,9	51,5	51,9
Пористость мякиша хлеба, %	50,5	48,2	73,1	72,7
Кислотность мякиша хлеба, град	–	–	3,8	4,1

Анализ полученных данных показал, что влажность теста всех образцов составляла 52,5 ±0,7 %.

При брожении теста из мучных смесей 1 и 2 отмечено медленное увеличение в объеме. Продолжительность брожения этих образцов теста была больше на 13 и 17 минут по сравнению с образцами теста из мучных смесей 3 и 4, что связывали с содержанием соевой муки в составе смеси, которая способствует снижению эластичность теста и препятствует увеличению его в объеме при брожении. При снижении дозировки соевой муки в 2 раза и одновременном увеличении глютена пшеничного общая продолжительность приготовления теста (брожение + расстойка) сокращалась на 12 и 20 минут.

Кислотность теста, приготовленного из смесей 1 и 2, сразу после замеса имела более высокие значения, и в конце брожения значения кислотности теста превышали значения кислотности образцов теста из мучных смесей 3 и 4 примерно в 2 раза, что также связывали с присутствием в составе мучных смесей соевой муки, которая имеет высокие значения кислотности из-за высокого содержания белковых веществ.

Выход хлеба из мучных смесей 3 и 4 был выше на 3,8 и 4,0 % по сравнению с образцами 1 и 2. Значения удельного объема хлеба образцов 3 и 4 также были выше в 1,5 и 1,7 раза значений образцов 1 и 2. Это связывали с действием глютена пшеничного, который имеет достаточно высокие значения водосвязывающей способности по сравнению с соевой мукой, что приводит к значительному улучшению указанных показателей образцов хлеба из мучных смесей 3 и 4.

Влажность хлеба всех образцов составила 51,0 ±0,5 %. Значения пористости образцов хлеба из мучных смесей 3 и 4 были выше на 22,6 и 24,5 % по сравнению с образцами хлеба из мучных смесей 1 и 2.

Влияние мучных смесей на внешний вид образцов хлеба представлен на рисунке 1.

Образец хлеба с мучной смесью 1 | Образец хлеба с мучной смесью 2 | Образец хлеба с мучной смесью 3 | Образец хлеба с мучной смесью 4

Рисунок 1 – Внешний вид образцов хлеба функционального назначения из мучных смесей

Figure 1 – Appearance of functional bread samples from flour mixtures

Анализ полученных данных показал, что все образцы хлеба имели правильную форму, выпуклую корку. На поверхности образца 2 имелись трещины и разрывы. Цвет корок коричневый с желтоватым оттенком. Цвет мякиша светло-коричневый с зеленоватым оттенком. Пористость не развитая, поры мелкие, неравномерные. Мякиш плотный, влажный, неэластичный. У образца 2 отмечены более темный оттенок, большая липкость и комкуемость мякиша. Образцы 1 и 2 имели выраженный привкус соевой муки.

Образцы хлеба 3 и 4 имели правильную форму, выпуклую поверхность корки. Пористость хорошо развитая, равномерная, мякиш относительно упругий, при надавливании быстро восстанавливается. Цвет мякиша желтоватый с зеленым оттенком, у образца 4 – более темный оттенок.

Более темный оттенок мякиша хлеба образцов

2 и 4 вызван наличием в составе мучных смесей 2 и 4 вместо муки пшеничной высшего сорта муки пшеничной цельнозерновой, которая содержит отрубянистые частицы и имеет более темный цвет.

Важным показателем для продуктов функционального питания является пищевая ценность. Расчет пищевой и энергетической ценности представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Показатели пищевой ценности хлебобулочных изделий из мучных смесей

Table 3 – Nutritional value indicators of bakery products made from flour mixtures

Наименование	Образец хлеба с мучной смесью 1	Образец хлеба с мучной смесью 2	Образец хлеба с мучной смесью 3	Образец хлеба с мучной смесью 4
Белки, г	17,03	17,4	23,4	23,5
Жиры, г	3,93	4,08	3,10	3,17
Углеводы, г	24,43	23,89	19,61	19,02
Пищевые волокна, г	5,51	6,36	3,65	4,04
Кальций, мг	89	92	78	79
Магний, мг	89	99	76	81
Фосфор, мг	232	264	198	213
Железо, мг	3,9	4,3	5,6	5,9
Тиамин, мг	0,33	0,35	0,30	0,31
Рибофлавин, мг	0,12	0,13	0,17	0,18
Никотиновая кислота, мг	1,43	1,92	1,67	1,92
Энергетическая ценность, ккал	201,2	198,2	203,4	201,8

Анализ полученных данных показал, что при снижении в составе мучных смесей содержания соевой муки и увеличении глютена пшеничного количество белка увеличивалось на 25–27 %

Содержание углеводов и жира у образцов 3 и 4 по сравнению с образцами 1 и 2, наоборот, было меньше на 21,1 и 22,3 % и 19,7 и 20,4 % соответственно, при этом значения энергетической ценности увеличивались незначительно – на 1,09 и 1,81 %.

Содержание пищевых волокон в хлебе из мучных смесей 3 и 4 было меньше на 33,6 и 36,5 % по сравнению с образцами 1 и 2. Это связывали с большим содержанием в составе мучных смесей соевой муки, содержащей до 14,5 % пищевых волокон в отличие от глютена пшеничного. При этом замена муки пшеничной высшего сорта (образец 3) на муку пшеничную цельнозерновую (образец 4) позволяет увеличить содержание пищевых волокон на 11 %.

Содержание минеральных веществ и витаминов в хлебе из мучных смесей 3 и 4 было меньше по сравнению с образцами из мучных смесей 1 и 2, что связывали с уменьшением в составе мучных смесей муки соевой и пшеничной и увеличении глютена пшеничного, имеющего менее богатый минеральный и витаминный состав.

Так как образцы хлеба из мучных смесей 3 и 4 имели более высокие показатели качества, дальнейшие расчеты выполняли для этих образцов.

В соответствии с ГОСТ 55577-2013 функциональными считаются продукты, содержащие в 100 г пищевого или биологически активного вещества не менее 15 % от их уровня рекомендуемого суточного потребления. При употреблении 100 г в сутки разработанного хлеба из мучных смесей 3 и 4 физиологическая потребность в белке будет удовлетворена для мужчин на 20,17–30,7 %, для женщин – на 25,5–38,3 %, в пищевых волокнах – на 18 и 20 %, в магнии – 18 и 19 %, в фосфоре – 28 и 30 %, в железе – 30 и 32 % и в ниацине – на 20 %, что позволяет отнести данные хлебобулочные изделия к функциональным продуктам.

Биологическая ценность характеризует степень задержки азота и эффективность его утилизации для растущего организма или для поддержания азотистого равновесия у взрослых. Биологическая ценность определяется наличием в белке незаменимых аминокислот и степенью их усвоения в организме человека.

Расчетные данные аминокислотного скора хлебобулочных изделий из мучных смесей 3 и 4 представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Влияние состава мучных смесей на аминокислотный скор (АКС) белка хлеба

Table 4 – The influence of flour mixture composition on the amino acid score (AAS) of bread protein

Наименование аминокислот	Идеальный белок, рекомендованный ФАО и ВОЗ, мг/1 г	Содержание аминокислот в 1 г белка хлеба из мучной смеси 3, мг	АКС, %	Содержание аминокислот в 1 г белка хлеба из мучной смеси 4, мг	АКС, %
Валин	50	953	81,45	957	81,45
Изолейцин	40	1023	109,29	1034	110,00
Лейцин	70	1792	109,40	1803	109,60
Лизин	55	825	64,10	833	64,45
Треонин	40	719	76,82	726	77,23
Триптофан	10	280	119,66	282	120,00
Метионин + цистеин	35	636	77,66	643	78,18
Фенилаланин + тирозин	60	1808	128,77	1822	129,22

Анализ полученных данных показал, что лимитирующими аминокислотами являются лизин – 64 %, треонин – 77 %, сумма серосодержащих аминокислот (метионин + цистеин) – 78 % и валин – 81 %. Однако отношение фактического количества лизина к его содержанию в эталонном белке увеличилось на 19 и 7 % по сравнению с аминокислотным скором лизина хлеба формового из муки пшеничной высшего сорта и муки пшеничной обойной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан состав мучных смесей, обеспечивающий функциональные свойства хлебобулочных изделий: мука соевая – 20 %, льняная – 5 %, овсяная – 30 %, глютен пшеничный – 35 %, мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта или цельнозерновая – 10 %.

Определены показатели качества разработанных мучных смесей (влажность, кислотность, водосвязывающая способность), теста из разработанных мучных смесей (влажность, кислотность, период созревания и расстойки) и показатели качества готовых изделий (выход, удельный объем, влажность, кислотность, пористость мякиша и органолептические характеристики). Увеличение содержания в составе смесей пшеничного глютена оказывало положительное влияние на выход, удельный объем хлеба, пористость мякиша и вкус изделий. Отмечено влияние муки пшеничной цельнозерновой на цвет корок и мякиша хлеба.

Расчетным путем установлена пищевая ценность хлебобулочных изделий из разработанных составов мучных смесей. Хлебобулочные изделия содержали белка 23,4±0,5 г/100г, жира – 3±0,2 г/100г, углеводов – 19,6±0,5г/100г, в том числе пищевых волокон – 4,0±0,5 г/100. Энергетическая ценность хлеба составила 202±1 ккал. Установлено положительное влияние муки пшеничной цельнозерновой на минеральный и витаминный состав хлеба: увеличивалось содержание магния на 6,6 %, фосфора – на 7,7 %, железа – на 5,3 %, рибофлавина и никотиновой кислоты 5,9 и14,9 %.

Разработанные составы мучных смесей позволяют получить функциональные хлебобулочные изделия: употребление 100 г хлеба, приготовленного из мучных смесей, удовлетворяет потребность в белке на 20–38 %, в пищевых волокнах – на 18–20 %, в магнии – 18–19 %, в фосфоре – 28–30 %, в железе – 30–32 % и в ниацине – на 20 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корячкина С.Я., Матвеева Т.В. Функциональные пищевые ингредиенты и добавки для хлебобулочных и кондитерских изделий : учеб. пособие. Санкт-Петербург : ГИОРД, 2013. 528 с.

2. Разработка технологии функциональных хлебобулочных изделий / О.Л. Ладнова, С.Я. Корячкина, В.П. Корячкин, Л.С. Большакова // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53, № 3. С. 576–590. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-3-2458. EDN QXNIPR.

3. Тарасова В.В. Применение физиологически функциональных ингредиентов в производстве хлебобулочных изделий // Пищевая промышленность. 2014. № 3. С. 34–39. EDN RWFTKB.

4. Губарева Ю.П., Пономарева Е.И., Титов С.А. Рациональное использование нетрадиционного сырья в производстве хлебобулочных изделий функционального назначения // Пищевые технологии будущего: инновационные идеи, научный поиск, креативные решения : сборник материалов конференции. Москва, 07 июня 2022 г. Москва : Издательский комплекс «Буки Веди», 2022. С. 81–84. EDN KZWENT.

5. Локтев Д.Б., Зонова Л.Н. Продукты функционального назначения и их роль в питании человека // Вятский медицинский вестник. 2010. № 2. С. 48–53. EDN OWVJFN.

6. Сибиль А.В. Резниченко И.Ю., Бакин И.А. Разработка технологии смесей для полуфабрикатов мучных изделий // Ползуновский вестник. 2012. № 2–2. С. 153–157. EDN PADXWB.

7. Изучение возможности использования растительного сырья для приготовления сухих смесей хлебобулочных изделий / Т.А. Ершова, С.Д. Божко, А.Н. Чернышова, И.О. Вахобова // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2019. № 3(29). С. 32–42. EDN NHVZOQ.

8. Ефремова Е.Н., Зенина Е.А., Шершнев А.А. Влияние соевой муки на качество пшеничного хлеба // Вестник КрасГАУ. 2020. № 3(156). С. 171–177. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-3-171-177. EDN XVHRHO.

9. Типсина Н.Н., Матюшев В.В., Бочарова Л.В. Использование льняной муки в производстве пшенично-ржаных сортов хлеба // Вестник КрасГАУ. 2018. № 4. С. 169–174.

10. Вихрова Е.А. Возможность использования льняной муки при производстве хлебобулочных изделий // Вестник КрасГАУ. 2022. № 1. С. 197–203. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-1-197-203.

11. Кунашева Ж.М., Кодзокова М.Х. Применение овсяной муки в технологиях производства ржано-пшеничного хлеба // Новые технологии. 2022. № 4. С. 102–108.

12. Шаболкина Е.Н., Шевченко С.Н., Анисимкина Н.В. Результаты исследований реологических и хлебопекарных показателей теста из цельносмолотого биоактивированного зерна овса голозерного в смеси с пшеничной мукой // Зерновое хозяйство России. 2022. Т. 14, № 4. С. 28–33. DOI: 10.31367/2079-8725-2022-82-4-28-33.

13. Лоскутов И.Г., Полонский В.И. Селекция на содержание ß-глюканов в зерне овса как перспективное направление для получения продуктов здорового питания, сырья и фуража // Сельскохозяйственная биология. 2017. № 4. С. 646–657. DOI: 10.15389/agrobiology/2017.4.646.rus.

14. Технология приготовления пшеничного хлеба из цельнозерновой муки / Н.А. Шмалько, Т.В. Ваницкая, Л.А. Кудрявцева, И.А. Никитин, Л.Ф. Пономарева, Е.А. Соловьева // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2024; № 86(4), С. 122–135. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2024-4.

15. Контроль качества сырья, полуфабрикатов и хлебобулочных изделий : учеб. пособие / С.Я. Корячкина, Н.В. Лабутина, Н.А. Березина, Е.В. Хмелева. Москва : ДеЛи плюс, 2012. 495 с. ISBN 978-5-905170-23-2. EDNQNJAFV.

16. Скурихин И.М., Тутельян В.А. Химический состав российских продуктов питания: Справочник. Москва : ДеЛипринт, 2002. 236 с.

Информация об авторах

О. Л. Ладнова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевых технологий, сервиса, торгового и таможенного дела» Среднерусского института управления – филиала РАНХиГС.

С. Я. Корячкина – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии продуктов питания и организации ресторанного дела» Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева.

Е. Г. Меркулова – кандидат биологических наук, доцент кафедры «Пищевых технологий, сервиса, торгового и таможенного дела» Среднерусского института управления – филиала РАНХиГС.

А. И. Горлатых – аспирант Среднерусского института управления – филиала РАНХиГС.

REFERENCES

1. Koryachkina, S.Ya & Matveeva, T.V. (2013). Functional food ingredients and additives for bakery and confectionery products: a textbook. St. Petersburg: GIORD. (In Russ.).

2. Ladnova, O.L., Koryachkina, S.Ya., Koryachkin, V.P. & Bolshakova, L.S. (2023). Development of technology for functional bakery products. Machinery and technology of food production, T. 53, (3), 576-590. (In Russ.). doi: 10.21603/2074-9414-2023-3-2458.

3. Tarasova, V.V. (2014). The use of physiologically functional ingredients in the production of bakery products. Food industry, (3), 34-39. (In Russ.).

4. Gubareva, Yu.P., Ponomareva, E.I. & Titov, S.A. Rational use of non-traditional raw materials in the production of functional bakery products. Food technologies of the future: innovative ideas, scientific search, creative solutions: Conference proceedings, Moscow, June 07.2022. (In Russ.).

5. Loktev, D.B., Zonova, L.N. (2010). Functional foods and their role in human nutrition. Vyatka Medical Bulletin, (2.) 48-53. (In Russ.).

6. Sibil, A.V. Reznichenko, I.Yu. & Bakin, I.A. (2012). Development of technology of mixtures for semi-finished flour products. Polzunovskiy vestnik, (2-2), 153-157. (In Russ.).

7. Yershova, T.A., Bozhko, S.D., Chernyshova, A.N. & Vakhoba, I.O. (2019). Study of the possibility of using vegetable raw materials for the preparation of dry mixtures of bakery products. Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex are products of a healthy diet, 3(29), 32-42. (In Russ.).

8. Efremova, E.N., Zenina, E.A. & Shershnev, A.A. (2020). Influence of soy flour on the quality of wheat bread. Bulletin of KrasGAU, (3(156)), 171-177. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2020-3-171-177.

9. Tipsina, N.N., Matyushev, V.V., Bocharova, L.V. (2018). The use of flax flour in the production of wheat-rye bread varieties. The Herald of KrasGAU, (4), 169-174. (In Russ.).

10. Vikhrova, E.A. (2022). The possibility of using flaxseed flour in the production of bakery products. Bulletin KrasGAU, (1), 197-203. (In Russ.). doi: 10.36718/1819-4036-2022-1-197-203.

11. Kunasheva, Zh.M., Kodzokova, M.H. (2022). The use of oat flour in rye-wheat bread production technologies. New technologies, (4), 102-108. (In Russ.).

12. Shabolkina, E.N., Shevchenko, S.N. & Anisimkina, N.V. (2022). The results of studies of rheological and baking parameters of a dough made from whole-ground bioactivated oat grain mixed with wheat flour. Grain Industry of Russia, T. 14, (4), 28-33. (In Russ.). doi: 10.31367/2079-8725-2022-82-4-28-33.

13. Loskutov, I.G., Polonsky, V.I. (2017). Breeding for beta-glucan content in oat grain as a promising direction for obtaining healthy food products, raw materials and forage. Agricultural biology, (4), 646-657. (In Russ.). DOI: 10.15389/agrobiology/2017.4.646.rus.

14. Shmalko, N.A., Vanitskaya, T.V., Kudryavtseva, L.A., Nikitin, I.A., Ponomareva, L.F. & Solovyova, E.A. (2024). Technology of making wheat bread from whole grain flour. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies, (86(4)), 122-135. (In Russ.). https://doi.org/10.20914/2310-1202-2024-4.

15. Koryachkina, S.Ya., Labutina, N.V., Berezina, N.A. & Khmeleva, E.V. (2012). Quality control of raw materials, semi-finished products and bakery products. Moscow : Delhi Plus. (In Russ.).

14. Skurihin, I.M. & Tutel'yan, V.A. (2002). *Chemical composition of Russian food products: Handbook.* Moscow : DeLiprint. (In Russ.). doi: 10.258.1232.

Information about the authors

O.L. Ladnova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Food Technology, Service, Trade and Customs Affairs" of the Central Russian Institute of Management - Branch of The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration.

S.Ya. Koryachkina - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Food Technology and Organization of Food Business" of the Orel State University named after I.S. Turgenev.

E.G. Merkulova - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of "Food Technologies, Service, Trade and Customs" of the Central Russian Institute of Management - Branch of The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration.

A.I. Gorlatykh - Postgraduate student of the Central Russian Institute of Management - Branch of The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 53–57.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 53–57.

CC BY

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 543.635.252
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.007 EDN: YHUSBY

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРАХМАЛА В СЕМЕНАХ СЕМЕЙСТВА *AMARANTHACEAE*

Ксения Николаевна Нициевская [1], Светлана Владимировна Станкевич [2], Елена Валерьевна Бородай [3]

[1, 2, 3] Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН,
р. п. Краснообск, Новосибирская область, Россия
[1] nitsievskayakn@sfsca.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7302-106X
[2] stankevichsv@sfsca.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5157-2004
[3] borodajelena@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4350-085X

Аннотация. *Значительная часть всей мировой сельскохозяйственной продукции, которая производится для питания человека и животных, состоит из сырья, содержащего крахмал. Для разработки показателей качества и безопасности продуктов необходимо проводить количественное определение содержания крахмальных зерен, подтверждающие их качество и гарантирующее отсутствие возможных фальсификаций. Существуют различные методики определения крахмала в растительном сырье. В настоящей работе авторами предлагается проведение анализа на примере семян семейства Amaranthaceae, в частности Amaranthusalbus L и Chenopodiumquinoa (белая и черная). Целью исследования является сравнительный анализ существующих методов определения крахмала на примере семян семейства Amaranthaceae. В статье представлены данные физико-химического исследования крахмала спектрофотометрически в семенах. Гидролиз Amaranthusalbus L. и Chenopodiumquinoa проводили с использованием дистиллированной воды (метод 1) и салициловой кислоты (метод 2) с предварительным построением градуировочных графиков. Метрологическая характеристика методов указывает на их применимость с учетом ошибки измерений не более1,4 %. Данные количественного содержания крахмала в образцах визуализированы с использованием графиков. Полученные данные исследования могут служить теоретической базой для разработки показателей качества из исследуемого вида растительного сырья.*

Ключевые слова: *семена амаранта, Amaranthusalbus L, семена киноа, Chenopodiumquinoa, крахмал, салициловая кислота.*

Для цитирования: Нициевская К. Н., Станкевич С. В., Бородай Е. В. Сравнительный анализ методов определения крахмала в семенах семейства *Amaranthaceae* // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 53–57. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.007. EDN: https://elibrary.ru/YHUSBY.

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINATION OF STARCH IN SEEDS OF *AMARANTHACEAE* FAMILY

Kseniya N. Nitsievskaya [1], Svetlana V. Stankevich [2], Elena V. Boroday [3]

[1, 2, 3] Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Russia
[1] nitsievskayakn@sfsca.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7302-106X
[2] stankevichsv@sfsca.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5157-2004
[3] borodajelena@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4350-085X

Abstract. *A significant part of the world's agricultural products, which are produced for human and animal nutrition, consists of raw materials containing starch. To develop quality and safety indicators of products, it is necessary to quantify the content of starch grains, confirming their quality and ensuring the absence of possible falsifications.There are various methods for determining starch in plant raw materials. In the present work, the authors propose to carry out an analysis using the example of seeds of the Amaranthaceae family, in particular Amaranthus albus L and Chenopodium quinoa (white and black).The purpose of the study is to compare existing methods for determining starch using the example of seeds of the Amaranthaceae family. The article presents data from the physicochemical study of starch spectrophotometrically in seeds. Hydrolysis of Amaranthus albus L. and Chenopodium quinoa was performed using distilled water (Method 1) and salicylic acid (Method 2) with preliminary calibration plots. The metrological characteristics of the methods indicate their applicability, taking into account the measurement error of not more than 1.4 %. Sample starch assay data were visualized using plots. The obtained research data can serve as a theoretical basis for the development of quality indicators from the studied type of plant raw materials.*

Keywords: *amaranth seeds, Amaranthus albus L, quinoa seeds, Chenopodium quinoa, starch, salicylic acid.*

For citation: Nitsievskaya, K. N., Stankevich, S. V. & Boroday, E. V. (2026). Comparative analysis of methods for determination of starch in seeds of *Amaranthaceae* family. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 53-57. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.007. EDN: https: //elibrary.ru/YHUSBY.

ВВЕДЕНИЕ

Крахмал входит в состав многих пищевых продуктов, а также используется в качестве пищевой добавки, поэтому так важен метод его количественного определения в продуктах питания, подтверждающий их качество. В отечественной нормативной документации установлены стандарты на методы количественного определения содержания крахмала только для молочной, мясной продукции и кормов для животных.

Основным углеводом некоторых видов амаранта является крахмал, который составляет ориентировочно 48–69 %. Особенностью крахмала амаранта является относительно небольшое (до 22 %) содержание амилозы, что делает его особенно перспективным для использования в качестве загустителей в соусах, супах, мороженом, киселях и т.д., а также для предотвращения кристаллизации сахара [1, 2].

В связи с разнообразием видов крахмала по своему химическому строению в зарубежной и отечественной литературе представлено достаточно много методик количественного определения как обычных, так и модифицированных крахмалов. Чаще всего используют классические поляриметрический, ферментативный, йодометрический методы, которые основаны на измерении содержания глюкозы после кислотного или ферментативного гидролиза крахмала. В литературе также опубликованы современные методы контроля качественного состава и количественного содержания компонентов извлечения, такие как методы высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) и хромато-масс-спектрометрии [3, 4, 5].

Жидкостная хроматография широко используется в качестве аналитического метода при фармакопейном анализе многокомпонентных смесей [6].

Анализ литературных данных показал, что некоторые исследователи количественное содержание крахмала определяли с помощью антронового реактива. Качественный метод был основан на реакции образования окрашенного комплексного соединения крахмала с йодом [7]. В другом сообщении приводится разработанная экспресс-методика количественного определения трудноразделимых компонентов белок-крахмал семян амаранта в одной пробе методом ИК-спектроскопии [8].

Целью исследования является сравнительный анализ существующих методов определения крахмала на примере семян семейства *Amaranthaceae*.

Исследования проводили в Сибирском федеральном научном центре агробиотехнологий (СФНЦА РАН).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцами для исследования являлись: семена *Amaranthusalbus L.*«Кинес» (Россия, Курская область) по ТУ 01.11.99-001-0086728806-2019 и *Chenopodiumquinoa* белая и черная (Россия, ООО «Гео Гудс») по СТО 26006230-005-2018.

Правила приемки и методы отбора проб проводили согласно ГОСТ 12037-81 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения чистоты и отхода семян, определение описательной характеристики и категории чистоты – по ГОСТ 12036-85 Семена сельскохозяйственных культур. Правила приемки и методы отбора проб, оценка сортовой чистоты – по ГОСТ 28636-90 Семена малораспространенных кормовых культур. Сортовые и посевные качества. Расчет данных проводили на абсолютно сухую массу (а.с.м.) согласно ГОСТ 13586.5-2015. Зерно. Метод определения влажности. Спектры поглощения извлечений из растительного сырья снимали на колориметре фотоэлектирическом (КФК, ЗОМ, Россия), оптическую плотность измеряли в кювете с толщиной слоя 10 мм. Для определения метрологических характеристик используемых методик проводили по 3 параллельных определения. Результаты исследований подвергались статистической обработке при проведении анализа 3 лабораторных серий для каждого образца. Статистическая обработка результатов анализа проводилась в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-1-02 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения, ГОСТ Р ИСО 5725-3-2002 Точность (правильность и прецизионность), Руководством по валидации методик анализа лекарственных средств и ОФС 42-0113-09 Валидация аналитических методик.

Гидролиз растворов проводили с применением микроскопа марки Carl Zeiss Stereo Discovery V8 с камерой Axio CamI C с 5 и программным обеспечением ZEN (Германия).

Метод 1

Методика основана на реакции крахмала с йодом в присутствии йодида калия. Оптические показания снимали при красном светофильтре, при максимальном пике определяли соответствующую длину волны [9].

Навеску пробы в виде сухих и измельченных семян семейства *Amaranthaceae* (*Amaranthusalbus L. Chenopodiumquinoa* белая и черная) переносили в колбу вместимостью 500 см^3, добавляли 300 см^3 теплой (50±2 ºС) дистиллированной воды и нагревали на водяной бане до достижения температуры 95±1 ºС, далее охлаждали до комнатной температуры. Раствор количественно переносили в мерную колбу вместимостью 500 см^3, доводили дистиллированной водой до метки и перемешивали. Полученный раствор отфильтровывали через бумажный фильтр высокой плотности («синяя лента»). К 10 см^3 прозрачного фильтрата добавляют 1 см^3 раствора йода (1 г кристаллического йода, химически чистого (х.ч.), и 1,5 г йодида калия, х.ч., добавляли 10 см^3 дистиллированной воды и растирали до полного растворения йода, переносили в склянку с пришлифованной пробкой, добавляли 200 см^3 дистиллированной воды). Измеряли оптическую плотность окрашенного в синий цвет раствора в кюветах с толщиной слоя 10 мм при оптимальной длине волны (определенной при построении градуировочного графика). Для раствора сравнения брали 10 см^3 дистиллированной воды и 1 см^3 раствора йода.

Построение градуировочного графика. Готовили стандартный раствор крахмала (ГОСТ 10163-76). Стандартные пробы с содержанием 0, 2, 4, 6, 8 и 10 см^3 раствора крахмала, доводили дистиллированной водой до 10 см^3 и перемешивали. Измеряли оптическую плотность растворов при длине волны от 670 нм в кюветах с толщиной слоя 10 мм. Содержание крахмала в пробе рассчитывали по формуле:

$$\mathrm{X\ (г)} = \frac{\mathrm{A} * V}{m * V_a} * 1000\ ,$$

где *А* – найденное значение по градуировочному графику содержания крахмала, мг/10 см^3; *V* – общий объем раствора, см^3; V_a – объем аликвоты, мл; *m* – масса анализируемой а. с. пробы, мг.

Метод 2

Метод основан на экстрагировании крахмала в присутствии салициловой кислоты с дальнейшим

титрованием в присутствии йодида калия [10]. Ход работы заключался в отборе навески в виде сухих и измельченных семян семейства *Amaranthaceae* (*Amaranthusalbus L. Chenopodiumquinoa* белая и черная), помещали в колбу вместимостью 100 см^3 и заливали 20 см^3 раствором салициловой кислоты (2,5 г кислоты растворить в 25 см^3 96 %-го спирта, затем доводили в мерной колбе до 1 дм^3 дистиллированной водой). Экстрагирование проводили на кипящей водяной бане с обратным холодильником продолжительностью 45 мин. Далее охлаждали и доводили до объема колбы экстрагентом. Затем колбу вновь нагревали на кипящей бане и в горячем состоянии вытяжку фильтровали через двойной складчатый фильтр. Отбирали на исследование 10 см^3 фильтрата, переносили в мерную колбу на 100 см^3, прибавляли 70 см^3 дистиллированной воды, 15 см^3 0,1 н. раствора хлороводородной кислоты, 2 мл реактива йодида калия (200 мг йодистого калия растворяли в 2 см^3 дистиллированной воды, в присутствии 100 мг кристаллического йода), доводили оставшийся объем водой. Оптические показания снимали при красном светофильтре в кюветах с толщиной слоя 10 мм. Определение длины волны проводили при обнаружении максимального пика во время построения градировочного графика.

Построение калибровочной кривой. Ход работы заключался в отборе навески крахмала (ГОСТ 10163-76) массой 100 мг, затем проводили экстрагирование в присутствии салициловой кислоты по описанному выше методу 1. Полученный фильтрат содержал в 1 см^3 1 мг крахмала, затем готовили растворы, содержащие 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3 мг крахмала. Далее проводили смешивание реактивов согласно последовательности, описанной в методе. В качестве раствора сравнения использовали те же реактивы, что и при подготовке пробы, при этом взамен фильтрата количественно брали салициловую кислоту.

Данный метод подразумевает получение данных по содержанию крахмала в мг/мл экстракта. Поэтому для определения содержания крахмала в статье применяли формулу по методу 1, учитывающий объем экстракта, объем аликвоты образца и массу навески.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный количественный анализ содержания крахмала в образцах экстрактов из семян семейства *Amaranthaceae* разными методами показал, что его уровень различен. Результаты исследования показателей качества представлены в таблице 1, из которой видно, что исследуемые семена семейства *Amaranthaceae* по показателям качества соответствовали требованиям I категории по ГОСТ 28636-90, при сортовой чистоте семян 98 %.

Таблица 1 – Показатели качества семян семейства *Amaranthaceae*
Table 1 – Quality parameters of seeds of Amaranthaceae family

Наименование образцов		Описательная характеристика		Сортовая чистота (%) / Категория	Влажность*,%
Amaranthus albus L.		Семена шаровидной формы (с боков выполненные), Поверхность семян матовая	Белые или светло-желтые, диаметр от 0,09 мм до 0,10 мм. Масса 1000 семян 0,613 г	98/I	9,85
Chenopodi-umquinoa	белая		Белые или светло-желтые, диаметр от 0,11 до 0,20 мм. Масса 1000 семян 2,436 г	99/I	8,37
	черная		Коричнево-черные или черные, округлые, диаметр от 0,12 до 0,20 мм. Масса 1000 семян 2,705 г	99/I	9,09
Примечание: * Влажность не более 12,00 % по ГОСТ 286363-90					

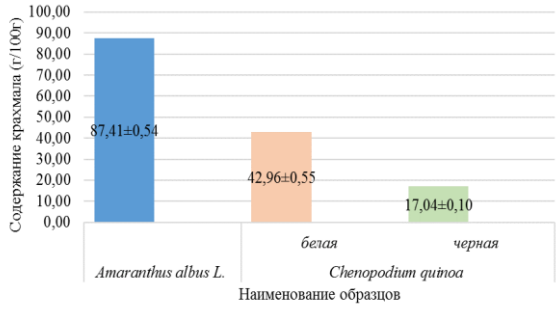


Рисунок 1 – Количественный анализ
при исследовании крахмала (г/100 г) (p = 0,95, n = 3)

Figure 1 – Assay for starch (g/100g) (p = 0.95, n = 3)

В ходе проведения исследований были получены результаты по содержанию крахмала, представленные на рисунках 1 и 2.

Согласно литературным данным, содержание крахмала в сортах амаранта «Валентина» и «Крепыш» оставили 43 % и 53 % [11]. Содержание крахмала в киноа колеблется от 50 до 70 % сухого вещества [12, 13].

В методе 1 содержание крахмала определялось в соотношении:

- *Amaranthus albus L.* 87,14±3,07 г/100 г;
- *Chenopodiumquinoa* белая 42,96±1,04 г/100 г., и черная 17,04±0,58 г/100 г.

Используемый метод 1 имел ошибку от 0,6 % до 1,3 %. Поэтому можно утверждать о применимости данного метода при исследовании заявленных образцов растительного сырья.

Получение количественных данных по методу 2, когда содержание крахмала выражалось в процентном соотношении, отмечено высокое содержание в образцах *Chenopodiumquinoa* белой Полученные данные находились в среднем диапазоне:

- в семенах *AmaranthusalbusL.* на 4,60 % или 46,9 мг на а.с.м.;
- в семенах *Chenopodiumquinoa* черного на 2,82 %.

Таблица 2 – Метрологическая характеристика количественного определения крахмала, г/100 г (p = 0,95, n = 3).
Table 2 – Metrological characteristics of starch assay, g/100 g (p = 0.95, n = 3).

Образец	$X_{ср}$	S	S_2	$X_{ср}±ΔX_{ср}$	S_x	ε, %
Amaranthus albus L.	87,41	0,94	0,88	87,41±0,54	1,19	0,62
Chenopodiumquinoa						
белая	42,96	0,95	0,91	42,96±0,55	0,84	1,28
черная	17,04	0,18	0,03	17,04±0,10	0,23	0,60

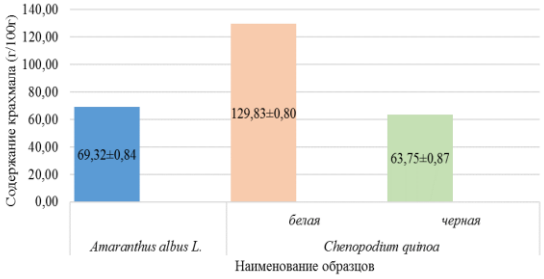


Рисунок 2 – Количественный анализ при исследовании крахмала (г/100 г) (p = 0,95, n = 3)

Figure 2 – Assay for starch (g/100 g) (p = 0.95, n = 3)

Согласно метрологическим характеристикам таблицы 3, полученные данные по методу 2 имели ошибку, которая составила от 0,6 % до 1,4 %. При данном методе содержание крахмала было минимальное – от 63,75 г/100 г у *Chenopodiumquinoa* черной, далее количественное содержание 69,32 г/100 г у *Amaranthusalbus L.* и *Chenopodiumquinoa* белой – 129,83 г/100 г. Можно утверждать, что в *Chenopodiumquinoa* белой содержание крахмала было больше в сравнении с используемыми образцами примерно в 2 раза.

Представленные методы определения крахмала являются доступными и описательными для сравнения в количественном соотношении.

Однако также упоминаем, что метод 1 имел ошибку менее 1,0 %. Данный факт можно объяснить параметрами экстрагирования.

Таблица 3 – Метрологическая характеристика количественного определения крахмала, г/100 г (p = 0,95, n = 3)
Table 3 – Metrological characteristics of starch assay, g/100 g (p = 0.95, n = 3)

Образец	$X_{ср}$	S	S_2	$X_{ср}±ΔX_{ср}$	S_x	ε, %
Amaranthus albus L.	69,32	1,46	2,12	69,32±0,84	1,32	1,21
Chenopodiumquinoa						
белая	129,83	1,39	1,94	129,83±0,80	1,77	0,62
черная	63,75	1,51	2,27	63,75±0,87	1,29	1,36

Согласно методу 1 продолжительность экстрагирования образцов семян составляла 45 минут при температуре кипения, точнее ≈98–100 ºС. При этом по методу 2 экстрагирование было непродолжительным и составляло не более ≈5 минут, т.е. до температуры 95 ºС. С другой стороны, возможно, длительное экстрагирование повлияло на переход соединений схожей крахмальной природы. Однако данные исследования возможны при более детальном изучении предложенных методов с использованием методик высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ).

Таблица 4 – Исследование размера частиц при гидролизе, мкм / Table 4 – Study of particle size under hydrolysis, μm

Размер частиц, мкм		
Amaranthus albus L.	*Chenopodiumquinoa*	
	белая	черная
Метод 1		
5,00±1,80	10,29±4,76	6,90±4,68
Метод 2		
7,25±1,54	8,23±3,15	6,02±1,89

Данные исследования при гидролизе, представленные в таблице 4, показали, что размеры частиц не имели существенных различий, зависимых от вида образца или гидролиза.

ВЫВОДЫ

Использование представленных методов анализа позволило получить новые данные о гидролизе крахмала для количественного определения содержания компонента на примере семян семейства *Amaranthaceae*. Полученные результаты количественного анализа распространяются на образцы анализируемого растительного сырья при условии соблюдения всех параметров проведения исследований по представленным методам. Научный материал может служить теоретической базой для разработки показателей качества из исследуемого вида растительного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhu F. (2017). Structures, physicochemical properties, and applications ofamaranth starch. Crit Rev Food Sci Nutr, 57(2), 313-325. doi: 10.1080/10408398.2013.862784.

2. Урубков С.А., Хованская С.С., Смирнов С.О. Сравнительный анализ гликемического индекса амаранта и других продуктов без глютена // Техника и технология пищевых производств. 2019. Т. 49. № 4. С. 629–634. doi: 10.21603/2074-9414-2019-4-629-634.

3. Рачкова В.П., Сураева Н.М., Гпазков С.В., Самойлов А.В. Спектрофотометрическое определение крахмала в томатных продуктах с антроновым реактивом // Вестник КрасГАУ. 2018. № 6(141). С. 187–193.

4. Ovando M., Whitney K., Simsek S. (2013). Analysis of starch in foodsystems by high performance size exclusion chromatography. Journal of Food Science, 78(2), 192–198. doi: 10.1111/1750-3841.12037.

5. Zhao S., Ren Y., Wei C. (2023). Staining Starch with Iodine Solution. Methods Mol Biol, 2566, 281–290. doi: 10.1007/978-1-0716-2675-7_23.

6. Дейнека Л.А., Дейнека В.И., Гостищев И.А., Сорокопудов В.Н., Сиротин А.А. Определение сквалена в семенах некоторых растений семейства *Amaranthaceae* // Химия растительного сырья. 2008. № 4. С. 69–74.

7. Самойлов А.В., Сураева Н.М., Рачкова В.П., Петров А.Н. Оценка уровня содержания крахмала в томатных кетчупах // Пищевая промышленность. 2020. № 9. С. 26–29. doi: 10.24411/0235-2486-2020-10093.

8. Офицеров Е.Н., Гультикова М.В., Лентищенко Л.В., Калистратова А.В. Экспресс-методика количественного определения белка и углеводов в продуктах переработки семян амаранта методом ИК-спектроскопии // Бутлеровские сообщения. 2024. Т. 78. № 6. С. 126–135. doi: 10.37952/ROI-jbc-01/24-78-6-126.

9. Панова Т.М., Щеголев А.А. Технология и оборудование для переработки растительного сырья // Методические указания по выполнению лабораторного практикума для студентов очной и заочной форм обучения. Направление 240100 «Химическая технология и биотехнология». Екатеринбург, УГЛТУ, 2010. 17 с.

10. Большой практикум «Биохимия». Лабораторные работы : учеб. пособие / сост. М.Г. Кусакина, В.И. Суворов, Л.А. Чудинова ; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2012. 148 с.

11. Скобельская З.Г. Применение амарантовой муки в производстве вафельных листов повышенной пищевой ценности / З.Г. Скобельская, М.Г. Балыхин, С.Д. Хасанова и др. // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 6. С. 92–96. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10618.

12. Орлова Т.В., Айдер М. Крахмал зерна квиноа (*Chenopodiumquinoa Willd.*): состав, морфология и физико-химические свойства // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 1. С. 98–112. doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-98-112.

13. López D.N., Galante M., Robson M., Boeris V., Spelzini D. (2018). Amaranth, quinoa and chia protein isolates: Physicochemical and structural properties. Int J Biol Macromol, 109, 152–159. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.12.080.

Информация об авторах

К. Н. Ниццевская – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН).

С. В. Станкевич – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН).

Е. В. Бородай – старший научный сотрудник Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН).

REFERENCES

1. Zhu, F. (2017). Structures, physicochemical properties, and applications of amaranth starch. Crit Rev Food Sci Nutr, 57(2), 313-325. doi: 10.1080/10408398.2013.862784.

2. Urubkov, S.A., Khovanskaya, S.S., Smirnov, S.O. Comparativeanalysis of the glycemic index of amaranth and other gluten-free products. Machinery and technology of food production. 2019. Vol. 49, No. 4. pp. 629-634. (In Russ.). doi: 10.21603/2074-9414-2019-4-629-634.

3. Rachkova, V.P., Suraeva, N.M., Glazkov, S.V., Samoylov, A.V. Spectrophotometric determination of starch in tomato products with anthrone reagent // Bulletin of KrasGAU, 2018, No. 6(141), pp. 187-193. (In Russ.).

4. Ovando, M., Whitney, K., Simsek, S. (2013). Analysis of starch in food systems by high performance size exclusion chromatography. Journal of Food Science, 78(2), 192-198. doi: 10.1111/1750-3841.12037.

5. Zhao, S., Ren, Y., Wei, C. (2023). Staining Starch with Iodine Solution. Methods Mol Biol, 2566, 281-290. doi: 10.1007/978-1-0716-2675-7_23.

6. Deineka, L.A., Deineka, V.I., Gostischev, I.A., Sorokopudov, V.N., Sirotin, A.A. Determination of squalene in seeds of some plants of the Amaranthaceae family // Chemistry of plant raw materials. 2008. No. 4. pp. 69-74. (In Russ.).

7. Samoilov, A.V., Suraeva, N.M., Rachkova, V.P., Petrov, A.N. Assessment of the starch content in tomato ketchup // Food industry. 2020. No. 9. pp. 26-29. (In Russ.). doi: 10.24411/0235-2486-2020-10093.

8. Ofitserov, E.N., Gultikova, M.V., Lentishenko, L.V., Kalistratova, A.V. IR spectroscopy express method for quantitative determination of protein and carbohydrates in amaranth seed products. Butlerov Communications C. 2024. Vol. 7. No. 2. Id. 12. (In Russ.). doi: 10.37952/ROI-jbc-01/24-78-6-126/ROI-jbc-C/24-7-2-12.

9. Panova, T.M., Shchegolev, A.A. Technology and equipment forprocessing plant raw materials // Methodological guidelines for the implementation of laboratory practice for full-time and part-time students. Direction 240100 "Chemical technology and biotechnology". Yekaterinburg, UGLTU, 2010. 17 p. (In Russ.).

10. Big workshop "Biochemistry". Laboratory work: educational. manual / comp. M.G. Kusakina, V.I. Suvorov, L.A. Chudinova ; Perm State National University. research. un-t. Perm, 2012. 148 p. (In Russ.).

11. Skobelskaya, Z.G. The use of amaranth flour in the production of wafer sheets of increased nutritional value / Z.G. Skobelskaya, M.G. Balykhin, S.D. Khasanova [et al.] // Achievements of science and technology of the agroindustrial complex. 2020. Vol. 34. No. 6. pp. 92-96. (In Russ.). doi: 10.24411/0235-2451-2020-10618.

12. Orlova, T.V., Aider, M. Starch of quinoa grain (Chenopodium quinoa Willd.): composition, morphology and physicochemical properties // Machinery and technology of food production. 2021. Vol. 51, No. 1. pp. 98-112. (In Russ.). doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-98-112.

13. López, D.N., Galante, M., Robson, M., Boeris, V., Spelzini, D. (2018). Amaranth, quinoa and chia protein isolates: Physicochemical and structural properties. Int J Biol Macromol, 109, 152-159. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.12.080.

Information about the authors

K.N. Nitsievskaya - Candidate of Technical Sciences, Leading researcher Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences.

S.V. Stankevich - Candidate of Agricultural Sciences, Senior researcher Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences.

E.V. Boroday - Senior researcher Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 58–63.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 58–63.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.6/.7: 664.6
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.008 EDN: XJXDQR

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСТРУДИРОВАННОГО ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ

Наталья Сергеевна Герасимова [1], Марина Анатольевна Янова [2], Наталья Станиславовна Козулина [3], Александр Владимирович Бобровский [4]

[1, 3, 4] Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия
[1] nata.gerasimova.1982@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-4517-6071
[3] kozulina.n@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-9081-7464
[4] aleksandr_bobrovski@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7302-2169
[2] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет», Красноярск, Россия
[2] yanova.m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6597-0000

Аннотация. *В данной работе исследуется возможность использования экструдированного зерна пшеницы для повышения пищевой ценности хлебобулочных изделий. В хлебопекарной индустрии перспективным направлением является применение экструдированных зерновых продуктов для обогащения хлебобулочных изделий функционального назначения. Цель исследования – разработка рецептуры и оценка качества хлебобулочных изделий из пшеничной муки с использованием экструдированного зерна пшеницы. Объектом исследования было зерно пшеницы сорта Новосибирская 15 и экструдированное зерно пшеницы этого же сорта, прошедшее стадию помола (далее пшеничный экструдат). Исследования проведены по следующим показателям качества: содержание белка, количество и качество сырой клейковины, объем хлеба, общая хлебопекарная оценка. Химический состав и энергетическая ценность 100 г хлеба из пшеничной муки и хлеба определялись с заменой пшеничной муки на пшеничный экструдат в количестве 5 % и 7 %. Разработана рецептура хлеба с заменой пшеничной муки на пшеничный экструдат, выпечка проведена согласно ГОСТ 27669-88. В зависимости от увеличения дозировки пшеничного экструдата отмечено улучшение качества клейковины. Наиболее высокие показатели объема хлеба у вариантов с заменой муки пшеничной на пшеничный экструдат в количестве 5 % и 7 % – объем хлеба составил 590 см^3 и 510 см^3 соответственно. Энергетическая ценность хлеба с 5 % и 7 % пшеничного экструдата снижается на 2–6 Ккал соответственно. В ходе исследования было выявлено, что применение пшеничного экструдата в производстве хлеба может способствовать улучшению питательных свойств продукта и уменьшению его калорийности.*

Ключевые слова: *экструдированное зерно пшеницы, пшеничный экструдат, хлебопекарные свойства, белок, клейковина, пищевая ценность.*

Для цитирования: Герасимова Н. С., Янова М. А., Козулина Н. С., Бобровский А. В. Разработка рецептуры и оценка качества хлебобулочных изделий с использованием экструдированного зерна пшеницы // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 58–63. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.008. EDN: https://elibrary.ru/XJXDQR.

Original article

FORMULATION DEVELOPMENT AND QUALITY ASSESSMENT OF BAKERY PRODUCTS USING EXTRUDED WHEAT GRAIN

Natalia S. Gerasimova [1], Marina A. Yanova [2], Natalia S. Kozulina [3], Alexander V. Bobrovsky [4]

[1, 3, 4] Krasnoyarsk Scientific Research Institute of Agriculture is a separate subdivision of the Federal State budgetary scientific institution Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia
[1] nata.gerasimova.1982@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8204-0000
[3] kozulina.n@bk.ru, https: orcid.org/0000-0002-9081-7464
[4] aleksandr_bobrovski@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7302-2169
[2] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Krasnoyarsk State Agrarian University", Krasnoyarsk, Russia
[2] yanova.m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6597-0000

© Герасимова Н. С., Янова М. А., Козулина Н. С., Бобровский А. В., 2026

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСТРУДИРОВАННОГО ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ

Abstract. *In this paper, the possibility of using extruded wheat grains to increase the nutritional value of bakery products is investigated. In the bakery industry, a promising direction is the use of extruded grain products to enrich bakery products of functional importance. The purpose of the study is to develop a recipe and evaluate the quality of bakery products made from wheat flour using extruded wheat grain. The object of the study was wheat grain of the Novosibirsk 15 variety and extruded wheat grain of the same variety, which passed the grinding stage (hereinafter wheat extrudate). The studies were conducted on the following quality indicators: protein content, quantity and quality of raw gluten, bread volume, and general bakery assessment. The chemical composition and energy value of 100 g of wheat flour bread and bread were determined by replacing wheat flour with wheat extrudate in amounts of 5 % and 7 %. The energy value of bread with 5 % and 7 % wheat extrudate is reduced by 2-6 Kcal, respectively. The study revealed that the use of wheat extrudate in bread production can help improve the nutritional properties of the product and reduce its caloric content.*

Keywords: *extruded wheat grain, wheat extrudate, baking properties, protein, gluten, nutritional value.*

For citation: Gerasimova, N. S., Yanova, M. A., Kozulina, N. S. & Bobrovsky, A. V. (2026). Formulation development and quality assessment of bakery products using extruded wheat grain. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 58-63. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.008. EDN: https: //elibrary.ru/XJXDQR.

ВВЕДЕНИЕ

Пшеничный хлеб является основным продуктом питания для значительной части населения [1, 2]. Пшеница – это источник около половины потребляемых пищевых калорий во всем мире, богат белками, минеральными веществами (Cu, Mg, Zn, P и Fe) и витаминами (B-группа и E). В зерне пшеницы содержится рибофлавин, ниацин, тиамин и пищевые волокна, антиоксиданты и биологически активные вещества [3, 4]. Однако в наше время люди всё чаще выбирают продукты питания, которые не только насыщают организм, но и приносят ему пользу [1, 2]. Хотя в пшенице содержится множество полезных веществ, всё же наблюдается недостаток макро- и микроэлементов, аминокислот и витаминов, которые являются незаменимыми. Исходя из этого, в последнее время важной задачей для пищевой промышленности России становится актуальным повышение качества хлебобулочных изделий путем включения в их рецептуру новых нетрадиционных источников сырья, обладающих необходимыми технологическими свойствами и химическим составом, способными обогатить продукцию комплексом биологически активных веществ [5]. Одним из перспективных направлений в хлебопекарной промышленности является внесение пищевых добавок естественного происхождения, подвергнутых экструзионной обработке [6, 7].

Процесс экструзии – это интенсивное воздействие на обрабатываемое сырье температурой и давлением, которое приводит к различным изменениям его компонентов [8]. Экструзионная обработка предоставляет широкие возможности для решения ключевых задач, связанных с качеством продуктов питания: поддержание и увеличение пищевой и биологической ценности, формирование необходимых структурно-механических свойств и органолептических характеристик [9, 10]. При экструзионной обработке зерна пшеницы сохраняются отруби, которые наиболее полезны из-за содержания белка – 40 %, жира – до 10 %, сахарозы – 5 %, клетчатки – 15 % [11]. В процессе же измельчения пшеницы в муку происходит удаление оболочек и зародыша. В результате в муке содержится меньше клетчатки, минеральных веществ, жира и белка, но больше крахмала по сравнению с цельным зерном [12].

Рядом исследователей установлена целесообразность применения экструзионной обработки при производстве пшеничного хлеба [6, 13, 16]. Повышается усвояемость углеводов за счет распада их до декстринов, улучшается доступность аминокислот вследствие разрушения вторичных связей в молекулах белка [13, 15]. Повышается переваримость клетчатки, формируется однородная пористая структура продукта, более доступного для воздействия ферментов в пищеварительной системе, уничтожается патогенная микрофлора [14, 15, 16]. Шмалько Н.А. [и др.] и Пахомовым В.И. [и др.] доказано, что при добавлении экструдированных пшеничных отрубей к пшеничной муке возрастает автолитическая активность и газообразующая способность теста, повышается качество клейковины [17]. Яновой М.А. [и др.] установлено, что внесение экструдированного зерна оказывает положительное влияние на автолитическую активность муки, а также на хлебопекарные свойства [16, 18].

Актуальным направлением является применение экструдированных зерновых продуктов функционального обогащения хлебобулочных изделий.

Цель исследования – разработка рецептуры и проведение оценки качества хлебобулочных изделий из пшеничной муки с использованием экструдированного зерна пшеницы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка технологических качеств зерна проводилась в Федеральном исследовательском центре «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» КрасНИИСХ, в лаборатории технологической оценки качества зерна в соответствии ГОСТ 9353-2016 Пшеница. Технические условия [19]. Лабораторные исследования производились в трехкратной повторности.

Влажность зерна определялась с помощью анализатора влажности ЭВЛАС-2М в соответствии с ГОСТ 13586.5-93 «Определение влажности зерна».

Определение содержания белка производилось по методу Кьельдаля в соответствии с (ГОСТ 10846-91) на анализаторе белка UDK 139 в комплекте с блочным минерализатором DK 8. Метод регламентирует общие требования к определению азота.

В соответствии с ГОСТ 27839-13 «Определение количества и качества сырой клейковины в зерне пшеницы» проводилось измерение содержания и оценка качества сырой клейковины в пшеничном зерне. Свойства упругости клейковины измерялись с помощью прибора ИДК-1.

Лабораторная пробная выпечка из пшеничной муки осуществлялась в соответствии с ГОСТ 27669-88. Анализ качества хлеба включает в себя определение объёмного выхода продукта, а также органолептическую оценку его внешнего вида, включая форму, поверхность и цвет корочки. Также оценивается пористость, эластичность и цвет мякиша. Общая оценка

качества хлеба рассчитывается как среднее арифметическое значений объёмного выхода, внешнего вида, пористости, цвета мякиша и его эластичности [20].

Объекты исследования: зерно пшеницы сорта Новосибирская 15 и экструдированное зерно пшеницы этого же сорта, прошедшее стадию помола (далее пшеничный экструдат).

Производство экструдата из зерна пшеницы и экспериментальные исследования проводились в условиях Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» в КрасНИИСХ.

Пшеницу перед получением смесей отволаживали в течение 2 ч. Поскольку влажность входящего в экструдер сырья не должна превышать 20 %, а при снижении влажности менее 16 % процесс экструзии протекает нестабильно, перед экструдированием осуществляли контроль влажности экспресс-методом.

Пшеничный экструдат был получен на зерновом экструдере ЭК-100. Полученный экструдат измельчали на универсальной молотковой дробилке серии Molot-200 до крупности частиц, не превышающих 200 мкм.

Химический состав пшеничного экструдата определялся в НИИЦ ФГБОУ ВО Красноярского государственного аграрного университета [12, 18, 19]. Количество жира в пшеничном экструдате определялось методом экстракции Рэндалла в соответствии с ГОСТ 11085-2016. Расчеты пищевой ценности хлеба проводились в соответствии с рекомендациями ТР ТС 022/2011 и с использованием справочных данных [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет производился на основании унифицированной рецептуры изделия на 100 г муки. Мука пшеничная I сорта была взята для расчета рецептуры выпечки хлеба. В рецептуре производилась замена муки I сорта на экструдированную муку. Схема исследований представлена в таблице 1. Рецептура выпечки хлеба из пшеничной муки I сорта представлена в таблице 2.

Таблица 1 – Схема исследований / Table 1 – Research scheme

Продукт	Вариант / % продукта								
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
Мука пшеничная, 1 сорт	100 контроль	95	93	90	85	80	75	50	–
Пшеничный экструдат	–	5	7	10	15	20	25	50	100

Таблица 2 – Рецептуры выпечки хлеба из пшеничной муки 1 сорта с добавлением экструдата пшеницы
Table 2 – Recipes for baking bread from Grade 1 wheat flour with the addition of wheat extrudate

Вариант эксперимента	Сырье, г						
	Мука пшеничная 1 сорт	Экструдат	Дрожжи	Соль	Вода	Сахар	Итого:
1 (контроль)	100	-	3,0	1,5	65	2,5	172,0
2	95	5	3,0	1,5	65,45	2,5	172,45
3	93	7	3,0	1,5	65,63	2,5	172,63
4	90	10	3,0	1,5	65,89	2,5	172,89
5	85	15	3,0	1,5	66,34	2,5	173,34
6	80	20	3,0	1,5	66,78	2,5	173,78
7	75	25	3,0	1,5	67,22	2,5	174,22
8	50	50	3,0	1,5	69,45	2,5	176,45
9	-	100	3,0	1,5	73,9	2,5	180,9

Физико-химические и хлебопекарные качества пшеницы сорта Новосибирская 15 с добавлением пшеничного экструдата показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Физико-химические и хлебопекарные качества пшеничной муки сорта Новосибирская 15 с добавлением пшеничного экструдата

Table 3 – Physico-chemical and baking qualities of wheat flour of Novosibirsk 15 grade with the addition of wheat extrudate

Варианты опыта	Белок, %	Клейковина		Хлеб	
		Кол-во, %	Качество, ед. ИДК	Объем из 100 г муки, см³	Общая хлебопекарная оценка, балл
1	16,90	36,80	78 (II)	670	4,4
2	16,54	36,08	78 (II)	580	4,3
3	16,50	35,76	75 (I)	500	4,2
4	16,24	34,64	75 (I)	470	3,8
5	16,00	32,48	73 (I)	440	3,6
6	15,96	30,80	66 (I)	420	3,2
7	15,93	28,72	69 (I)	310	3,2
8	15,33	не отмываемая		220	2,7
9	13,45	не отмываемая		220	2,1

При определении показателя белка получены следующие результаты: контрольный вариант имеет показатель белка 16,90 %, при добавлении к пшеничной муке 5 % пшеничного экструдата, белок уменьшается на 0,36 %. Последующее увеличение дозировки пшеничного экструдата не существенно сказывается на содержании белка, так 3-й, 4-й, 5-й, 6-й и 7-й варианты имеют показатель белка 16,50 %, 16,24 %, 16,00 %, 15,96 % и 15,93 % соответственно. При добавлении 50 % пшеничного экструдата к пше-

ничной муке содержание белка уменьшается с 16,90 % до 15,30 %, что на 1,57 % меньше в сравнении с контролем. В пшеничном экструдате без добавления муки наименьшее количество белка – 13,45 %.

Исходя из данных показателей количества и качества сырой клейковины можно отметить, что по мере увеличения дозировки пшеничного экструдата количество клейковины падает с 36,80 % – 1 вариант до 36,00 % – 2 вариант. Дальнейшее увеличение процента подсортировки пшеничного экструдата ведет к большему уменьшению количества сырой клейковины. В варианте 3 количество клейковины падает на 0,32 % в сравнении с вариантом 2. Вариант 4 по количеству клейковины ниже третьего на 1,12 %. Количество клейковины в варианте 6 (добавление пшеничного экструдата 20 %) падает до 30,80 %, в варианте 7 количество клейковины также снижается – 28,72 %, что на 8,08 % ниже количества клейковины в муке из пшенице без добавления пшеничного экструдата. Добавление пшеничного экструдата к пшеничной муке сорта Новосибирская 15 в соотношениях 7 %, 10 %, 15 %, 20 % и 25 % приводит к повышению качества сырой к повышению качества сырой клейковины со второй группы (1 и 2 варианты) до первой – 75 ед., 75 ед., 73 ед., 66 ед. и 69 ед. прибора ИДК соответственно. Это можно объяснить тем, что зерно, прошедшее процесс экструзии и содержащее желатинизированный крахмал, имитирует свойства пшеничного теста, придавая вязкость и упругость неглютеновым смесям для выпечки [7]. Увеличение дозировки пшеничного экструдата укрепляет клейковину благодаря активности липоксигеназы, которая в присутствии кислорода воздуха окисляет ненасыщенные жирные кислоты, образуя пероксиды и гидропероксиды [18, 22, 23]. Возможно, что повышение качества сырой клейковины мучной смеси, состоящей из пшеничной муки и пшеничного экструдата, зависит от повышения автолитической активности и газообразующей способности в данных смесях [22, 24].

Варианты с добавлением пшеничного экструдата в количестве 50 % и 100 % характеризуются как неотмываемые.

Выпечка из пшеничной муки сорта Новосибирская 15 с подсортировкой пшеничного экструдата представлена на рисунке 1. По данным результатам исследования таблицы 3, наблюдается, что по мере увеличения дозировки пшеничного экструдата в пшеничной муке объём хлеба снижается.

Добавление пшеничного экструдата в количестве 5 % от общего количества пшеничной муки отрицательно сказывается на объеме хлеба, если показатель объема хлеба в варианте 1 достигает 670 см³, то в варианте 2 данный показатель значительно падает до 590 см³. Наиболее высокие показатели объема с добавлением пшеничного экструдата – варианты 2 и 3 – 590 см³ и 510 см³ соответственно. Последующее увеличение процента вносимого пшеничного экструдата в пшеничную муку отрицательно сказывается на объеме хлеба.

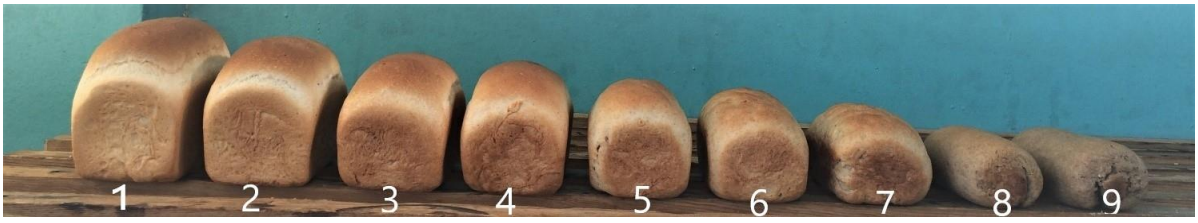


Рисунок 1 – Варианты выпеченного хлеба из муки сильного сорта Новосибирской 15 с подсортировкой пшеничного экструдата

Figure 1 – Variants of baked bread made from Novosibirsk 15 strong flour with wheat extrudate sub-sorting

Общая хлебопекарная оценка показывает, что замес пшеничной муки с подсортировкой к ней пшеничного экструдата в соотношении: мука пшеничная 95 % + 5 % пшеничный экструдат; мука пшеничная 93 % + 7 % пшеничный экструдат незначительно сказывается на снижении качества хлеба. Дальнейшее увеличение дозировки экструдата: мука пшеничная 90 % + 10 % пшеничный экструдат; мука пшеничная 85 % + 15 % пшеничный экструдат, также снижает качество хлеба, но хлебопекарные показатели не столь значительно уступают предыдущим вариантам, как последующие варианты – 6 и 7 равноценны по показателям, но в значительной мере ниже, чем варианты 7 %, 10 % и 15 % добавления пшеничного экструдата. Последующее повышение процента пшеничного экструдата к муке пшеничной в соотношении 50 % + 50 % экструдата значительно сказывается на качестве хлеба и общая хлебопекарная оценка составляет всего 2,7 балла.

Добавление к пшеничной муке 5 % и 7 % пшеничного экструдата незначительно сказывается на качестве хлеба, а дальнейшее увеличение подсортировки пшеничного экструдата ведет к ухудшению его качества. Исходя их этого, в работе были проведены исследования влияния подсортировки 5 % и 7 % пшеничного экструдата на пищевую ценность пшеничного хлеба и хлеба из пшеничной муки в чистом виде (таблица 4).

Расчет химического состава и энергетической ценности 100 г хлеба из пшеничной муки 1 сорта показал, что добавление 5 % и 7 % пшеничного экструдата положительно сказывается на показателе количества белка, белок повышается на 0,07 % и на 0,03 % соответственно. Подсортировка 5 % и 7 % пшеничного экструдата к пшеничной муке влияет на изменение показателя жира, прослеживается незначительное повышение его количества – на 0,05 г и 0,09 г соответственно. Добавление 5 % и 7 % пшеничного экструдата к муке I сорта влияет и на количество углеводов, расчет химического состава показал, что добавление пшеничного экструдата к пшеничной муке понижает количество углеводов на 0,73 г и 1,7 г соответственно. Добавление 5 % и 7 % пшеничного экструдата к муке I сорта не влияет на количество натрия, количественные изменения происходят на 0,1 мг и 0,03 мг. Количество калия при добавлении 5 % и 7 % пшеничного экструдата снижается на 3,87 мг и на 5,32 мг соответственно в сравнении с выпечкой хлеба из муки пшеничной. Подсортировка 5 % и 7 % экструдата к муке I сорта незначительно влияет на количество кальция, прослеживается его повышение лишь на 0,09 мг и на 0,01 мг соответственно. Количество фосфора при добавлении 5 % и 7 % пшеничного экструдата снижается на 2,29 мг и на 3,16 мг соответственно.

Таблица 4 – Сравнительные данные химического состава и энергетической ценности 100 г хлеба из пшеничной муки 1 сорта и с пшеничным экструдатом 5 % и 7 %

Table 4 – Comparative data on the chemical composition and energy value of 100 g of bread made from wheat flour of grade 1 and with wheat extrudate of 5 % and 7 %

Пищевые вещества, г	Хлеб из пшеничной муки I сорта	Хлеб из пшеничной муки I сорта с добавлением 5 % экструдата	Хлеб из пшеничной муки I сорта с добавлением 7 % экструдата
Белки, г	6,37	6,44	6,47
Жиры, г	0,74	0,79	0,83
Углеводы, г	41,78	41,05	40,08
Na, мг	339,39	339,49	339,52
K, мг	114,07	110,2	108,75
Ca, мг	17,79	17,88	17,89
P, мг	74,55	72,26	71,39
ЭЦ	199 Ккал / 833 кДж	197 Ккал / 824 кДж	193 Ккал / 809,9 кДж

Энергетическая ценность выпечки с добавлением 5 % пшеничного экструдата снижается на 2 Ккал, добавление 7 % пшеничного экструдата снижает энергетическую ценность в сравнении с контролем на 6 Ккал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований различных соотношений смеси пшеничной хлебопекарной муки из зерна сорта Новосибирская 15 и пшеничного экструдата показали, что с увеличением процентного содержания пшеничного экструдата содержание сырой клейковины снижается, тем не менее добавление экструдата к пшеничной муке сорта в соотношениях 7 %, 10 %, 15 %, 20 % и 25 % приводит к повышению качества сырой клейковины.

Разработана рецептура выпечки хлеба из пшеничной муки с добавлением пшеничного экструдата. В ходе работы были определены физико-химические и хлебопекарные качества хлеба из муки пшеницы сорта Новосибирская 15 с добавлением пшеничного экструдата, которые показали, что оптимальное процентное соотношение добавления пшеничного экструдата к пшеничной муке это 5 % и 7 % экструдата.

Проанализировав расчет химического состава и энергетической ценности 100 г хлеба из пшеничной муки 1 сорта, можно сделать вывод, что добавление 5 % и 7 % пшеничного экструдата положительно сказывается на показателе белка, жира и кальция. Количество углеводов снижается, что ведет к понижению калорийности хлеба.

Исследование показало перспективность использования пшеничного экструдата из экструдированного зерна в хлебопечении для повышения пищевой ценности и снижения калорийности хлебобулочных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozulina N., Lipshin A., Bobrovsky A. [et al.]. Influence of soil fertility on the yield and grain quality of spring wheat in the conditions of Central Siberia // IX International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development. Namangan, Uzbekistan, Vol. 486. Web of Conferences: EDP Sciences - Web of Conferences, 2024. P. 06005.

2. Ванина К.М. Народно-хозяйственное значение озимой пшеницы и ее роль в продовольственной безопасности страны // Студенческий. 2024. № 20–6 (274). С. 48–50.

3. Khalid A., Hameed A., Tahir M. Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality // Frontiers in Nutrition. 2023. Vol. 10. Doi: 10.3389/fnut.2023.1053196.

4. Ijarotimi O.S., Ogunjobi O.G., Oluwajuyitan T.D. Gluten free and high protein-fiber wheat flour blends: Macro-micronutrient, dietary fiber, functional properties, and sensory attributes // Food Chemistry Advances. 2022. Vol. 1. P. 100134.

5. Перспективы использования экструдированной гречихи в пивоварении и хлебопечении / Г.В. Шабурова, П.К. Воронина, А.А. Курочкин, Д.И. Фролов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 4. С. 79–83.

6. Шабурова Г.В., Волошина М.О., Казакова Е.С. Зерновые экструдаты – источники функциональных пищевых ингредиентов для булочных и мучных кондитерских изделий // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. 2013. № 6 (10). С. 112–117.

7. Юсупова Г.Г., Зданович Ю.И., Черкасова Э.И. Применение энергии СВЧ-поля для обеспечения безопасности и улучшения качества продуктов растительного происхождения // Хранение и переработка сельхозсырья. 2005. № 7. С. 27-30.

8. Воронина П.К. Практические перспективы термопластической экструзии крахмалсодержащего зернового сырья в формировании качества продовольственных товаров // Инновационная техника и технология. 2015. № 3 (4). С. 5–12.

9. Повышение качества нативной клейковины путем использования метода термопластической экструзии / Бобренева И.В., Мерников Д.А., Степанов В.И., Иванов В.В. // Перспективные биотехнологические процессы в технологиях продуктов питания и кормов. Материалы VII Международного научно-практического симпозиума. Москва : ВНИИ пищевой биотехнологии, 2014. С. 237–241.

10. Vivian O., Vassilis K., Kolawole O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2019. V. 59. No. 18. P. 2979–2998. doi: 10.1080/10408398.2018.1480007.

11. Николаева Т.А. Изучение полезных свойств отрубей применение в технологии приготовления блюд // Colloquium-journal. 2019. № 13 (37). С. 18–21.

12. Совершенствование технологии производства хлебобулочного изделия на основе измельченного проросшего зерна пшеницы / Ф.К. Хузин, З.А. Канарская, А.Р. Ивлева, В.М. Гематдинова // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 1. С. 178–187. doi: 10.20914/2310-1202-2017-1-178-187.

13. Аверин Н.Е. Использование экструдированных зерновых продуктов в технологии хлебобулочных изделий функционального назначения // Пищевая промышленность. 2007. № 5. С. 5–9.

14. Курочкин А.А., Зимяков В.М. Теоретическое обоснование конструктивно-технологической схемы модернизированного термовакуумного экструдера // Нива Поволжья. 2021. № 2(59). С. 128–134.

15. Технология экструзионных продуктов / А.Н. Остриков, Г.О. Магомедов, Н.М. Дерканосова, В.Н. Василенко, О.В. Абрамов, К.В. Платов. Санкт-Петербург : Проспект науки, 2007. 202 с.

16. Янова М.А., Присухина Н.В., Мельникова Е.В. Модификация компонентов рецептурного состава хлебобулочных изделий с применением текстурированных смесей // Вестник КрасГАУ. 2020. № 2 (155). С. 117–126.

17. Шмалько Н.А., Беликова А.В., Росляков Ю.Ф. Использование экструдированный продуктов в хлебопечении // Фундаментальные исследования. 2007. № 7. С. 90–92.

18. Янова М.А., Присухина Н.В., Горбунова Т.А. Влияние текстурированных продуктов из зернового сырья на состояние углеводно-амилазного комплекса в мучных смесях для хлебобулочных изделий // Вестник КрасГАУ. 2019. № 11 (152). С. 127–132.

19. Изменение показателей качества сырой клейковины в зависимости от содержания текстурированной муки в тесте / Н.С. Герасимова, И.А. Чаплыгина, В.В. Матюшев, Л.В. Плеханова // Актуальные вопросы переработки и формирование качества продукции АПК: Материалы II Международной научной конференции. Красноярск : КрасГАУ, 2023. С. 124–127.

20. ГОСТ 27669-88. Межгосударственный стандарт. Мука пшеничная хлебопекарная. Лабораторная пробная выпечка из пшеничной муки. Москва : Стандартинформ, 2007. 10 с.

21. Химический состав российских пищевых продуктов : Справочник. Под ред. член-корр. МАИ, проф. И.М. Скурихина, академика РАМН, проф. В.А. Тутельяна. Москва : ДеЛипринт, 2002. 236 с.

22. Химический состав и питательность зерна пшеницы, ячменя и кукурузы в зависимости от способов подготовки их к скармливанию / Н.Н. Швецов, Н.П. Зуев, М.М. Наумов, А.И. Булгаков, М.Р. Швецов [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. № 12 (134). 2015. С. 6.

23. Малкина В.Д. Повышение эффективности хлебопекарного производства на основе модификации свойств сырья : автореферат дис. … д-ра техн. наук: 05.18.01. Москва, 1996. 50 с.

24. Технологии и оборудование для экструдирования растительного сырья : учеб. пособие / В.И. Пахомов, Д.В. Рудой, Т.И. Тупольских, А.Н. Соловьев [и др.]. Донской государственный технический университет. Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2018. 108 с.

Информация об авторах

Н. С. Герасимова – научный сотрудник лаборатории технологической оценки качества зерна КрасНИИСХ, ФИЦ КНЦ СО РАН, аспирант ФИЦ КНЦ СО РАН.

М. А. Янова – доктор технических наук, доцент кафедры Технологии хлебопекарного, кондитерского и макаронного производств ФГБОУ ВО Красноярский государственный аграрный университет.

Н. С. Козулина – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории сортовых агротехнологий КрасНИИСХ, ФИЦ КНЦ СО РАН.

А. В. Бобровский – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сортовых агротехнологий КрасНИИСХ, ФИЦ КНЦ СО РАН.

Information about the authors

N.S. Gerasimova - is a researcher at the Laboratory of Technological Assessment of Grain Quality at KrasNIISKH, FITC KSC SB RAS, postgraduate student at FITC KSC SB RAS.

M.A. Yanova - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Bakery, Confectionery and Pasta Production, Krasnoyarsk State Agrarian University.

N.S. Kozulina - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Varietal Agrotechnology, KrasNIISKH, FITC KSC SB RAS.

A.V. Bobrovsky - candidate of Agricultural Sciences, a leading researcher at the Laboratory of Varietal Agrotechnologies of KrasNIISKH, FITC KSC SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 64–69.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 64–69.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК664
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.009 EDN: YUOIDU

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИГОДНОСТИ ДЛЯ ХЛЕБОПЕКАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ ОРЛОВСКОЙ СЕЛЕКЦИИ

Евгения Викторовна Хмелева [1], Дмитрий Николаевич Королев [2], Роман Хажсетович Кандроков [3], Владимир Сергеевич Сидоренко [4], Иван Александрович Хмелев [5]

[1] Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина
[2, 5] Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Россия
[3] Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия
[3] ФГАНУ «НИИ хлебопекарной промышленности», Москва, Россия
[4] ФНЦ Зернобобовых и крупяных культур, Орел, Россия,

[1] hmelevaev@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-3867-6992
[2] vap4317@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-4273-4261
[3] nart132007@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2003-2918
[4] w.s.sidorenko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9921-6105
[5] xmivan@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-1104-2682

Аннотация. *Выпуск качественной продукции мукомольных и хлебопекарных предприятий во многом зависит от технологических характеристик зерна, определяющих его пригодность обеспечивать необходимые характеристики муки согласно назначению. В настоящее время одним из основных направлений работы селекционных лабораторий НИИ является создание новых сортов озимой пшеницы с высоким потенциалом продуктивности и качественными характеристиками зерна. Учитывая большую зависимость качества муки и хлебобулочных изделий от технологического потенциала зерна, актуальными представляются исследования, посвященные комплексной оценке качества новых сортов пшеницы Орловской селекции: озимой мягкой пшеницы сортов Синева, Орловская 32 и озимой твердой пшеницы сорта Тургеневская. Работа посвящена оценке показателей качества пшеницы изучаемых сортов; разработке помольных смесей для обеспечения стабильности выхода и качественных показателей муки; обоснованию технологической пригодности муки для хлебопекарного производства, полученной из зерна мягкой и твердой пшеницы, и помольных смесей на их основе. Экспериментально определены и проанализированы основные качественные показатели пшеницы (содержание крахмала, белка, клейковины), результаты которых легли в основу составления помольных партий зерна, обеспечивающих высокие мукомольные достоинства зерна и хорошие хлебопекарные свойства муки. Проведена оценка важного хлебопекарного показателя (силы муки) по количеству и качеству сырой клейковины, а также по реологическим свойствам замешанного теста (водопоглотительная способность, энергия, растяжимость теста, устойчивость к растягиванию и отношение устойчивости теста к растяжимости) с последующими технологическими рекомендациями к использованию полученной муки.*

Ключевые слова: *пшеница, технологические свойства, мука, клейковина, реологические характеристики, хлебопекарное производство.*

Благодарности: *авторы выражают признательность коллегам Казанского национального исследовательского технологического университета лаборатории «Оценки качества продовольственного сырья и пищевой продукции» за помощь в проведении исследований реологических свойств теста.*

Для цитирования: Оценка технологической пригодности для хлебопекарного производства озимой пшеницы орловской селекции / Е. В. Хмелева [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 64–69. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.009. EDN: https://elibrary.ru/YUOIDU.

Original article

ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL SUITABILITY OF WINTER WHEAT OF ORYOL SELECTION FOR BREAD PRODUCTION

Eugenia V. Khmeleva [1], Dmitry N. Korolev [2], Roman Kh. Kandrokov [3], Vladimir S. Sidorenko [4], Ivan A. Khmelev [5]

[1] N.V. Parakhin Oryol State Agrarian University
[2, 5] I.S. Turgenev Orel State University, Orel, Russia
[3] Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia

© Хмелева Е. В., Королев Д. Н., Кандроков Р. Х., Сидоренко В. С., Хмелев И. А., 2026

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИГОДНОСТИ ДЛЯ ХЛЕБОПЕКАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ ОРЛОВСКОЙ СЕЛЕКЦИИ

[3] Federal State Research Institute of the Bakery Industry, Moscow, Russia
[4] Federal Research Center for Legumes and Cereals, Orel, Russia

[1] hmelevaev@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-3867-6992
[2] vap4317@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-4273-4261
[3] nart132007@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2003-2918
[4] w.s.sidorenko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9921-6105
[5] xmivan@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-1104-2682

Abstract. *The production of high-quality flour and bakery products largely depends on the technological characteristics of the grain, which determine its suitability for providing the necessary flour characteristics for the intended purpose. Currently, one of the main areas of research in the breeding laboratories of the Research Institute is the development of new varieties of winter wheat with high productivity potential and grain quality characteristics. Given the significant impact of grain quality on the quality of flour and bakery products, research on the comprehensive assessment of the quality of new varieties of wheat developed by the Oryol Research Institute, such as the winter soft wheat varieties Sineva and Oryolskaya 32, and the winter hard wheat variety Turgenevskaya, is particularly relevant. The work is devoted to the assessment of the quality indicators of the studied wheat varieties; the development of grinding mixtures to ensure the stability of the yield and quality indicators of flour; the substantiation of the technological suitability of flour for bakery production obtained from soft and hard wheat grains, and grinding mixtures based on them. The main quality indicators of wheat (starch, protein, and gluten content) were experimentally determined and analyzed, and the results were used to create grinding batches of grain that ensure high flour qualities and good baking properties of flour. An important baking parameter (flour strength) was evaluated based on the quantity and quality of raw gluten, as well as the rheological properties of the kneaded dough (water absorption capacity, energy, dough extensibility, resistance to stretching, and the ratio of dough resistance to extensibility), followed by technological recommendations for using the resulting flour.*

Keywords: *wheat, technological properties, flour, gluten, rheological characteristics, and bakery production.*

Acknowledgements: *The authors express their gratitude to the colleagues of the Kazan National Research Technological University Laboratory for Quality Assessment of Food Raw Materials and Food Products for their help in conducting research on the rheological properties of the dough.*

For citation: Khmeleva, E. V., Korolev, D. N., Kandrokov, R. Kh., Sidorenko, V. S. & Khmelev, I. A. (2026). Assessment of technological suitability of winter wheat of oryol selection for bread production. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 64-69. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.009. EDN: https: //elibrary.ru/YUOIDU.

ВВЕДЕНИЕ

Зерно играет ключевую роль в экономике любой страны, обеспечивая продовольственную безопасность и стабильность аграрного сектора. Наращивание объемов производства зерна способствует не только развитию сельского хозяйства, но и стимулирует работу предприятий перерабатывающей отрасли. Так, выпуск качественной продукции мукомольных и хлебопекарных предприятий во многом зависит от технологических характеристик и объемов собранного урожая зерна. В настоящее время одним из основных направлений селекционной работы является создание новых сортов озимой пшеницы с высоким потенциалом продуктивности и качественными характеристиками зерна.

Под технологической пригодностью зерна пшеницы для последующей переработки в мукомольном и хлебопекарном производствах, как правило, понимают совокупность критериев, обуславливающих получение муки с определенными качественными характеристиками, определяющими ее последующее назначение для использования. Эти критерии представлены различными показателями качества зерна, отвечающими за определенные показатели качества муки, и в конечном счете готовой продукции (хлебобулочных изделий). Исследования, посвященные изучению технологических свойств зерна новых сортов, актуальны и значимы для зерноперерабатывающей и хлебопекарной отрасли [1–3].

В процессе селекционно-генетических работ в ФНЦ «Зернобобовых и крупяных культур» созданы новые высокоурожайные и устойчивые к болезням и неблагоприятным климатическим условиям сорта мягкой пшеницы Синева (патент № 10109), Орловская 32 (патент № 13695) и сортообразец твердой пшеницы Тургеневская, оценка технологической пригодности для хлебопекарной отрасли, которая проводилась в работе [4].

Зерновая культура пшеница является классическим видом сырья для выработки хлебопекарной муки. Важным аспектом для хлебопечения стало принятие отдельного стандарта на зерно пшеницы, используемое именно для переработки в муку – ГОСТ 34702-2020 «Пшеница хлебопекарная. Технические условия». Данный стандарт отразил критерии по качеству зерна пшеницы, особо важные для последующих переработчиков муки – технологов хлебопечения, с позиции формирования муки с определенными хлебопекарными свойствами [5]. Стандарт подразделяет зерно пшеницы на 4 группы в зависимости от ряда технологических показателей самого зерна (содержание белка, клейковины, стекловидности, числа падения и др.), структурно-механических свойств теста и качества готовых изделий (объемный выход хлеба, его пористость и органолептические характеристики). Рекомендуемые данным документом показатели в конечном счете определяют основной критерий технологического достоинства – силу пшеницы, которая, в свою очередь, влияет на рекомендательные характеристики и ограничения при целевом использовании пшеницы и смешивании различных партий зерна для помола в обеспечении требуемых качественных показателей хлебопекарной муки и рациональной переработки зерна на предприятии.

Выбор используемых в работе сортов пшеницы связан с повышенным содержанием в зерне белка (14–15,5 % в зависимости от сорта), важного структурообразующего технологического компонента хлебопекарного теста, определяющего силу пшеницы и смолотой из нее муки. Включение в ряд экспериментов твердой пшеницы (сорт Тургеневская) и установление ее хлебопекарных свойств связано с возможностью рассмотрения ее добавления при составлении помольных партий с мягкой пшеницей с целью компенсации недостающих компонентов и получения муки высокого качества.

Цель исследований – изучение технологической пригодности для хлебопекарной отрасли зерна ози-

мой мягкой и твердой пшеницы Орловской селекции (Синева, Орловская 32, Тургеневская).

Структура исследований:

- изучение основных технологических показателей зерна, определяющих хлебопекарное качество пшеницы и муки;

- обоснование и разработка помольных смесей для обеспечения стабильности выхода и качественных показателей пшеничной муки;

- определение силы муки и обоснование технологической пригодности для хлебопекарного производства.

МЕТОДЫ

Исследования проводились, используя сорта зерна озимой пшеницы урожая 2021 г. – Синева, Орловская 32 и Тургеневская, выращенные на опытных участках селекционного центра (Орловская область). Из представленных сортов зерна получали сортовую пшеничную муку (высший и первый сорт) как при непосредственном их измельчении, так и после составления помольных смесей. Для измельчения использовали мельницу лабораторного помола МЛП-4.

Методы исследований:

- оценка показателей качества зерна пшеницы – содержание протеина, сырой клейковины, крахмала, седиментация (по Зелени) – на ИК анализаторе цельного зерна «Infratec 1241»; массовая доля влаги по ГОСТ 13586.5-2015;

- оценка технологических свойств муки – влажность муки по ГОСТ 9404-88; количество и качество клейковины пшеничной муки по ГОСТ 27839-2013; реологические свойства тестовых полуфабрикатов на приборах Экстенсограф-Е и Фаринограф Brabender.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку качество зерна определяется во многом его химическим составом и свойствами [6, 7], влияет на выход и качество муки целесообразным считали провести оценку изучаемых сортов пшеницы по физико-химическим и технологическим показателям зерна (табл. 1). Оценивая данные экспресс-анализа (ИК анализатор), делаем предварительное заключение о технологическом достоинстве (согласно ГОСТ 34702-2020) исследуемых образцов зерна.

Таблица 1 – Физико-химические показатели качества зерна / Table 1 – Physico-chemical indicators of grain quality

Сорт озимой пшеницы	Физико-химические показатели качества зерна, %				
	Крахмал	Протеин	Влажность	Содержание клейковины	Седиментация
Синева	68,5	12,1	10,1	22,4	38,9
Тургеневская	64,3	14,4	13,4	25,8	56,9
Орловская 32	64,0	15,4	12,1	28,6	57,5

Выявили несоответствие по количеству белка и клейковины в пшенице сорта Синева заявленным производителем характеристикам, что является фактором явно пониженных хлебопекарных свойств, ограничивающих ее целевое использование для получения хлебопекарной муки. Синева может выступать филлером в помольной смеси с пшеницей сильной или средней. Оценка потенциала твердой озимой пшеницы сорта Тургеневская показала хорошее содержание белка – 14,4 %, которое позволяет отнести зерно к группе сильной пшеницы, но учитывая несоответствующее содержание клейковины (25,8 %), как наиболее важного компонента, формирующего хлебопекарное достоинство зерна и муки, зерно отвечает критериям группы средней по силе (ценной по качеству) пшеницы. Наилучшими показателя качества (по содержанию белка и клейковины, качеству клейковины (седиментации)) обладала мягкая озимая пшеница сорта Орловская 32 – 15,4 %, 28,6 %, 57,5 % соответственно); попадающая в категорию сильной пшеницы (пшеницы-улучшителя). Такая пшеница обеспечивает при помоле получение муки с требуемыми показателями качества, а также на производстве часто используется для подсортировки к зерну более низкого качества [8].

Полученные результаты были использованы для рекомендаций по составлению помольных смесей из исследуемых партий пшеницы разных сортов с целью обеспечения соответствующих требованиям ГОСТ показателей качества пшеничной хлебопекарной муки.

Ключевыми показателями зерна пшеницы, имеющими высокую корреляционную связь и определяющими качество хлеба, являются содержание белка и клейковины в зерне. Основываясь на этом, были сформированы такие помольные смеси: № 1 – Орловская 32 + Синева (50 % + 50 %) и № 2 – Орловская 32 + Синева + Тургеневская (50 % + 35 % + 15 %). Основные технологические показатели составленных помольных смесей из пшеницы разных сортов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели качества помольных смесей / Table 2 – Quality indicators of grinding mixtures

Помольные смеси	Физико-химические показатели качества зерна					
	Влажность, %	Натура, г/л	Содержание белка, %	Содержание клейковины, %	ИДК клейковины	Число падения, с
Помольная смесь № 1	11,6	756	13,5	25,0	72	258
Помольная смесь № 2	11,4	758	13,8	25,4	75	245

Подбор компонентов смеси позволил обеспечить высокие мукомольные достоинства зерна и спрогнозировать хорошие хлебопекарные свойства муки (при сортовом помоле количество клейковины в пшенице должно быть не менее 25 %). Стоит отметить, что введение в помольные смеси для получения хлебопекарной муки твердой пшеницы, которая традиционно используется для помола в макаронную муку, позволило получить высокие значения в смеси таких показателей, как содержание белка и клейковины, необходимых для обеспечения требуемого ГОСТом содержания клейковины в муке. В работах некоторых исследователей (Казанская Л.Н., Кузнецова Л.И., Шаболкина Е.Н., Анисимкина Н.В. и др.) также подтверждается эффективность применения твердых пшениц в хлебопечении.

Из всех сортов пшеницы и предложенных помольных смесей были получены образцы хлебопекарной муки высшего и первого сортов. Последующий этап работы заключался в оценивании хлебопекарного достоинства муки.

Хлебопекарные свойства муки отвечают за получение хлебобулочных изделий определенного качества и определяются совокупностью целого ряда показателей, некоторые из которых взаимосвязаны и оказывают либо прямое, либо косвенное влияние друг на друга. Из этого числа показателей выделяют силу муки как наиболее технологически важный показатель хлебопекарных свойств пшеничной муки, по которому специалисты могут прогнозировать качество будущего хлеба. Технологическая роль силы пшеничной муки имеет весомое значение: в первую очередь предопределяет количество связанной воды на стадии замеса теста, в дальнейшем определенно отражается на реологических показателях теста в процессе его механической разделки и расстойки, и в итоге безусловно формирует важнейшие для потребителя качественные характеристики хлеба – объем, пористость, усвояемость его мякиша, сохранение формы заготовок. Сила пшеничной муки и соответственно качество хлеба во многом зависят от содержания в муке клейковины и ее физических свойств (белок клейковины глиадин отвечает за растяжимость клейковины, а глютенин, напротив, обладает свойствами упругости). Клейковина – это гидратированная масса, получаемая при отмывании теста водой и представляющая собой упруго-эластичную массу с определенными свойствами. Роль клейковины в хлебопекарном производстве велика – она является каркасом теста и будущего изделия, за счет своей растяжимости и упругости способна задерживать выделяющийся при брожении теста углекислый газ, обеспечивать форму, объем и пористость изделий. Клейковина – один из самых главных критериев формирования хлебопекарных достоинств зерна пшеницы (определяет силу), получаемой из него муки [9].

Содержание сырой клейковины и ее качественная характеристика (ИДК) в полученных образцах сортовой муки представлены на рисунке 1.

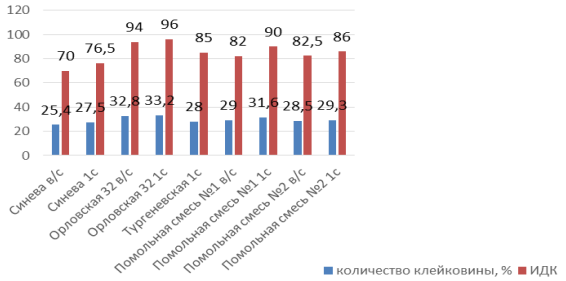


Рисунок 1 – Количество и качество сырой клейковины пшеничной муки

Figure 1 – The quantity and quality of raw gluten in wheat flour

Выявлена существенная разница в отношении содержания в полученных в ходе помола сортах пшеничной муки количества клейковины и ее качественных показателей.

Высокое содержание удовлетворительно слабой (94–96 ед. прибора ИДК) клейковины зафиксировано в пробах муки высшего и первого сортов, полученные из пшеницы сорта Орловская 32–32,8–33,2 % соответственно. При таком качестве клейковины муки, обладающей низкими упругими свойствами, высокой растяжимостью, плохой эластичностью и неспособностью удерживать форму, сложно получить удовлетворительные объем и пористость изделий, что требует технологической корректировки (применение улучшителей, регулирование параметров замеса, брожения, расстойки заготовок и др.) в ходе производства хлеба.

Анализ количественного содержания клейковины в образцах муки из пшеницы Синева и Тургеневская показал невысокие значения в отношении массовой доли сырой клейковины, не соответствующие требованиям ГОСТ к высшему и первому сортам пшеничной муки. Среди всех сортов заметно выделяются результаты качественной оценки сырой клейковины из муки сорта Синева (70 и 76,5 ед. ИДК).

Составленные помольные смеси обеспечили выравнивание основных качественных показателей, что позволило получить на выходе хлебопекарную муку с соответствующими требованиям ГОСТ критериями содержания и качества клейковины (основополагающих факторов формирования объема и пористости хлеба [8]): количество и качество клейковины в муке высшего и первого сортов из помольной смеси № 1 составило 29–31,6%, 82–90 ед. ИДК, из помольной смеси № 2 – 28,5–29,3 %, 82,5–86 ед. ИДК соответственно.

Важно отметить, что силу муки неверно оценивать только по показаниям ИДК, поскольку не учитываются такие важные факторы, как реальное соотношение клейковины с другими компонентами, сила клейковинных связей, степень повреждения крахмала, влияние некрахмальных полисахаридов на консистенцию теста и прочее. Поэтому в последнее время во многих научно-исследовательских лабораториях и на крупных современных предприятиях дополнительно определяют реологические свойства теста, показывающие структурно-механические характеристика теста на различных стадиях технологического процесса (начиная с замеса теста), которые позволяют не только оценивать хлебопекарные свойства муки, но и прогнозировать качество готового продукта и давать рекомендации по дальнейшему использованию анализируемой муки для различных технологий (Фариограф, Миксолаб, Альвеограф, Экстенсограф и др.) [10].

Реологические характеристики исследуемых образцов определяли на Экстенсографе-Е фирмы Brabender с предварительным замешиванием теста на Фариографе в течение 5 минут, позволяющие оценить водопоглотительную способность муки и свойства растяжения теста (сопротивляемость растяжению и растяжимость теста), характеризующих силу муки и соответственно свойства теста при его машинной обработке (табл. 3–5).

Таблица 3 – Реологические свойства теста из пшеничной муки на Фариографе

Table 3 – Rheological properties of wheat flour doughona Pharynograph

Наименование показателя	Значение показателя для сортов пшеничной муки из зерна								
	Синева		Орловская 32		Тургеневская	из смеси № 1		из смеси № 2	
	В/с	1с	В/с	1с	1с	В/с	1с	В/с	1с
Время образования теста, мин	1,1	1,2	2,2	4,6	3,5	1,4	4,5	1,6	2,1
Водопоглощение, %	57,6	60,5	64,4	68,5	68,1	62,9	78,1	62,5	63,9

В ходе анализа водопоглотительной способности (ВПС) исследуемых проб муки – основного фактора, влияющего на консистенцию теста (табл. 3), установили, что мука, полученная из зерна сортов Орловская 32 и Тургеневская, имела достаточно высокие значения водопоглощения – 64,4 и 68,5 % соответственно, что, возможно, связано со степенью повреждения крахмала при размоле, принимая во внимание тот факт, что при помоле твердых пшениц крахмал повреждается сильнее, и образцы муки не отличались высокими показателями белкового комплекса (рис. 1). Использование муки с такой ВПС требует корректировки технологических параметров замеса теста (продолжительность замеса, расчет воды).

Замешенное тесто после трехэтапной отлежки (45, 90 и 135 мин) подвергалось растягиванию до разрыва с целью установления определенных реологических показателей, характеризующих силу муки.

Обобщая полученные экстенсографические характеристики теста (табл. 4), отметили, что образцы из пшеницы сорта Синева отличались хорошей энергией на всех трех этапах отлежки и обладали устойчивостью к растягиванию, определяя прочность теста и соответственно силу муки (чем сильнее мука, тем больше энергии требуется для растягивания теста), что соответствует средней (хорошей) по силе пшеничной муке. В то время как образцы муки из пшеницы сортов Орловская 32 и Тургеневская имели достаточно низкие значения, соответствующие слабой по силе пшеничной муке. Следует отметить, что по показателям содержания белка и клейковины эти образцы муки имели лучшие характеристики, соответствуя пшеницеулучшителю и средней по силе, что доказывает необходимость и важность оценки хлебопекарного достоинства зерна по реологическим свойствам теста.

Таблица 4 – Реологические свойства теста из пшеничной муки на Экстенсографе
Table 4 – Rheological properties of wheat flour dough on an Extensograph

Наименование показателя	Время отлежки теста, мин	Значение показателя для образца				
		из зерна сорта Синева		из зерна сорта Орловская 32		из зерна сорта Тургеневская
		В/с	1с	В/с	1с	1с
Энергия, см^2	45	102,1±12	99,5±0,5	91±0,5	54,1±1	50,1±1,1
	90	143,8±14,4	127,5±9,3	84,5±4,2	58,5±1,6	56,5±1,2
	135	133,3±15,6	136,7±2,1	86,8±0,5	53,9±0	58,9±0,1
Устойчивость к растягиванию, ЕЭ	45	403±26	472,5±26,5	356,5±3,5	227,5±4,5	226,5±4,2
	90	611±37	675,5±20,5	383±13	233,5±4,5	237,5±4,5
	135	673,5±13,5	751±34	381,5±7,5	241±1	242±1,01
Растяжимость, мм	45	142,8±3,3	129,4±4,6	145,9±0,8	148,6±0,3	130±0,3
	90	136,9±5,8	121,8±4,3	134,7±0,8	151,3±0,3	135,3±0,2
	135	122,6±8,5	121,2±0,8	133,9±1,3	138,9±0	138,9±0,1
Отношение устойчивости к растяжимости	45	2,82±0,12	3,66±0,34	2,44±0,01	1,53±0,03	1,55±0,03
	90	4,46±0,08	5,55±0,03	2,84±0,12	1,54±0,04	1,56±0,04
	135	5,51±0,27	6,2±0,32	2,85±0,08	1,74±0,01	1,7±0,01

Таблица 5 – Реологические свойства теста из пшеничной муки на Экстенсографе
Table 5 – Rheological properties of wheat flour dough on an Extensograph

Наименование показателя	Время отлежки, мин	Значение показателя для сортов пшеничной муки:			
		Помольная смесь № 1		Помольная смесь № 2	
		В/с	1с	В/с	1с
Энергия, см^2	45	78,1±8,7	44,6±1	94,4±1,2	74,4±1,7
	90	100,3±1,8	42,7±2,6	112,6±3	77,6±3,3
	135	94,7±0,9	42,6±1,5	99±0,3	76,6±0,3
Устойчивость к растягиванию, ЕЭ	45	346,5±12,5	260±1	406±15	326±10
	90	380,5±5,5	258,5±4,5	450,5±3,5	350,5±2,5
	135	381±7	269±3	460,5±7,5	360,5±6,5
Растяжимость, мм	45	132,8±7,5	119,6±1,6	145,8±0,8	135,8±0,4
	90	148,9±3	114,1±4,4	152,5±3,5	132,5±3,5
	135	142,2±0,9	107,5±1,4	160,1±1	130,1±1,1
Отношение устойчивости к растяжимости	45	2,61±0,05	2,17±0,02	2,6±0,07	2,4±0,08
	90	2,56±0,09	2,27±0,04	2,75±0,05	2,65±0,05
	135	2,68±0,07	2,5±0	2,79±0,03	2,77±0,03

Проанализировав реологические характеристики теста из муки, полученной помолом составленных партий зерна (табл. 3 и 5), получили:

- высокую водопоглотительную способность муки из помольных смесей: № 1 (высшего сорта – 62,9 %, первого сорта – 68,1 %), № 2 (высшего сорта – 62,5 %, первого сорта – 63,9 %). В первом варианте полученные значения ВПС являются результатом баланса исходных компонентов по содержанию белка, клейковины и ее упругих свойств в смеси, необходимых для улучшения силы муки; во втором варианте – подсортировка твердой пшеницы (сорт Тургеневская) при составе помольной смеси позволила достигнуть хороших значений показателей содержания белка и клейковины, и тем самым отрегулировать силу муки в сторону ее улучшения, что подтверждает возможность использования сорта твердых пшениц в хлебопечении;

- показания Экстенсографа продемонстрировали хорошую энергию, устойчивость к растягиванию и отношение устойчивости теста к растяжимости (опре-

деляющей формоустойчивость подовых изделий) образцов муки, полученной из зерна предложенных помольных партий, что соответствует средней по силе пшеничной муке.

ВЫВОДЫ

Проведены комплексные исследования технологических свойств новых сортов мягкой и твердой озимой пшеницы Орловской селекции (Синева, Орловская 32, Тургеневская) для хлебопекарной отрасли, на основании которых составлены варианты помольных смесей, обеспечивающие высокие мукомольные достоинства зерна и хорошие хлебопекарные свойства муки. Показана целесообразность дополнительного использования реологических методов для оценивания силы пшеничной муки и последующих технологических рекомендаций к ее использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаймерденова Д.А. Влияние факторов на формирование технологического потенциала зерна мягкой пшеницы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2017. №79(1). С. 205–208. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1-205-208.

2. Комплексная оценка технологических свойств новых сортов пшеницы саратовской селекции для производства макаронных изделий / Е.С. Жиганова, М.К. Садыгова, В.Я. Черных [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. 2024. № 3. С. 92–103. DOI: 10.36107/spfp.2024.3.587.

3. Быкова Н.Ю., Черных В.Я., Карпушина Е.В. Система комплексной оценки технологического потенциала зерна // Научные основы устойчивого развития сельскохозяйственного производства в современных условиях : сборник научных трудов по материалам XVII научно-практической конференции. Калуга : ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха, 2024. С. 86–89.

4. Селекционные достижения федерального научного центра зернобобовых и крупяных культур : Каталог сортов / А.А. Полухин [и др.]. Орёл : Картуш, 2022. 204 с.

5. ГОСТ 34702-2020. Пшеница хлебопекарная. Технические условия : введ. 2021-03-01. Москва, 2020. 14 с.

6. Зверев С.В., Зверева Н.С. Физические свойства зерна и продуктов его переработки. М. : ДеЛи принт, 2007. 176 с.

7. Варламова А.А. Качество зерна пшеницы как сырья для производства муки и хлеба // Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения : материалы Международной студенческой научно-практической конференции. Тюмень : Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2019. С. 108–114.

8. Оценка технологического достоинства для хлебопекарной отрасли нового сорта зерна пшеницы Синева / Е.В. Хмелева [и др.] // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2024. № 1(84). С. 67–75. DOI: 10.33979/2219-8466-2023-84-1-67-75.

9. Летяго Ю.А., Белкина Р.И. Клейковина в зерне пшеницы и ее связь с хлебопекарной силой муки // Агропродовольственная политика России. 2014. № 9(33). С. 43–44.

10. Юсупова Г.Г., Бердышникова О.Н. Методы контроля качества муки по реологическим свойствам теста // Хлебопечение России. 2010. № 1. С. 17–18.

Информация об авторах

Е. В. Хмелева – кандидат технических наук, доцент Орловского государственного аграрного университета имени Н.В. Парахина.

Д. Н. Королев – аспирант кафедры «Технологии продуктов питания и организации ресторанного дела» Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева.

Р. Х. Кандроков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии хранения и переработки плодоовощной и растениеводческой продукции» Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева.

В. С. Сидоренко – кандидат сельскохозяйственных наук, зав. лабораторией селекции зерновых крупяных культур ФНЦ Зернобобовых и крупяных культур.

И. А. Хмелев – бакалавр Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева.

REFERENCES

1. Shajmerdenova, D.A. (2017). The influence of factors on the formation of the technological potential of soft wheat grain. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies, (79(1)), 205-208. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1-205-208.

2. Zhiganova, E.S., Sadygova, M.K. & Chernyh, V.Ya. (2024). Comprehensive assessment of the technological properties of new wheat varieties of Saratov breeding for the production of pasta. Storage and processing of agricultural raw materials, (3), 92-103. DOI: 10.36107/spfp.2024.3.587.

3. Bykova, N.Yu., Chernyh, V.Ya. & Karpushina, E.V. The system of integrated assessment of technological potential of grain. Scientific foundations of sustainable development of agricultural production in modern conditions: collection of scientific papers based on the materials of the XVII scientific and practical conference. Kaluga: A.G. Lorch Potato Plant.

4. Breeding achievements of the Federal Scientific Center for legumes and cereals: A catalog of varieties Katalog sortov (2022) / A.A. Poluhin. Oryol : Kartush.

5. Baking wheat. Technical specifications. (2020). HOST 34702-2020 from 1 March 2021. Moscow : Standards Publishing House.

6. Zverev, S.V. & Zvereva, N.S. (2007). Physical properties of grain and its processed products. Moscow : Delhi Print.

7. Varlamova, A.A. The quality of wheat grain as a raw material for the production of flour and bread. Actual issues of science and economy: new challenges and solutions: proceedings of the International Student Scientific and Practical Conference. Tyumen : State Agrarian University of the Northern Urals.

8. Assessment of technological advantages for the bakery industry of a new grade of wheat Sineva. (2024). E.V. Hmeleva. Technology and commodity science of innovative food products, (1(84)), 67-75. DOI: 10.33979/2219-8466-2023-84-1-67-75.

9. Letyago, Yu.A. & Belkina, R.I. (2014). Gluten in wheat grain and its relation to the baking power of flour Agri-food policy of Russia, (9(33)), 43-44.

10. Yusupova, G.G. & Berdyshnikova, O.N. (2010). Methods of flour quality control based on the rheological properties of dough. Bakery of Russia, (1), 17-18.

Information about the authors

E.V. Khmeleva - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the N.V. Parakhin Oryol State Agrarian University.

D.N. Korolev - postgraduate student of the Department of "Technologies of Food and Organization of Restaurant Business" of the I.S. Turgenev Oryol State University.

R.H. Kandrokov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Technologies of storage and processing of fruit and vegetable and crop products" of the Russian State Agrarian University - Ministry of Agriculture named after K.A. Timiryazev.

V.S. Sidorenko - Candidate of Agricultural Sciences, Head. Laboratory of Cereal and Groat Crops Selection at the Federal Research Center for Legumes and Groat Crops.

I.A. Khmelev - Bachelor of the I.S. Turgenev Oryol State University of the I.S. Turgenev Oryol State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 70–76.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 70–76.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.664
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.010 EDN: WNTUZH

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ БЕЗГЛЮТЕНОВОГО ХЛЕБА ДЛЯ ЛИЦ С ЦЕЛИАКИЕЙ

Ольга Анатольевна Корнева [1], Татьяна Александровна Джум [2], Майя Юрьевна Тамова [3], Артем Сейранович Петросян [4]

[1, 2, 3, 4] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия
[1] olya.korneva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4044-4100
[2] tatalex7@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4025-326X
[3] tamova_maya@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0710-8279
[4] artempetrosyan777@icloud.com

Аннотация. *Цель исследования – научно-технически обосновать разработку рецептур и технологий безглютенового хлеба. Задачи: нивелировать технологические факторы, усложняющие замену пшеничной муки на безглютеновые ее виды, что требует имитацию вязкоупругих свойств клейковины для структурообразования теста, оптимизировать сочетание различных видов безглютеновой муки, производимых на Кубани, и структурообразующих компонентов для достижения показателей качества, отвечающих стандартным требованиям. Проведено исследование внесения различных дозировок нутовой, гречневой и рисовой муки в сухую мучную смесь, полученную с использованием средств программного пакета Match Cad, сбалансированную по аминокислотному составу. Объектом изучения были виды безглютеновой муки и различные комбинации из них для выбора варианта, характеризующегося оптимальной структурой теста, на базе органолептики, проводимой по пятибалльной шкале профильным методом. Физико-химические и микробиологические показатели определялись стандартными методиками в соответствии с действующими ГОСТами. Разработана рецептура безглютенового хлеба с оптимизацией самой мучной смеси, включающей 50 % нутовой муки, 34 % гречневой и 16 % рисовой. Биологическим способом разрыхления теста являются дрожжи, а в качестве структурообразующих компонентов – ксантановая камедь. Для оптимизации технологии проработаны различные способы замеса и варианты выпечки. Более высокие показатели качества отмечены у изделий, полученных опарным способом и выпеченных в пароконвектомате при режиме «Конвекция». Повысить пищевую и энергетическую ценность возможно за счет введения в тесто сухофруктов и тыквенных семечек. Оптимальный срок хранения – три дня, что обосновано органолептическими, физико-химическими и микробиологическими показателями.*

Ключевые слова: *целиакия, мука, безглютеновый хлеб, оптимизация рецептуры, технология, показатели качества.*

Для цитирования: Корнева О. А., Джум Т. А., Тамова М. Ю., Петросян А. С. Разработка рецептуры безглютенового хлеба для лиц с целиакией // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 70–76. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.010. EDN: https://elibrary.ru/WNTUZH.

Original article

DEVELOPMENT OF GLUTEN-FREE BREAD FORMULATION FOR INDIVIDUALS WITH CELIAC DISEASE

Olga A. Korneva [1], Tatiana A. Dzhum [2], Maya Yu. Tamova [3], Artyom S. Petrosyan [4]

[1, 2, 3, 4] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State Technological University", Krasnodar, Russia
[1] olya.korneva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4044-4100
[2] tatalex7@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4025-326X
[3] tamova_maya@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0710-8279
[4] artempetrosyan777@icloud.com

Abstract. *The objective of this study is to scientifically and technically substantiate the development of formulations and technologies for gluten-free bread. The research aims to overcome technological challenges associated with*

© Корнева О. А., Джум Т. А., Тамова М. Ю., Петросян А. С., 2026

replacing wheat flour with gluten-free alternatives, which necessitates mimicking the viscoelastic properties of gluten to ensure proper dough structure formation. Additionally, the study seeks to optimize the combination of various types of gluten-free flours produced in the Kuban region, along with structure-forming components, to achieve quality indicators that meet standard requirements. The research involved studying the effects of different dosages of chickpea, buckwheat, and rice flours in a dry flour mix balanced for amino acid composition using the Match Cad software package. The study object included different types of gluten-free flour and their combinations, aiming to identify the option with the best dough structure, evaluated through organoleptic testing using a five-point scale and profile method. Physicochemical and microbiological parameters were determined using standard methodologies in accordance with current GOST standards. A gluten-free bread formulation was developed, optimizing the flour mix to contain 50% chickpea flour, 34% buckwheat flour, and 16% rice flour. Yeast was used as the biological leavening agent, while xanthan gum served as the structure-forming component. Various kneading techniques and baking methods were explored to optimize the process. Higher quality characteristics were observed in products prepared using the sponge method and baked in a convection-steam oven under the "Convection" setting. Nutritional and energy values can be enhanced by incorporating dried fruits and pumpkin seeds into the dough. The optimal shelf life was determined to be three days, based on organoleptic, physicochemical, and microbiological indicators.

Keywords: *celiac disease, flour, gluten-free bread, formulation optimization, technology, quality indicators.*

For citation: Korneva, O. A., Dzhum, T. A., Tamova, M. Yu., Petrosyan, A. S. (2026). Development of gluten-free bread formulation for individuals with celiac disease. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 70-76. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.010. EDN: https: //elibrary.ru/WNTUZH.

ВВЕДЕНИЕ

На Кубани выпуск локальных безглютеновых продуктов для обеспечения людей, страдающих целиакией, недостаточен, хотя с 2021 года Южный федеральный округ в России занимает лидирующие позиции по производству безглютеновой муки (гречневой, рисовой, овсяной, кукурузной) и имеет долю 48 % в общем её выпуске. В розничной торговле ассортимент для данной категории потребителей представлен мучными кондитерскими изделиями и макаронами импортного производства с высоким ценовым диапазоном.

Результаты исследований свидетельствуют о высоком уровне потребления хлебобулочных изделий из пшеничной муки среди населения как РФ, так и южных регионов [1, 2]. Однако основной компонент теста из пшеничной муки – глютен, абсолютно противопоказан даже в следовых количествах для лиц, страдающих глютеновой энтеропатией. В последние годы отмечается увеличение диагностированных случаев данного заболевания, в связи с этим разработка продукции на основе мучного безглютенового сырья является обоснованной и своевременной. Это связано ещё и с увеличением числа потребителей, придерживающихся в питании концепции здорового образа жизни, что обуславливает высокий спрос на продукцию без глютена. Одной из основных технологических проблем в производстве безклейковинной продукции является достижение достаточного уровня структурно-механических свойств, так как глютен – основной компонент, определяющий реологию теста, и, как следствие, – необходимую органолептику изделий. Структуру теста на основе безглютенового мучного сырья создают крахмальные и некрахмальные полисахариды, добавленные гидроколлоиды (ксантановая и гуаровая камеди, кукурузный или рисовый крахмал), высокобелковые компоненты (изоляты белков бобовых), а также различные эмульгаторы и разрыхлители [3]. Безглютеновые изделия характеризуются высоким содержанием крахмала, отсутствием клейковины, ограниченными сроками хранения и нетипичной структурой [4]. Если в продукции содержится не более 20 мг/кг глютена, то она относится к безглютеновой в соответствии с ТР ТС 027/2012. Основой проведенных исследований являлось:

- подбор безглютеновой муки разных видов, сопутствующих составляющих для улучшения структуры образования необходимого каркаса теста;

- определение соотношений в процентном отношении между ингредиентами рецептурного состава, направленные на оптимизацию структурно-механических свойств и эластичности готовой продукции;

- определение соответствующих способов обработки, нацеленных на минимизацию негативных коллоидно-химических процессов, таких как адгезия, при выработке функциональных продуктов питания, чтобы избежать снижение органолептических показателей.

Для разработки технологии хлеба повышенной биологической ценности необходимо оптимизировать состав безглютеновой мучной смеси. Увеличение спроса на него мотивирует производителей уделять внимание этой группе продукции при планировании своей ассортиментной политики, обогащая её питательными и биологически активными веществами.

В технологическом плане производство безглютеновой продукции – довольно сложный процесс. Это связано с тем, что требуется на всех его этапах – от транспортировки и заготовки сырья до приготовления и хранения, контроль по исключению контаминации глютеном. Для этого используются сложные иммуноферментые методы анализа, отличающиеся сложностью выполнения. Контроль наличия остаточных количеств глютена осуществляется не только в сырье и готовых изделиях, но и в смывах с технологического оборудования. Для достижения высокого уровня безопасности безглютеновой продукции необходимо организовывать ее производство таким образом, чтобы было исключено перекрестное загрязнение сырья и готовой продукции глютеном, что в первую очередь достигается исключением выработки изделий из пшеничной муки и безглютеновых изделий на одной технологической линии [5].

Цель исследования – обосновать разработку рецептур и технологию безглютенового хлеба с научно-технической точки зрения.

Задачи: для этого необходимо проанализировать сырьевую базу, выявить технологические проблемы, связанные с безглютеновым производством, обосновать выбор ингредиентов, оптимизируя их состав с учетом биологической ценности, определить рецептуру и технологию, проанализировав показатели качества, химического состава и микробиологические для допустимых сроков её хранения.

МЕТОДЫ

Основным объектом исследования является безглютеновая мука (нутовая, гречневая, рисовая),

произведенная в ЮФО, и модельные композиции самих изделий из неё. Для оценки органолептических показателей (внешний вид, форма, консистенция, запах и вкус) использован профильный метод с пятибалльной шкалой. Влажность определяется высушиванием, кислотность – с использованием растворов гидроокиси натрия (0,1 моль/дм^3), пористость – с применением цилиндра прибора Журавлева с последующим математическим расчетом. Оптимизация рецептуры базируется на принципах пищевой комбинаторики с учетом аминокислотного состава и допустимых норм содержания путем регрессионного анализа, математического программирования (Math CAD). Микробиологические показатели, нормированные для хлебобулочной продукции, определяли по методикам, установленных ГОСТ 10444.15 (КМАФАнМ), ГОСТ 31747 (БГКП) и ГОСТ 10444.12 (плесени и дрожжи).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ рынка безглютеновой продукции в торговых сетях «Ашан», «Лента», «Магнит» г. Краснодара показал разную количественную наполненность ассортимента. Ассортимент как российского, так и иностранного промышленного производства с пролонгированными сроками годности. Это мука гречневая, рисовая, в том числе из коричневого, кукурузная, картофельная, кокосовая, миндальная, различные смеси, промаркированные «Без глютена», используемые для приготовления как кондитерских изделий (различных видов печенья, вафель, маффинов, кексов, пряников, бисквитных изделий, крекеров), так и для хлеба, блинчиков, макаронных изделий [2, 3].

К сожалению, на российском рынке потребительских товаров ассортимент продукции, не содержащий глютен, ограничен. Доля импорта в этом сегменте значительная. Данная продукция дороже традиционной (с глютеном), поэтому спрос на неё в основном со стороны потребителей, страдающих целиакией. Но концепция здорового образа жизни всё более актуальна, что подтверждается ростом спроса на натуральные и полезные для организма продукты, исключение из рациона клейковины, а это, в свою очередь, положительно отражается на доходах производителей безглютеновой продукции. Для такого сегмента потребителей полезность безглютеновых продуктов определяется дополнительными их характеристиками, связанными с введением фитооснов, улучшающих витаминный статус, минимизирующий дефицит минеральных веществ. Плодово-ягодные компоненты повышают содержание пектиновых веществ, положительно влияют на вкус, аромат, стабилизируют форму, улучшают структуру. Добавление природных антиоксидантов позволит повысить пищевую ценность, качество готовой продукции, увеличить срок годности. Поиск сырья для производства такого рода продукции очень актуален в связи с узостью ассортимента [4, 6].

В ходе маркетинговых исследований в супермаркетах «Ашан», «Лента», «Магнит» в г. Краснодаре проведенный социологический опрос подтвердил высокий спрос на продукцию специализированного назначения, особенно на безглютеновый хлеб (68 % опрошенных выразили желание видеть его среди предлагаемого хлебного ассортимента) и мучные кондитерские изделия (32 % соответственно). При этом выявлено, что вся промышленная хлебобулочная продукция без глютена импортная. Так, в супермаркете «Лента» безглютеновый хлеб представлен двумя наименованиями итальянского производителя «DR.SCHAER», стоимость на которые заметно выше традиционных видов хлеба. Результаты проведенного исследования подтверждают необходимость решения вопроса импортозамещения хлеба с доступными для населения ценами. Для решения данного вопроса необходимы инновации, связанные со всеми этапами его производства, чтобы исключить контаминацию глютеном, что может произойти при заготовке сырья, в процессе транспортировки, при производстве, последующем хранении, а также контроле качества. Поэтому требуется контроль содержания глютена при получении сырья («на входе») и на всех этапах производства продукции, в том числе и к её упаковке. Внимание уделяют лабораторному контролю, наличию отдельных полей и производственных мощностей. За качество продукции ответственность возлагается на производителя, основополагающая задача которого является обеспечение соответствия готовой продукции показателям качества и безопасности технических регламентов и нормативной документации.

При проведении исследований также установлено, что, несмотря на наличие в супермаркетах производственных мощностей, оснащенных технологическим оборудованием, инвентарем, инструментами, посудой в виде пекарен, нет ни в одном из них хлеба собственного производства [2, 4]. Хотя внедрение безглютеновой продукции в меню предприятий общественного питания считается инновационным направлением ассортиментной политики, позволяющим расширить целевую аудиторию и повысить степень востребованности услуг питания.

Для этого необходимы мероприятия по техническому перевооружению и обучению персонала. Для того, чтобы справиться с безглютеновым тестом, необходимо специальное оборудование с поршневыми наполнителями, выдавливающее и выливающее на противни безглютеновый состав. Это аппараты наподобие шприцов, позволяющие работать с жидким тестом.

Помимо этого, безглютеновое тесто не может увеличиваться в объемах, подниматься и не способно самостоятельно аэрировать, что приводит к получению сухих и рассыпчатых изделий с несоответствующими свойствами стандартным требованиям. Поэтому для решения этой ситуации в рецептурах могут использовать крахмал, ксантан, искусственные разрыхлители, дрожжи.

Модернизация рецептуры нуждается в корректировке. Работа с липким безглютеновым тестом из-за сгущения его такими добавками, как крахмал или ксантановая камедь, и при этом более тонким и менее эластичным, требует индивидуальной настройки оборудования, фундаментальных изменений процесса его приготовления.

При производстве безглютеновой продукции деятельность предприятий общественного питания должна регулироваться СанПиН 2.3/2.4.3590, ТР ТС 021/2011 в области пищевой безопасности.

Важно найти правильную муку, понять, как она работает в тесте, подобрать нужные пропорции всех ингредиентов [3, 5].

При организации производства безглютенового хлеба в пекарне супермаркета необходимо:

- разграничить по времени технологические процессы, связанные с производством безглютеновых хлебобулочных изделий и традиционных;

- проводить тщательную санитарную обработку рабочих мест на технологической линии в соответ-

ствии со стандартами пищевой безопасности (ХАССП), контролируя все критические контрольные точки (ККТ), чтобы предотвратить неустранимые и трудноустранимые последствия нарушения безопасности продукции из-за несоблюдения технологических правил и санитарных норм;

- уделять внимание чистоте как основного, так и дополнительного сырья для технологического процесса производства безглютеновой продукции во избежание возможности скрытого глютена;

- использовать отдельный инвентарь, посуду, инструменты с соответствующей маркировкой при выполнении технологических операций производства безглютеновой продукции;

- обучить персонал по технике работы с безглютеновым тестом с учетом соответствующей организации рабочих мест, акцентируя внимание на важность соблюдения технологических правил по обработке безглютеновой и традиционной муки для предотвращения перекрестного попадания глютена.

Для подтверждения отсутствия глютена после пробной выпечки необходимо провести лабораторные исследования как выпущенной продукции, так и смывов с оборудования, используемого в технологическом процессе. Только отсутствие глютена в этих образцах, подтвержденное сертификационной лабораторией, делает возможным размещение надписи на упаковке «Не содержит глютена».

Не менее сложный вопрос – стабильные и надежные поставщики выбранной муки. Краснодарский край по праву считается житницей России, занимающий лидирующие позиции по производству безглютеновой муки. Важно, чтобы её качество не менялось от партии к партии, так как все рецепты завязаны на определенное качество товаров конкретных проверенных производителей сырья. Развитие сферы производства безглютеновой продукции на Кубани характеризуется хорошим потенциалом, что связано с наличием региональных (локальных) источников сельскохозяйственного сырья, позволяющих обогащать продукцию широким спектром питательных и биологически активных веществ [4]. Главная цель состоит в том, чтобы любой потребитель, независимо от соблюдаемой им диеты или полного отрицания диет, смог без проблем найти что-то по душе [1].

При разработке технологии производства безглютенового хлеба необходимо улучшить показатели моделируемого процесса путем подбора условий его протекания и выбора параметров, что базируется на принципах пищевой комбинаторики.

Изучение ряда результатов исследований показало, что для получения оптимальных структурно-механических свойств безглютеновой мучной продукции необходимо использовать комплекс мучного сырья с различным химическим составом. Поэтому для обоснования выбора его видов в рецептуре хлеба для лиц, страдающих глютеновой энтеропатией, исследованы рисовая, нутовая, гречневая, кукурузная, льняная мука с пометкой «без глютена», имеющиеся в реализации торговой сети г. Краснодара. Для проектирования рецептуры был использован программный пакет Match Cad, с помощью которого получен состав мучной смеси с попаданием в эталон на 93,726 %. При этом акцент сделан на повышение уровня биологической ценности компонуемой смеси [6, 7]. Смесь, состоящая из 16 % рисовой муки, 74 % нутовой муки и 10 % гречневой, имеет оптимальный показатель сбалансированности, так как содержание незаменимых аминокислот – триптофан, треонин, лейцин, метионин, валин, изолейцин и цистин дает оптимум.

Для данных видов безглютеновой муки характерны следующие особенности [8]:

- рисовая мука по сравнению с пшеничной в два раза меньше содержит жира, что продлевает срок годности изделий из неё. Для рисовой муки характерна высокая крахмальная составляющая и богатый минеральный состав (магний, фосфор, селен). Также рисовую муку отличает ряд оптимальных технологических свойств – жиро- и влагоудерживающая способность, желирующие свойства;

- нутовую муку характеризуют такие функциональные свойства, как влагосвязывающая и влагоудерживающая способность, в рецептурах пищевой продукции нутовая мука используется как источник белка, а также таких макроэлементов, как магний, фосфор, натрий, калий. Установлено, что для нутовой муки характерно высокое содержание витамина B_9 (фолиевой кислоты);

- гречневая мука имеет богатый химический состав, однако отличается невысокими реологическими свойствами, что указывает на её использование только в комплексе с другими видами безглютенового мучного сырья, характеризующимся высоким уровнем технологических свойств. Гречневая мука имеет повышенный уровень содержания пищевых волокон, калия, магния, фосфора, её витаминный состав не уступает ржаной и пшеничной муке.

Мучная смесь указанного выше состава была использована для разработки рецептуры и технологии хлебобулочного изделия. Основной технологической проблемой производства безглютеновой мучной продукции является отсутствие такого структурообразующего компонента, как клейковина (глютен). В связи с этим тесто из любого вида безглютенового сырья отличается низкими структурно-механическими свойствами (незначительная упругость, пластичность и вязкость) из-за неограниченного набухания белковых веществ, входящих в его состав [9, 10, 11].

Для определения оптимального соотношения мучная смесь : жидкость, дающая максимальный уровень органолептических показателей готовых изделий, были разработаны шесть модельных композиций с варьированием указанного соотношения от 1 : 1 до 1 : 2, при этом изменялось также количество вводимой в композицию ксантановой камеди. Состав модельных композиций приведен в таблице 1.

В тесте из разработанной смеси основными структурирующими агентами являются белки нутовой муки, рисовый крахмал, яичный белок. Дополнительно для формирования оптимальных структурно-механических свойств была введена ксантановая камедь, а в качестве биологического разрыхлителя – дрожжи.

Формирование каркаса теста происходит за счет взаимодействия высокомолекулярных соединений компонентов сырья: белков и полисахаридов, а также с участием ксантановой камеди. Работа дрожжей также способствует получению более пористой структуры готового изделия, что является несомненным плюсом, так как безглютеновая мучная продукция отличается низкой пористостью.

Выявлено, что образцы хлеба под № 1, 2, 3 – с неразвитой и неравномерной пористостью, влажные, с небольшими трещинами, с сильно выраженным запахом и вкусом нута. Образцы хлеба № 4 и 5 имеют наилучшие органолептические показатели, однако уменьшение количества мучной смеси приводит к сни-

жению уровня пищевой и биологической ценности изделия, и привкус и запах нута также явно выражены. Тесто, приготовленное по рецептуре № 6, имело жидкую консистенцию и после выпечки не дало подъема.

Таблица 1 – Состав модельных композиций теста на основе безглютеновой мучной смеси (на 100 г готовой продукции)
Table 1 – Composition of model dough compositions based on gluten-free flour mixture (per 100 g finished products)

Образец	Количество, г							
	Мучная смесь	Вода	Соль	Дрожжи	Яйцо	Сахар	Масло растительное	Ксантановая камедь
1	50,00	50,00	1,50	3,00	10,00	3,00	6,00	0,50
2	47,00	53,00						0,45
3	44,00	56,00						0,40
4	41,00	59,00						0,35
5	38,00	62,00						0,55
6	33,00	67,00						0,60

В связи с вышеизложенным для дальнейших исследований был принят образец № 4. Для уменьшения выраженности привкуса и запаха нута была произведена пробная выпечка образцов с уменьшением ее доли в смеси на величину от 15 % до 35 % с заменой на соответствующее количество гречневой муки как компонента с более высоким уровнем пищевой ценности по сравнению с рисовой мукой. Оптимальный образец определяли с помощью органолептической оценки. Состав мучной смеси, дающей оптимум сенсорных показателей, следующий: нутовая мука – 50 %, гречневая мука – 34 %, рисовая мука – 16 %. На основании этого соотношения была разработана рецептура хлеба на основе смеси из безглютеновых видов муки (в г на 1 кг готовой продукции): нутовая мука – 219, гречневая мука – 149, рисовая мука – 70, ксантановая камедь – 5, вода – 625, яйцо куриное – 100, соль пищевая – 19, сахарный песок – 38, дрожжи – 38, масло растительное – 75.

Для выбора оптимальных технологических режимов были опробованы опарный и безопарный способы приготовления теста, а также два способа выпечки – в парконвектомате и жарочном шкафу. В связи с тем, что нутовая мука характеризуется повышенным содержанием липидов, то более желательным оказывается опарный способ, что подтверждают более высокие показатели качества изделий, приготовленных этим способом.

Изделия, приготовленные как опарным способом, так и безопарным, имели гладкую поверхность, без трещин и наличия боковых выплывов, приятную светло-коричневую корочку и равномерно-кремовый мякиш, без следов непромеса, с мелкой и развитой пористостью, приятным умеренно-сладковатым вкусом. Фотографии опытных образцов безглютенового хлеба представлены на рисунке 1.

Рисунок 1 – Опытные образцы безглютенового хлеба / Figure 1 – Gluten-free bread prototypes

Таблица 2 – Физико-химические показатели хлеба на основе композиции из безглютенового мучного сырья
Table 2 – Physico-chemical parameters of bread based on a composition of gluten-free flour raw materials

Образец	Показатели		
	влажность мякиша, %	кислотность мякиша, град.	пористость мякиша, %
Хлеб безглютеновый	51,00	2,00	45,50
Хлеб пшеничный	46,00	3,00	68,50
Хлеб ржаной	19,00–53,00	19,00	46,00

Способ выпечки не оказал влияния на органолептические показатели выпеченных изделий, однако экономически выгоднее менее продолжительный процесс, а именно выпекание изделий в пароконвектомате 40 минут в конвекционном режиме при температуре 160–170 ºС. Для достижения той же степени

готовности изделий, но в жарочном шкафу требовалась температура 170 ºС и продолжительность выпечки 50 минут.

В таблице 2 представлены физико-химические показатели разработанного изделия, определяющие его потребительские свойства. Данные приведены в сравнении с аналогичными показателями хлеба из ржаной и пшеничной муки.

Для определения безопасности разработанной продукции были определены микробиологические показатели разработанной продукции, установленные ТР ТС 021/2011 и СанПин 2.3.2.1078-01 для хлебобулочной продукции после четырех дней хранения. Результаты определения микробиологических показателей свидетельствуют о соответствии разработанной продукции требования нормативной документации: КМАФАнМ составляет 150 КОЕ/г, в 0,01 г продукта не обнаружены бактерии группы кишечной палочки, плесеней и дрожжей менее 10 КОЕ/г. Однако разработанной продукции установлен срок хранения, равный трем суткам, так как после трехдневного хранения органолептика изделий ухудшается, что свидетельствует о нецелесообразности дальнейшего хранения.

Для обогащения химического состава и расширения ассортимента на базе безглютенового хлеба (образец 1) были разработаны образцы хлеба с добавлением сухофруктов (чернослива и кураги) (образец 2) и тыквенных семечек (образец 3). Данные компоненты вводились в тесто при последней обминке, тыквенными семечками также посыпалась поверхность изделий.

Поскольку целью научной разработки являлось получение оптимальной биологической ценности безглютенового мучного изделия, то на основе данных об аминокислотном составе образцов был осуществлен расчет их биологической ценности путем определения аминокислотных скоров и коэффициентов их различия (КРАС) (таблица 3).

Таблица 3 – Биологическая ценность образцов хлеба на основе безглютеновой мучной смеси
Table 3 – Biological value of bread samples based on gluten-free flour mixture

Образец	Δ РАС								ΣΔ РАС	КРАС	Биологическая ценность, %
	валин	изолейцин	лейцин	лизин	метионин+цистин	треонин	триптофан	фенилаланин+тирозин			
1	26,2	0	5,2	8,1	18,2	3,2	10,4	33,4	104,7	13,1	86,9
2	65,0	22,9	8,5	23,7	7,0	31,0	0	23,7	181,8	22,7	77,3
3	0	0,1	3,7	4,0	11,5	1,2	10,2	24,6	55,1	6,9	93,1

По результатам, представленным в таблице 3, можно говорить о достаточно высоком уровне биологической ценности разработанной продукции, что не совсем характерно для продукции питания из растительного сырья.

Пищевая ценность разработанных образцов (из расчета на 100 г готового продукта) находилась в следующих пределах: белки – от 6,62 до 9,24 г, жиры – от 6,49 до 9,54 г, углеводы – от 34,27 до 37,33 г, витамин B_1 – от 0,55 до 0,6 мг, витамин B_2 – от 0,24 до 0,25 мг, витамин B_5 – от 0,88 до 0,91 мг, витамин B_6 – 0,21 мг, витамин РР – от 3,42 до 3,83 мг, кальций – от 30,56 до 42,4 мг, магний – от 49,62 до 115,79 мг, селен – от 6,84 до 7,82 мкг. Энергетическая ценность образцов варьировалась от 247,7 до 255,08 ккал на 100 г хлеба.

ВЫВОДЫ

В ходе проведения исследования обоснован выбор видов муки для выпечки хлеба для потребителей, страдающих целиакией. С помощью методов математической оптимизации и органолептического анализа определено оптимальное соотношение компонентов в мучной безглютеновой смеси и других компонентов в рецептуре, установлены оптимальные режимы производства. На основе разработанной рецептуры предложены варианты с использованием сухофруктов и тыквенных семечек. Определены показатели пищевой, биологической ценности и потребительские свойства. На основе изучения микробиологических показателей обоснован срок хранения.

Разработанная продукция может быть рекомендована для лиц, страдающих непереносимостью глютена, при условии соблюдения мер по недопущению перекрестного загрязнения глютеном, а также для всех, кто желает исключить его из питания не по медицинскими показаниям, а по ряду убеждений. Также данная продукция может быть полезна всем потребителям, так как имеет более высокий уровень пищевой ценности в сравнении с изделиями из пшеничной муки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова В.Н. Теория персонализированного питания / В.Н. Иванова, Ю.И. Сидоренко. Москва : ДеЛи, 2020. 640 с.

2. Нилова Л.П., Малютенкова С.М., Виноградова А.В., Котоменкова О.Г. Актуальные аспекты товарного консалтинга в управлении качеством // Europan Social Science Journal. 2018. № 8. С. 9–14.

3. Тыщенко Е.В. Обзор безглютеновых видов сырья и его использование в производстве продуктов питания // Конкурентоспособность территорий: материалы XXI Всероссийского экономического форума молодых ученых и студентов. Екатеринбург : Уральский государственный экономический университет, 2018. С. 103–105.

4. Абуталыбова Д.Э. Рынок безглютеновых продуктов в мире и в России // Кондитерская и хлебопекарная промышленность. 2019. № 1. С. 11–12.

5. Сокол Н.В., Ревякина Н.А., Коваленко А.В. Безглютеновые композитные смеси для производства мучных кондитерских изделий // Инновационные решения в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства: материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, 2023. С. 137–141.

6. Заворохина Н.В. Моделирование рецептур безглютеновых видов хлеба для жителей Свердловской области, страдающих целиакией // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2015. № 5. С. 67–72.

7. Петыш Я.С. Вкусно и полезно – тенденции рынка мучных кондитерских изделий // Хлебопродукты. 2018. № 1. С. 64–67.

8. Олешкевич О.И. Исследование рынка муки для производства безглютеновых хлебобулочных изделий //

Биоразнообразие, биоресурсы, вопросы биотехнологии и здоровье населения Северо-Кавказского региона: сборник статей по материалам IX (66-й) ежегодной научно-практической конференции. 2022. С. 114–117.

9. Коваленко А.В., Ревякина Н.А. Оценка качества композитных смесей для производства безглютеновых мучных изделий // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей по материалам 78 научно-практической конференции. Краснодар : КубГАУ им. И.Т. Трубилина, 2023. С. 918–920.

10. Черкалина С.А., Кирилюк Т.Н., Храпко О.П. Изучение возможности применения нетрадиционного вида муки для производства бисквитов // Проблемы развития современного общества: сборник научных статей 8-й Всероссийской национальной научно-практической конференции. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2023. С. 388–390.

11. Тевзадзе Г.У., Санжаровская Н.С. Обоснование технологии создания безглютеновых хлебобулочных изделий с повышенным содержанием пребиотиков // Виртуозы науки: сборник тезисов Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых за 2023 г. Краснодар : КубГАУ им. И.Т. Трубилина, 2024. С. 313–315.

Информация об авторах

О. А. Корнева – кандидат технических наук, доцент кафедры общественного питания и сервиса Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».

Т. А. Джум – кандидат технических наук, доцент кафедры общественного питания и сервиса Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».

М. Ю. Тамова – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общественного питания и сервиса Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».

А. С. Петросян – аспирант кафедры общественного питания и сервиса Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».

REFERENCES

1. Ivanova, V.N. & Sidorenko, Yu.I. (2020). Theory of personalized nutrition. Moscow : Delhi, 640 p. (In Russ.).

2. Nilova, L.P., Malyutenkova, S.M., Vinogradova, A.V., Kotomenkova, O.G. (2018). Actual aspects of commodity consulting in quality management. European Social Science Journal. (8). pp. 9-14. (In Russ.).

3. Tyshchenko, E.V. (2018). Review of gluten-free raw materials and their use in food production. Competitiveness of territories: proceedings of the XXI All-Russian Economic Forum of Young Scientists and Students. Yekaterinburg : Ural State University of Economics, pp. 103-105. (In Russ.).

4. Abutalybova, D.E. (2019). The market of gluten-free products in the world and in Russia. Confectionery and bakery industry. (1). pp. 11-12. (In Russ.).

5. Sokol, N.V., Revyakina, N.A. & Kovalenko, A.V. (2023). Gluten-free composite mixtures for the production of flour confectionery products. Innovative solutions in construction, environmental management and mechanization of agricultural production: proceedings of the III All-Russian (national) scientific and practical conference. Nalchik: V.M. Kokov Kabardino-Balkarian State Agrarian University, pp. 137-141. (In Russ.).

6. Zavorokhina, N.V. (2015). Modeling of gluten-free bread recipes for residents of the Sverdlovsk region suffering from celiac disease // Technology and commodity science of innovative food products. (5). pp. 67-72. (In Russ.).

7. Petysh, Ya.S. (2018). Tasty and healthy - trends in the market of flour confectionery products. Bread products. (1). pp. 64-67. (In Russ).

8. Oleshkevich, O.I. (2022). Market research of flour for the production of gluten-free bakery products // Biodiversity, bioresources, issues of biotechnology and public health in the North Caucasus region: a collection of articles based on the materials of the IX (66th) annual scientific and practical conference. pp. 114-117. (In Russ.).

9. Kovalenko, A.V., Revyakina, N.A. (2023). Quality assessment of composite mixtures for the production of gluten-free flour products. Scientific support of the agro-industrial complex: a collection of articles based on the materials of the 78th scientific and practical conference. Krasnodar: KubGAU named after I.T. Trublin, pp. 918-920. (In Russ.).

10. Chekalina, S.A., Kirilyuk, T.N., Khrapko, O.P. (2023). Studying the possibility of using an unconventional type of flour for the production of biscuits. Problems of the development of modern society: collection of scientific articles of the 8th All-Russian National Scientific and Practical Conference. Kursk : Southwestern State University, pp. 388-390. (In Russ.).

11. Tevzadze, G.U., Sanzharovskaya, N.S. (2024). Substantiation of the technology of creating gluten-free bakery products with a high content of prebiotics. Virtuosi of science: collection of abstracts of the International scientific and practical conference of students and young scientists for 2023. Krasnodar : KubGAU named after I.T. Trublin, pp. 313-315. (In Russ.).

Information about the authors

O.A. Korneva - candidate of technical sciences, associate professor of the department of public catering and service of the federal state budgetary educational Institution of higher education "Kuban State Technological University".

T.A. Dzhum - candidate of technical sciences, associate professor of the department of public catering and service of the federal state budgetary educational Institution of higher education "Kuban State University technological University".

M.Y. Tamova - doctor of technical sciences, professor, head of the department of public catering and service of the federal state budgetary educational institution of higher education "Kuban State Technological University".

A.S. Petrosyan - postgraduate student of the department of public catering and service of the federal state budgetary educational institution institutions of higher education "Kuban State Technological University".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 77–89.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 77–89.

Обзорная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК633.15 : 664
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.011 EDN: PJPZSD

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕРЖНЕЙ ПОЧАТКОВ КУКУРУЗЫ В РЕЦЕПТУРАХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Карина Ильдаровна Шайхиева [1], Светлана Владимировна Борисова [2]

[1, 2] Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия
[1] shaykhievak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1188-7885
[2] borsv13@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-7425-410X

Аннотация. *Обобщены сведения из мировых литературных источников по использованию отхода от получения зерновок кукурузы (Zea mays) – биомассы стержней кукурузных початков в качестве компонента для изготовления различных продуктов питания и напитков. Кратко показана информация об объемах площадей для выращивания зерновок кукурузы и количествах образующихся стержней кукурузных початков в мировом масштабе. Также кратко приведены сведения об основных путях использования стержней початков Zea mays в различных отраслях народного хозяйства и для получения различных химических соединений. Даны сведения литературных источников о содержании биогенных соединений (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, жирных кислот и белковых соединений, некоторых фенольных соединений) в составе стержней кукурузных початков. Приведены данные по значениям водоудерживающей и маслоудерживающей способности, а также водонабухаемости нативных стержней початков Zea mays. По данным литературных источников показано, что мука из стержней початков кукурузы содержит в своем составе большое количество пищевых волокон и потенциально может использоваться в качестве источника последних в рецептурах различных продуктов питания (хлеб, макаронные изделия, печенья, кексы, крекеры и десертные изделия). Показано применение мкеи из стержней початков кукурузы для изготовления национальных продуктов питания, таких как otak-otak, putupiring, kuih kaswi. Указывается, что полифенольные соединения в составе стержней кукурузных початков являются биодоступными и обладают потенциальным биологическим эффектом, а также могут использоваться как потенциально реализуемые пищевые ингредиенты, обладающие антиоксидантными свойствами. Также показано использование экстрактов и порошка из початков кукурузы для приготовления различных напитков.*

Ключевые слова: *стержни початков кукурузы, биомасса, мука из стержней, переработка, отход сельского хозяйства, состав, продукты питания, напитки, компонент.*

Благодарности: *Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение №10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).*

Для цитирования: Шайхиева К. И., Борисова С. В. Использование стержней початков кукурузы в рецептурах продуктов питания (обзор литературы) // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 77–89. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.011. EDN: https://elibrary.ru/PJPZSD.

Review article

USE OF CORN COBS IN FOOD RECIPES (LITERATURE REVIEW)

Karina I. Shaykhieva [1], Svetlana V. Borisova [2]

[1, 2] Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
[1] shaykhievak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1188-7885
[2] borsv13@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-7425-410X

Abstract. *This article summarizes literature data on the use of corn kernel (Zea mays) biomass as a component in the production of various food and beverage products. It briefly describes the area under corn kernel cultivation and the quantities of corn cobs produced globally. It also briefly describes the main uses of Zea mays cobs in various sectors of the national economy and for the production of various chemical compounds. Literary data on the content of biogenic compounds (cellulose, hemicellulose, lignin, fatty acids and protein compounds, and some phenolic compounds) in corn cobs are presented. Data on the water-holding capacity, oil-holding capacity, and water swelling capacity of native Zea mays cobs are also presented. Literary sources have shown that corncob flour contains a high amount of dietary fiber and can potentially be used as a source of fiber in various food products (bread, pasta, cookies, muffins, crackers, and desserts). The use of corncob flour in the production of traditional foods such as otak-otak, putu piring, and kuih kaswi has been demonstrated. The polyphenolic compounds in corncobs are bioavailable and have potential biological effects, and can also be used as potentially marketable food ingredients with antioxidant properties. The use of corncob extracts and powder in the preparation of various beverages has also been demonstrated.*

© Шайхиева К. И., Борисова С. В., 2026

Keywords: *Corn cobs, biomass, corn cob meal, processing, agricultural waste, composition, food, beverages, component.*

Acknowledgements: *The work was carried out at the expense of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to educational organizations of higher education, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and scientific-pedagogical work to defend doctoral dissertations and perform research (Agreement No. 10/2025-PD-KNRTU dated 12/22/2025).*

For citation: Shaikhieva, K. I. & Borisova, S. V. (2026). Use of corn cobs in food recipes (literature review). *Polzunovskiy vestnik*, (2), 77-89. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.011. EDN: https: //elibrary.ru/PJPZSD.

ВВЕДЕНИЕ

При переработке сельскохозяйственной продукции для производства продуктов питания образуется большое количество разнообразных отходов в виде соломы, плодовых оболочек зерен, жмыха и шротов, лузги и т.д. Отходы от переработки сельскохозяйственного сырья не находят должного вторичного использования и зачастую банально сжигаются, закапываются в почву, используются в виде подстилок для содержания животных и др.

Общеизвестно применение растительных сельскохозяйственных отходов во многих отраслях народного хозяйства в качестве прекурсоров для получения биотоплив (биоэтанол, биометанол, биодизель), различных химических соединений, наполнителей строительных и конструкционных материалов, сорбционных материалов и т.д. Одним из перспективных направлений использования сельскохозяйственных отходов, учитывая наличие в их составе физиологически функциональных соединений, является их применение в качестве ингредиентов для производства различных продуктов питания [1–16].

Кукуруза сладкая (*Zea mays*) является одной из основных сельскохозяйственных культур, производимых в мире, занимая второе место после пшеницы по объемам выращивания. Указывается, что в 2024 году площадь посевных земель под кукурузу в мире составила 201,6 млн. га, из них в Китае – 44,7 млн. га, в США – 33,23 млн. га, в Бразилии – 22,3 млн. га [17]. Определено, что мировое производство зерновок кукурузы в 2023 г. составило 1210 млн. тонн [18].

При выращивании кукурузы на зерно образуется значительное количество отходов, таких как стержни и шелуха початков, стебли и листья растения. Эти отходы составляют ≈ 40 % от общего объема производства зерна, и 40 % из них приходится на стержни початков кукурузы [19]. Т.е. масса отходов при производстве зерновок кукурузы в настоящее время составляет более 485 млн. тонн, из них стержней початков – более 195 млн. тонн. В работе [20] указывается, что соотношение зерновок кукурузы к массе стержня початка составляет 100:18, что по расчетам привело к образованию в 2023 г. 217,8 млн. тонн последних.

Известно много способов вторичного использования стержней кукурузного початка (СКП): получение различных видов биотоплив [21, 22], использование в качестве наполнителя в составе строительных [23, 24] и полимерных материалах [25], для получения биоразлагаемых полимеров [26], карбонизатов и активированных углей [27, 28], сорбционного материала для удаления различных загрязняющих веществ из водных сред [29, 30]. СКП является ценным источником для получения из нее, в частности, различных биополимеров [31], лимонной [32], молочной [33, 34], феруловой [35], уксусной и муравьиной [36] кислот, фурфурола [37] и др. химических соединений. Кроме того, показано, что СКП являются прекурсорами для получения ксилана [38, 39], ксиланазы [40] и ксилоолигосахаридов [41–43]. Одним из путей использования СКП является их использование в качестве компонента для изготовления различных продуктов питания.

СОСТАВ СТЕРЖНЕЙ ПОЧАТКА КУКУРУЗЫ

В различных литературных источниках приведен состав СКП. В частности, в работе [44] определено содержание химических соединений в составе СКП за 1991–2004 гг. Показано, что общее содержание пищевых волокон составило 89,96–93,21 %, из них растворимых пищевых волокон – 0,78–2,17 %, нерастворимых – 86,02–88,80 %. При этом содержание целлюлозы колебалось в пределах 35,43–39,37 %, гемицеллюлозы – 43,54–46,01 %, лигнина – 3,20–6,39 %. Содержание белков составило 2,85–3,22 %, жиров – 0,48–0,59 % [44]. В работе [45] указывается, что содержание целлюлозы в СКП составляет 38–50 %, гемицеллюлозы – 23–32 %, лигнина – 15–25 %, влажность составляет 7–10 %. Авторами работы [46] также определено содержание основных биополимеров в СКП: целлюлоза – 40 %, гемицеллюлоза – 25 %, лигнина – 4 %, белков – 7 %, жиров – 7 %, зольность – 3 %. Определено [47], что содержание пищевых волокон в СКП составляет 82,62 %, из них нерастворимых – 80,28 %, растворимых – 2,34 %, что несколько ниже таковых показателей, приведенных в работе [44]. Также выявлено, что водоудерживающая способность нативных стержней початков *Zea mays* составило 3,49 г/г, маслоудерживающая способность – 5,1 г/г, а водонабухаемость – 0,285 г/г [47].

Содержание фенольных соединений составляет по данным работы [46], 6,74 г GAE/кг сухого веса СКП, из них наибольшее количество фенольных соединений присутствовало в нерастворимой связанной форме (5,41 ± 0,27 г GAE/кг), за которой следовали свободные фенольные (0,9 г ± 0,08 г GAE/кг) и этерифицированные фенольные (0,43 г ± 0,05 г GAE/кг) фракции. Также определено общее содержание феруловой и п-кумаровой кислот, присутствующих во всех трёх фракциях, которое составило 3,06 ± 0,19 и 4,23 ± 0,25 г/кг сухого веса, соответственно [46]. В работе [48] указывается, что содержание феруловой кислоты в СКП может колебаться от 6,9 до 32,5 мкг/мг сухого вещества.

Указывается, что полифенольные соединения в составе СКП являются биодоступными и обладают потенциальным биологическим эффектом, а также могут использоваться как потенциально реализуемые пищевые ингредиенты [49], обладающие антиоксидантными свойствами [50].

В работах [51, 52] сделан вывод, что сельскохозяйственные отходы от переработки кукурузы, в том числе отруби и кукурузные волокна, могут быть использованы в качестве функциональных ингредиентов в пищевых продуктах.

СОСТАВ МУКИ ИЗ СТЕРЖНЕЙ ПОЧАТКОВ КУКУРУЗЫ

В работе [52] приведены характеристики муки, полученной из СКП, как альтернативы, пригодной для приготовления или обогащения пищевых продуктов. Определено, что влажность муки составила 4,36 %, влагоудерживающая способность – 2,36 %, коэффициент водопоглощения – 5,0 %, зольность – 1,82 %, гидрогенный потенциал – 6,37 %, содержание углеводов – 72,82 %, пищевых волокон – 8,91 %, протеинов – 2,37 %, липидов – 1,32 %, фитиновой кислоты – 0,49 % и щавелевой кислоты – 0,03 %. Очевидно, что физико-химические данные муки из СКП показывают низкие значения влажности, высокие показатели содержания клетчатки и золы по сравнению с традиционными видами муки. Сделан вывод, что данная мука может быть потенциально безопасна для потребления человеком, ее микробиологические показатели соответствуют действующему законодательству, демонстрируя пригодность к употреблению. Полученная и проанализированная мука из стержней кукурузных початков (МСКП) имеет большой потенциал для использования в качестве добавки или обогащения пищевых продуктов, поскольку она способствует физиологической пользе благодаря содержанию клетчатки и низкому содержанию щавелевой и фитиновой кислот [53].

Определено, что МСКП имеет более высокие показатели по содержанию жиров (1,40 %), сырой клетчатки (38,39 %) и зольности (1,89 %) по сравнению с пшеничной мукой (0,77 %, 0,52 % и 0,73 % соответственно) и более низкие показатели по содержанию белков (3,24 %), углеводов (43,59 %) и влажности (11,51 %) в сравнении с мукой из пшеницы (12,80 %, 72,31 и 12,87 % соответственно). Также выявлено, что пшеничная мука имеет более высокое значение калорийности (347,38 Ккал/100 гр. сухой массы) в сравнении с МСКП (199,83 Ккал/100 гр. сухой массы) [54].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУКИ ИЗ СТЕРЖНЕЙ ПОЧАТКОВ КУКУРУЗЫ В СОСТАВЕ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ И НАПИТКАХ

В связи с вышеизложенным изучались свойства хлеба с четырьмя разными пропорциями МСКП: 0 % (контроль), 5 %, 10 % и 15 %. Выявлено, что при увеличении доли МСКП с 5 % до 15 % значительно возрастало содержание клетчатки и снижалось количество белка ($p < 0,05$) в изделии. При этом на другие химические показатели (влажность, зольность, содержание жира и углеводов) добавление МСКП влияло незначительно. Также определено, что при увеличении доли МКП уменьшался объём хлеба и повышалась его упругость ($p < 0,05$). Также отмечалось изменение цвета верхней корочки хлеба: при увеличении доли початочной муки наблюдалась более светлая и жёлтая окраска. По результатам оценки хлеба по таким параметрам, как цвет, аромат, равномерность клеток, твёрдость, вкус и общая приемлемость, изделие с 10 % МСКП получило самые высокие средние баллы (7,0 баллов) среди всех образцов, что было сопоставимо с коммерческим хлебом, доступным на рынке [55].

Сопоставимые данные получены в работе [54], в которой пшеничная мука на 5, 10 и 20 % заменялась на МСКП и использовалась для выпечки хлеба. Выявлено, что включение МСКП в рецептуру хлеба значительно повлияло на текстуру, цвет и объем выпекаемого изделия. Определено, что увеличение содержания початковой МКП в рецептуре хлеба приводит к получению более плотных, но мелких и темных буханок по сравнению с контрольным образцом. Рецептура хлеба с добавлением 10 % МСКП имела наивысший средний балл (7,0) общей приемлемости среди всех других рецептур и была сопоставима с коммерческими сортами хлеба [54].

В исследовании [56] молочная кислота, полученная из СКП, использовалась в различных дозировках (0 %, 0,1 %, 0,3 % и 0,4 %) в рецептуре для выпекания хлеба. Выявлено, что органолептические характеристики хлеба с введенной в его состав молочной кислотой не изменились. Полученные результаты, показывают, что оценки объема буханки хлеба снижались в зависимости от продолжительности хранения до 96 часов. Свежий хлеб получил наивысшие оценки, за ним следовал хлеб, оцененный через 24 и 48 часов хранения. Хлеб, содержащий 0,1 % молочной кислоты, и контрольный образец получили самые высокие оценки за объём буханки. Также определено, что цвет корки хлеба, который улучшился при добавлении молочной кислоты до 0,2 %, при дальнейшем увеличении дозы молочной кислоты ухудшался. Цвет корки хлеба также ухудшался с увеличением времени хранения. Изменение доз молочной кислоты оказало значительное влияние на баллы, присваиваемые симметрии формы хлеба. У хлеба, содержащего 0,1 % молочной кислоты, достигались значительно более высокие оценки по сравнению с другими образцами изделия. Также выявлено, что баллы за равномерность пропекания хлеба с увеличением молочной кислоты в составе снижались. Результаты также показали, что характер корки хлеба, содержащего 0,1 % и 0,2 % молочной кислоты, получил значительно более высокие оценки, чем хлеб, содержащий 0,3 % и 0,4 % молочной кислоты. Наименьшие оценки были присвоены характеру корки хлеба, испытанного после 72 и 96 часов хранения. Также выявлено, что зерно хлеба, содержащее 0,3 % и 0,4 % молочной кислоты, получило самые высокие оценки. Сделан вывод, что пищевая молочная кислота, полученная из СКП, является потенциальным источником для улучшения качества хлеба и может быть использована в качестве замены традиционных хлебных добавок [56].

Кроме хлеба, добавки, содержащие высокие уровни клетчатки, применяются и в рецептуре макаронных изделий. В рамках современных моделей питания важность макаронных изделий, обогащенных клетчаткой, выходит за рамки их пищевой ценности. С ростом распространенности таких проблем со здоровьем, как ожирение, диабет и сердечно-сосудистые заболевания, потребность в полезных, богатых питательными веществами продуктах питания становится насущной. Обогащенные клетчаткой макаронные изделия представляют собой актуальное решение, способствуя насыщению, регулированию уровня сахара в крови и поддержанию здоровья пищеварительной системы [57].

Для изготовления макаронных изделий в рецептуру добавлялось 5–20 % (вес.) МСПК. Содержание клетчатки и антиоксидантная активность макаронных изделий повышались с увеличением уровня добавления МСПК. При уровне добавления последней 20 %, содержание волокон и общего фенольного сырья в макаронах увеличилось в 2 и 4 раза, соответственно, по сравнению с контролем. Однако потери при варке увеличились, в то время как оптимальное время вар-

ки, скорость удлинения, прочность на разрыв и общая приемлемость снизились с увеличением уровня добавления МСПК. Обработка смешанного теста из 90 % манной крупы и 10 % МСПК трансглутаминазой (ТГ) была успешно применена для улучшения потерь при варке, скорости удлинения, прочности на разрыв, а также общей приемлемости включенных макаронных изделий. При дозе ТГ 0,75 ед./г белка и времени инкубации 10 минут, качество варки и физическое качество, а также общая приемлемость макаронных изделий с добавлением МСПК были сопоставимы с таковыми у контроля. Сделан вывод, что добавление МСПК увеличило содержание клетчатки и антиоксидантную активность макаронных изделий, но отрицательно повлияло на их кулинарные и физические свойства, а также на общую приемлемость. Эти негативные эффекты от добавления порошка из стержней початка можно устранить обработкой смешанного теста ТГ в соответствующей дозировке и с подходящим временем инкубации. Сочетание МСПК и ТГ может использоваться для производства богатых клетчаткой макаронных изделий с приемлемыми кулинарными и физическими свойствами, а также общей приемлемостью [58].

Выявлено несколько литературных источников по использованию МСПК в рецептурах различных бакалейных изделий, таких как печенья, кексы и десертные изделия. Так, в частности, исследовалось потенциальное использование МСПК в качестве источника пищевых волокон для производства печенья с высоким содержанием клетчатки. МПК вводилась в количестве 10, 20 и 30 % взамен пшеничной муки. Образцы печенья анализировались на общее содержание углеводов и минералов (Mg, Zn, Fe, Ca, P). Образцы печенья подвергали сенсорной оценке при сравнении с образцами, в состав которых вводили адекватное количество пшеничных отрубей. Введение МСПК в состав рецептуры вызвал значительное снижение общего содержания углеводов и всех указанных минералов, а также значительное увеличение содержания растворимых, нерастворимых и общих пищевых волокон в образцах печенья. Выявлено, что с увеличением количества введенной МСПК в рецептуру изделия, цвет, вкус, хрусткость, ощущение во рту и восприятие послевкусия снижались. Сенсорный анализ показал, что печенье, содержащее МСПК, было предпочтительнее по цвету и не уступало по вкусу и хрусткости печенью, содержащему пшеничные отруби [59].

В исследовании [59], МСПК была обработана Filtrase Sprint – коммерческим ферментным препаратом, содержащим эндо-1,3(4)-β-глюканазу и эндо-1,4-β-ксиланазу *Talaromyces emersonii*, для превращения нерастворимых пищевых волокон в растворимые пищевые волокна, а затем добавлена в рецептуру печенья. Подходящими условиями для ферментативной обработки были содержание воды 85 % от сухого веса, количество фермента 54 мкл/г сухого веса и время инкубации 3 часа. Печенье изготавливалось с использованием нативной или обработанного ферментами МСКП при уровнях замещения пшеничной муки 0 % (контроль), 10 %, 20 %, 30 % и 40 %. Тесто раскатывалось вручную до высоты 4 мм, формовалось круглой формой диаметром 35 мм и выпекалось при температуре 175 ºС в течение первых 15 мин, затем при 150 ºС в течение оставшихся 10 мин. Указывается, что печенье, содержащее МСКП, значительно увеличило содержание пищевых волокон, общее содержание фенолов и антиоксидантную активность по сравнению с контрольным образцом. Обработанные ферментом продукты привели к меньшей твердости, большей хрупкости и более высокой общей приемлемости, чем продукты, включавшие необработанные аналоги [60].

Имеется сообщение об использования МСКП для получения крекеров в домашних условиях. Приготовление теста для крекеров осуществлялось путем смешивания основных ингредиентов и добавок, равномерного перемешивания и вымешивания вручную до получения плотной и однородной массы. Затем в тесто добавлялась ¼ часть муки из тапиоки, которая частично заменялась МСКП, вода, соль, сахар, яйца, лук и кориандр, измельченные до состояния каши. Смесь помещалась в пленку, заворачивалась и готовилась 40 минут на пару до готовности. Тесто охлаждалось, затем укатывалось до толщины 1–2 мм и формовалось по желанию. Далее тесто высушивалось на солнце до полного высыхания. Сформованные и высушенные сырые крекеры обжаривались, упаковывались с помощью упаковочной машины. Определено, что крекеры имели характерный запах, коричневатый цвет и пикантный вкус [61].

Исследовалась оценка влияния частичной замены пшеничной муки МСКП в количестве 10–50 % на физико-химические и технологические свойства как теста (pH, удельный вес и текстура), так и кексов (pH, удельный объем, активность воды, влажность, общая титруемая кислотность, инструментальный цвет, текстура и примерный состав). Высокое содержание клетчатки в МСКП значительно ($p < 0,05$) повлияло на технологические свойства теста, увеличив его жесткость и снизив удельный вес. В кексах добавление МСКП уменьшило объем и упругость изделия, а плотность, твердость, клейкость и разжевываемость усилились. Кроме того, определено, что с увеличением дозировок початковой муки в кексах значения красноты (a^*) и желтизны (b^*) планомерно повышаются, в то время как параметр светлости (L^*) понижается. Рецептура с 10 % заменой пшеничной муки МСКП показала наиболее благоприятные характеристики, особенно с точки зрения кажущейся плотности теста (0,83 г/см^3), удельного объема (2,64 дм^3/кг) и упругости (7,05 Н). Сделан вывод, что частичная замена пшеничной муки 10 % МСКП является перспективной как с технологической, так и с пищевой точки зрения, главным образом благодаря повышению содержания пищевых волокон [62].

Исследовалось влияние замены рисовой муки в количестве 10–30 % лиофилизированной МСКП с содержанием феруловой кислоты 6,02 мг/г для изготовления кексов. В ходе проведения экспериментов выявлено, что добавление МСКП в рецептуру изделия увеличило содержание пищевых волокон и свободной феруловой кислоты в кексах. Добавление до 20 % МСКП привело к увеличению высоты и улучшению цвета кексов, а также количества воздушных ячеек в мякише и к снижению твердости изделий. Определено, что кексы, содержащие МКП, показали более высокий средний общий балл, чем изделия, изготовленные только с рисовой мукой [63, 64].

В работе [65] определялось содержание клетчатки в СКП и оценивалось ее потенциальное использование в хлебобулочных изделиях для улучшения питательных свойств. Использовались три метода экстракции: водная, кислотная и щелочная. Выявлено, что водная экстракция дала наибольший выход клетчатки – 98,12 % ($p < 0,05$) и наибольшее содержание нерастворимых пищевых волокон – 69,40 %, что обеспечило

хорошие показатели по маслоудерживающей способности, набухаемость, адсорбционной способности по глюкозе и холестерину. Определено, что кексы, обогащенные клетчаткой, полученной этими методами, не выявили существенных различий в текстуре изделий, за исключением связности. Сделан вывод, что водная экстракция является наиболее выгодным методом, обеспечивающим наибольший выход, повышенную безопасность и текстуру изделий, сопоставимую с кексами, полученными с клетчаткой, полученной кислотной и щелочной экстракцией, без ущерба для качества [65].

Изучалось влияние добавления МСКП на физико-химические и органолептические свойства малазийского национального десерта kuih kaswi. Для приготовления kuih kaswi используются пшеничная, рисовая или тапиоковая мука, белый сахар, щелочная вода и тёмный пальмовый сахар, который придаёт пирогу характерный тёмно-коричневый цвет. Обычно тесто готовят на пару в небольших китайских чашках, а подают десерт, посыпав свеженатёртым кокосом [66]. Содержание МСКП в kuih kaswi составляло 5–25 % взамен пшеничной муки. Выявлено, что значение pH теста для изготовления kuih kaswi с увеличением процентного содержания МСКП снижается с 7,35 до 7,08. В то же время, цветовой профиль изделия показал увеличение значений светлости (L^*) (с 23,75 до 25,60) и желтизны (b^*) (с 6,15 до 6,95) с увеличением дозировки МСКП. Однако значения красноты (a^*) имели тенденцию к снижению (с 5,23 до 4,96) в сторону большей красноты. Также определено, что характеристики профиля текстуры, такие как твердость и связность, значительно увеличиваются при добавлении МСКП. Выявлено, что адгезия, упругость и жевательная способность изделия значительно снижаются при добавлении большего количества МСКП в kuih kaswi. Общий результат сенсорных исследований не показал большой разницы, и предпочтение отдавалось изделиям с добавлением наибольшего количества МСКП. Результаты также показывают тенденцию к увеличению содержания сырой клетчатки по мере увеличения содержания МКП в изделиях [67].

Также исследовалось влияние дозировок МСКП на показатели национального малазийского блюда putu piring – приготовленный на пару из рисовой муки десерт, или сладкая закуска. Putu piring, в основном, изготавливается из мелко измельчённой рисовой муки и содержит начинки из молотого арахиса или коричневого сахара, смешанных с тёртым кокосом. Типичный способ приготовления включает быстрое приготовление муки на пару как муки, так и начинки. После готовности её подают на листьях пандана, чтобы придать сладкий вкус и аромат [68]. Однако putu piring не удовлетворяет требованиям по содержанию питательных веществ, поскольку рисовая мука, являющаяся основным ингредиентом блюда, содержит малое количество клетчатки. В этой связи изучалась возможность изготовления названного десерта с использованием овсяной муки (ОМ) и МСКП в качестве функциональных ингредиентов. Исследовалось влияние соотношения ОМ и МСКП на сенсорную приемлемость и физико-химические свойства порошка при различных уровнях процентного соотношения названных ингредиентов. Физический анализ показал, что цвет putu piring по показателю светлости (L^*) колеблется от 74,17 до 19,76, значения красноты (a*) – от 0,23 до 1,90, а значения желтизны (b*) – от 13,97 до 20,65. Результаты сенсорной оценки показали, что putu piring, изготовленный по стандартному рецепту, набрал наибольшее количество баллов сравнения, за ним следуют десерты, изготовленные из 30 % ОМ и 70 % МСКП и 50 % ОМ с 50 % МСКП по всем оцениваемым параметрам. Анализ показал, что putu piring на основе ОМ и МСКП значительно различается ($p < 0,05$) по содержанию сырой клетчатки. Сделан вывод, что добавление ОМ и МСКП в putu piring может повысить пищевую ценность продукта, сделав его более богатым клетчаткой [69].

Эти же два вышеназванных функциональных ингредиента использовались для изготовления otak-otak – национального блюда ряда стран Юго-Восточной Азии, в частности, Малайзии, Сингапура, Индонезии. Представляет собой небольшую продолговатую запеканку из рыбы, морепродуктов или, значительно реже, других белковых продуктов с различными добавками и специями, приготовленную в обёртке из банановых или пальмовых листьев. Otak-otak может готовиться из многих видов рыбы, преимущественно морской. Обезглавленная и очищенная от костей рыба перерабатывается в фарш вместе с определённым набором дополнительных ингредиентов: чаще всего ими служат репчатый лук, зелёный лук, лук-порей, лук-шалот, чеснок, стручковый перец, лимонник и другая зелень. В фарш добавляется некоторое количество муки – обычно саговой, тапиоковой или рисовой, яичный белок, а также кокосовое молоко или кокосовые сливки в довольно большом объёме, как правило, четверть или треть от объёма рыбы. Фарш приправляется солью, сахаром, молотым перцем, измельчённым калганом и другими специями [70]. Изучалось влияние ОМ и МСКП на физико-химические свойства и сенсорное восприятие otak-otak. В рецептурах использовались контрольные варианты: контроль – 100 % тапиоковой муки, МСКП – от 0 до 100 %, ОМ – также от 0 до 100 % с варьированием содержания с шагом 25 %. Анализ показал, что otak-otak с добавлением МСКП и ОМ значительно различался ($p < 0,05$) по содержанию сырой клетчатки и жира. Физический анализ показал, что цвет otak-otak для значения светлости (L*) варьируется от 53,71 до 57,58, для значения красноты (a*) – от 13,15 до 15,10, для значения желтизны (b*) – от 32,80 до 35,21, а для ΔE – от 0,96 до 4,86. Анализ профиля текстуры показал, что твердость варьируется от 2147,60 до 5006,00 г, упругость – от 0,39 до 0,66 мм, связность – от 0,35 до 0,48, а разжевываемость – от 370,40 до 1459,90 гс. Для сенсорной оценки изделие по контрольному рецепту имеет наивысший показатель, но не имеет существенной разницы ($p < 0,05$) с рецептурами, содержащими 75 % МСКП и 25 % ОМ или 25 % МСКП и 75 % ОМ [71].

Кроме традиционной, наиболее распространенной в Российской Федерации крупяной кукурузы, дающей зерновки желтого цвета, в мире выращивается и другие цветные разновидности зерна растения: оранжевого, розового, красного, фиолетового и синего цветов. В последние десятилетия научные исследования сосредоточили внимание на пигментированных сортах кукурузы из-за наличия в них антоцианов. Фиолетовые сорта кукурузы привлекли внимание исследователей в большей степени благодаря своему потенциальному применению в пищевых добавках и косметической промышленности. Соответственно, после выделения зерновок фиолетовой кукурузы остаются окрашенные початки, также содержащие БАВ полифенольной природы. Основным методом выделения БАВ из початков кукурузы является экстракция. Сведения по экстракции БАВ из початков кукурузы приведены в обзорной работе [72].

В литературных источниках выявлены несколько статей, посвященных использованию СКП для изготовления различных напитков. Так, в частности, указывается, что фиолетовая кукуруза широко используется в Перу для приготовления традиционных напитков и десертов, таких как «Чича морада». Авторы работы [73] указывают, что после обработки фиолетовые СКП, остающиеся в качестве побочного продукта, сохраняют значительное количество биологически активных соединений, потенциально пригодных для использования. В этой связи предлагается их использование в качестве основного компонента при производстве чайных напитков. Авторами разработано 14 рецептур, различающихся пропорциями МСКП, айвы, стевии, корицы и гвоздики, а также продолжительностью настаивания (5 и 10 минут при 100 ºС) в горячей воде. Выявлено, что характеристиками, улучшающими приемлемость для потребителей, являются: вкус «Чича морада», фруктовый вкус, сладкий и фруктовый запах. Картирование позволило определить рецептуру, которая получила 90 % предпочтений потребителей, несмотря на то, что они не обладали самыми высокими концентрациями общих полифенолов, антиоксидантной активностью и мономерными антоцианами. Определено, что наиболее предпочитаемый напиток имел pH = 3,8, содержание сухого вещества – 4,26 %, значение антиоксидантной активности по методу ORAC – 7,14 мкмоль TE/см^3, общее содержание полифенолов – 226,2 мг GAE/дм^3 и содержание мономерных антоцианов – 70,53 ± 4,40 мг C3GE/дм^3. Значения светлости (L^*), красноты (a^*) и желтизны (b^*) составили 53,54, 55,75 и 20,23 соответственно [73].

Оптимизирован состав чайного напитка, приготовленного из порошка фиолетового СКП, содержащего в своем составе, кроме него, айву, стевию, корицу и гвоздику. Для упаковки единичных чайных доз смесей выбран фильтр-пакет из кукурузного волокна. Состав напитка был оптимизирован для достижения максимизации антиоксидантной способности и общего содержания мономерных антоцианов в настоях. Оптимальный состав чайного напитка, полученный с помощью регрессионной модели, состоял из 86,72 % МСКП, 4,64 % айвы, 8,64 % стевии, 3,33 % корицы и 0,25 % гвоздики. Отмечено, что желательность составила 91,2 %, антиоксидантная активность – 9,51 ± 1,21 мкмоль TE/см^3 и общее содержание мономерных антоцианов – 98,49 мг C3GE/дм^3 [74].

Указывается, что напиток из фиолетового СКП улучшает внимание и рабочую память частично за счет снижения окислительного стресса. Выявлено отсутствие серьезных побочных эффектов или признаков токсичности. Определено, что напиток из МСКП содержит в своем составе цианидин-3-глюкозид, пеларгонидин-3-глюкозид, цианидин-3-О-(6”-малонил-глюкозид) и цианидин-3-о-β-глюкопиранозид и рекомендован для потребления женщинам в период беременности [75].

В мировой литературе выявлены несколько работ по применению экстрактов из фиолетовых СПК. Рекомендовано для увеличения выхода БАВ из порошка стержня початка фиолетовой кукурузы использовать ультразвуковое (УЗ) воздействие [76]. Показано, что использование последнего приводит к сокращению времени экстракции до 58 % и 67 % соответственно, по выходу общих мономерных антоцианов и антиоксидантной емкости. Выявлено, что стабильность этого экстракта была выше при pH ≤ 3, снижаясь при нейтральном и щелочном pH.

Определено, что количество фенольных соединений в экстрактах, полученных с использованием УЗ, варьировалось от 215,17 ± 33,49 до 527,33 ± 103,79 мг ГАЭ /100 г в зависимости от времени экстрагирования и соотношения жидкость : твердое тело. Кроме того, экстракты из порошка фиолетовых СПК показали более высокую способность к нейтрализации свободных радикалов согласно результатам, полученным с использованием метода $ABTS^{\bullet+}$ по сравнению с тестом $DPPH^{\bullet}$. Определены 10 фенольных соединений и флавоноидов в составе экстрактов: п-кумаровая кислота, 4-О-гексозид кофеиновой кислоты, 5-О-кофеоилхининовая кислота, апигенин-О-гексозид, лютеолин-О-рутинозид, апигенин-О-пентозил-гексозид, апигенин 6-С-пентозил-8-С-гексозид, димер процианидина, скополетин и диадзин [77]. Указывается, что экстракты из фиолетовых СКП могут использоваться в рецептурах пищевых продуктов в качестве натурального красителя с функциональными свойствами [78].

Свойства некоторых фенольных соединений и флавоноидов, указанных выше, а также их терапевтические свойства приведены в таблице 1. Как следует из приведенных в таблице 1 данных, определенные в составе экстрактов химические соединения обладают широким спектром терапевтических свойств.

Кроме того, учитывая высокое содержание фенольных соединений в составе экстрактов из СПК, последние возможно использовать для стабилизации различных масел. Так, в работе [79] показано, что метанольный экстракт из СПК имеет высокий выход (19,5 %) и продемонстрировал превосходную антиоксидантную активность. Метанольный экстракт из МСКП добавлялся в концентрациях 500 и 1000 ppm к рафинированному, отбеленному и дезодорированному кукурузному маслу. В качестве стандарта, помимо контроля, использовался бутилированный гидрокситолуол в концентрации 200 ppm. Образцы стабилизированного кукурузного масла, подвергнутые микроволновому нагреву, периодически анализировались. Величину окислительных изменений отслеживали путем измерения конъюгированных диенов, конъюгированных триенов, п-анизидина и перекисного числа. Результаты различных параметров окисления показали, что метанольный экстракт в концентрации 1000 ppm был более эффективен, чем бутилированный гидрокситолуол, и ингибировал повышение значений п-анизидина, конъюгированных диенов, конъюгированных триенов и перекисного числа до 41,8 %, 45,0 %, 39,7 % и 65,0 %, соответственно, по сравнению с контролем [79].

Исследовано влияние этанольного экстракта из СПК на значения перекисного числа растительного масла. Для этого в колбу объемом 250 см^3 добавлялось 25 см^3 кукурузного масла, 50 см^3 абсолютного C_2H_5OH и экстракт из измельченных СПК в количестве 0,50–2,25 гр. Содержимое колбы нагревалось на водяной бане при 70 ºС, со временем выдержки на 10–50 минут, затем рассчитывалось кислотное и перекисное число. Выявлено, что чем больше экстракта добавлено в растительное масло, тем сильнее способность ингибировать увеличение перекисного числа. Наилучший результат снижения кислотного числа достигается при добавлении экстракта из СКП в количестве до 2 гр [80].

Также этанольные экстракты из порошка фиолетовых СКП использовались для разработки эмульсионных продуктов. Концентрированные спиртовые экстракты были получены с помощью УЗ при 50 ºС. Эмульсии с экстрактом из фиолетовых СКП готовились в различных

концентрациях. Майонезы, содержащие 0,2–0,3 % антоцианов из экстракта фиолетовых СКП, хранились в течение 45 дней для последующей физико-химической, реологической и микробиологической оценки. Эмульсии с экстрактами соответствовали стандартам пищевой промышленности (pH – 3,5–4, перекисное число – 1,33–1,57 ммоль активного кислорода/кг, кислотность – 0,35–0,56 мг/г) и демонстрировали псевдопластическое поведение, аналогичное контрольному образцу.

Таблица 1 – Свойства некоторых фенольных соединений и флавоноидов, определенных в составе экстрактов
Table 1 – Properties of some phenolic compounds and flavanoids identified in extracts

Название	Брутто-формула	Физико-химические показатели	Терапевтические свойства
п-кумаровая кислота	$C_9H_8O_3$, молярная масса –164,16 г/моль	$T_{пл}$ – 210–213 ºС, слабо растворимое в воде, хорошо растворяется в этаноле и диэтиловом эфире	обладает антиоксидантными, противовирусными, антибактериальными, противовоспалительными, иммунотропными, нейротропными, антикоагулянтными свойствами
цианидин-3-глюкозид (хризантемин)	$C_{21}H_{21}O_{11}Cl$ молярная масса – 484,83 г/моль	Растворим в воде	снижает инсулинорезистентность, оказывает защитное действие на клетки сетчатки. Обладает антиоксидантным, противовоспалительным, антигипергликемическим, антиостеопорозным и антидиабетическим действием
пеларгонидин-3-глюкозид (каллистефин)	$C_{21}H_{21}O_{10}Cl$, 468,8 г/моль	Растворим в диметилсульфоксиде (ДМСО)	Обладает противораковыми, противовоспалительными, антибактериальными, противодиабетическими противораковыми противогипергликемическими свойствами
цианидин-3-о-β-глюкопиранозид	$C_{33}H_{41}O_{20}Cl$, 793.1 г/моль	Растворим в диметилформамиде (ДМФ) – 0,1 мг/см^3; ДМСО – 5 мг/см^3	Обладает антиоксидантными свойствами
апигенин-О-гексозид	$C_{21}H_{20}O_{10}$, 432,4 г/моль	Белого цвета, не растворим в воде, растворим в органических растворителях	Антиэстрогенная и противораковая активность
лютеолин-О-рутинозид	$C_{27}H_{30}O_{15}$, 594,52 г/моль		Защищает клетки RIN-5F от токсичности, вызванной высокой концентрацией глюкозы, стимулирует секрецию инсулина и способствует всасыванию и гомеостазу глюкозы. Обладает противоартритным и противогрибковым эффектом
скополетин	$C_{10}H_8O_4$, 192,17 г/моль	Растворим в воде и ДМСО	обладает потенциальным противонеопластическим, антидофаминергическим, антиоксидантным, противовоспалительным и антихолинэстеразным эффектом
7-0-глюкозид дайдзеина (диадзин)	$C_{21}H_{20}O_9$, 416,38 г/моль	Белый порошок, $T_{пл}$ = 236 ºС, растворим в этаноле, метаноле и ДМСО	тормозит развитие и распространение раковых клеток

Выявлено снижение вязкости эмульсии на 50 % к 45-му дню хранения. В эмульсии с максимальным содержанием антоцианов определены более высокие значения содержания фенольных соединений (38,78 мг галловой кислоты/г эмульсии) и антиоксидантной активности (23,487 мг тролокса/г эмульсии) на 8 % и 13 % соответственно по сравнению с образцом с этилен диаминтетраацетатом, а срок его хранения составил 153,3 дня. Идентификация дельфинидин-3-О-глюкозида, цианидин-3-О-глюкозида и п-кумароилхининовой кислоты в экстракте, полученном с помощью УЗ, подчеркивает потенциал экстракте в качестве функционального ингредиента в пищевых эмульсиях [81].

ДРУГИЕ ПУТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЧАТКОВ КУКУРУЗЫ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Одним из путей использования СКП является их использование в составе жидкого дыма, используемого для копчения рыбы. Так, в работе [82] изучались характеристики жидких дымов из древесины ламторо (*Leucaena leucocephala*) и из СКП, содержащих антиоксидантные и бактерицидные компоненты, обработанных методом сухой дистилляции при температуре 400 ºС. Определено, что значения pH жидкого дыма из древесины составило pH = 3,0, из СКП – pH = 2,9. Содержание фенольных соединений в каждом жидком дыме составляло: 481,2 ppm (ламторо) и 335 ppm (СКП). Указывается, что жидкий дым из початков, содержащий фенольные соединения различной структуры, например: 2-метилфенол, 2-метоксифенол, 2,4-диметоксифенол, гваякол придает продуктам специфический дымный аромат. Также выявлено отсутствие токсичного бенз(а)пирена в составе исследуемых жидких дымов. Кроме того, отмечено, что оба исследуемых продукта придают прокопченным рыбам глянцевый золотисто-коричневый цвет, восхитительный вкус, специфический запах и особые ароматы [82].

ВЫВОДЫ

В обзорной статье обобщена информация по использованию биомассы СКП в качестве компонента для производства различных продуктов питания (хлеба, макаронных и бакалейных изделий, национальных блюд). Приведена информация об объемах выращивания зерновок кукурузы и объемах образующихся СКП в мировом масштабе. Даны сведения литературных источников о содержании биогенных соединений (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, жирных кислот и белковых соединений, некоторых фенольных соединений) в составе СКП. Определено, что МПК содержит в своем составе большое количество пищевых волокон и может использоваться в качестве функционального компонента в различных продуктах питания. Указывается, что полифенольные соединения в составе СКП могут использоваться как потенциально реализуемые пищевые ингредиенты, обладающие антиоксидантными свойствами. Также показано использование экстрактов и порошка из СКП для приготовления различных напитков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lesmana D., Vianney Y.M., Goenawan Y.A., Natalie K., Sukweenadhi J., Buschle-Diller G., Mukti Y.P., Erawati C.M., Purwanto M.G. Valorization of peel-based agro-waste flour for food products: a systematic review on proximate composition and functional properties // ACS Food Science and Technology. 2021. V. 2. No. 1. P. 3–20. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.1c00353.

2. Kumar H., Bhardwaj K., Sharma R., Nepovimova E., Kuča K., Dhanjal D.S., Verma R., Bhardwaj P., Sharma S., Kumar D. Fruit and vegetable peels: utilization of high value horticultural waste in novel industrial applications // Molecules. 2020. V. 25. P. 1–21. DOI: 10.3390/molecules2.

3. Gowe C. Review on potential use of fruit and vegetables by-products as a valuable source of natural food additives // Food Science and Quality Management. 2015. V. 45. No 1. P. 47–61.

4. Zhu Y., Luan Y., Zhao, Y., Liu J., Duan Z., Ruan R. Current technologies and uses for fruit and vegetable wastes in a sustainable system: A review // Foods. 2023. V. 12. P. 1–17. DOI: 10.3390/foods12101949.

5. Ganesh K.S., Sridhar A., Vishali S. Utilization of fruit and vegetable waste to produce value-added products: Conventional utilization and emerging opportunities – A review // Chemosphere. 2022. V. 287. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132221.

6. Augustin M.A., Sanguansri L., Fox E.M., Cobiac L., Cole M.B. Recovery of wasted fruit and vegetables for improving sustainable diets // Trends in Food Science & Technology. 2020. V. 95. P. 75–85. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.11.010.

7. Râpă M., Darie-Niță R.N., Coman G. Valorization of fruit and vegetable waste into sustainable and value-added materials // Waste. 2024. V. 2. No. 3. P. 258–278. DOI: 10.3390/waste2030015.

8. Ueda J.M., Pedrosa M.C., Heleno S.A., Carocho M., Ferreira I.C., Barros L. Food additives from fruit and vegetable by-products and bio-residues: a comprehensive review focused on sustainability // Sustainability. 2022. V. 14. No. 9. P. 1–18. DOI: 10.3390/su14095212.

9. Dilucia F., Lacivita V., Conte A., del Nobile M.A. Sustainable use of fruit and vegetable by-products to enhance food packaging performance // Foods. 2020. V. 9. No. 7. P. 1–19. DOI: 10.3390/foods9070857.

10. Ratu R.N., Velescu I.D., Stoica F., Usturoi A., Arsenoaia V.N., Crivei I.C., Postolache A.N., Lipsa F.D.; Filipov F., Florea A.M., Chitea M.A., Bruma I.S. Application of agri-food by-products in the food industry // Agriculture. 2023. V. 13. P. 1–25. DOI: 10.3390/agriculture13081559.

11. Ronie M.E., Aziz A.H.A., Kobun R., Pindi W., Roslan J., Putra N.R., Mamat H. Unveiling the potential applications of plant by-products in food – A review // Waste Management Bulletin. 2024. V. 2. P. 183–203. DOI: 10.1016/j.wmb.2024.07.008.

12. Marcillo-Parra V., Tupuna-Yerovi D.S., González Z., Ruales J. Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application – A review // Trends in Food Science & Technology. 2021. V. 116. P. 11–23. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.07.009.

13. Корнен Н.Н., Першакова Т.В., Шахрай Т.А., Федосеева О.В. Пищевые и биологически активные добавки из вторичных растительных ресурсов // Научный журнал КубГАУ. 2016. № 121(07). С. 1–17.

14. Шайхиева К.И., Степанова С.В., Борисова С.В., Шайхиев И.Г. Использование отходов от переработки гороха (*Pisum sativum*) в продуктах питания // Пищевая промышленность. 2025. № 9. С. 56–65.

15. Nartea A., Kuhalskaya A., Fanesi B., Orhotohwo O.L., Susek K., Rocchetti L., Di Vittori V., Bitocchi E., Pacetti D., Papa R. Legume byproducts as ingredients for food applications: Preparation, nutrition, bioactivity, and techno-functional properties // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2023. Vol. 22. P. 1953–1985. DOI: 10.1111/1541-4337.13137.

16. O'Shea N., Arendt E.K., Gallagher E. Dietary fibre and phytochemical characteristics of fruit and vegetable by-products and their recent applications as novel ingredients in food products // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2012. V. 16. P. 1–10.

17. Igathinathane C., Womac A.R., Sokhansanj S., Pordesimo L.O. Vertical mass and moisture distribution in standing corn stalks // 2004 ASAE Annual Meeting. 2004. P. 1–20.

18. Medeiros J.C., Zavala J., Shahrokhi M., Minyo R., Geyer A., Lindsey A., Thomison P., Ortez O. Historical changes and yield in the Ohio corn performance test: A 50-year summary // Agronomy Journal. 2025. V. 117. No. 1. P. 1–19. DOI: 10.1002/agj2.21746.

19. Miranda M.T., Sepúlveda F.J., Arranz J.I., Montero I., Rojas C.V. Analysis of pelletizing from corn cob waste // Journal of Environmental Management. 2018. V. 228. P. 303–311. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.105.

20. Cao Q., Xie K.C., Bao W.R., Shen S.G. Pyrolytic behavior of waste corn cob // Bioresource Technology. 2004. V. 94. No. 1. P. 83–89. DOI: 10.1016/j.biortech.2003.10.031.

21. Arumugam A., Malolan V.V., Ponnusami V. Contemporary pretreatment strategies for bioethanol production from corncobs: a comprehensive review // Waste and Biomass Valorization. 2021. V. 12. No. 2. P. 577–612. DOI: 10.1007/s12649-020-00983-w.

22. Lamido S.I., Alhassan A.U., Lawal S. Effect of process parameter on the production of bioethanol from corn cob and rice husk // International Journal of Engineering Development and Research. 2021. V. 9. No. 4. P. 14–17.

23. Okeke F.O., Ahmed A., Imam A., Hassanin H. A review of corncob-based building materials as a sustainable solution for the building and construction industry // Hybrid Advances. 2024. V. 6. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.hybadv.2024.100269.

24. Pinto J., Cruz D., Paiva A., Pereira S., Tavares P., Fernandes L., Varum H. Characterization of corn cob as a possible raw building material // Construction and Building Materials. 2012. V. 34. P. 28–33. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.014.

25. Mohammed A.A., Hasan Z., Omran A.A.B., Kumar V.V., Elfaghi A.M., Ilyas R.A., Sapuan S.M. Corn: its structure, polymer, fiber, composite, properties, and applications. Polymers. 2022. V. 14. No. 20. P. 1–25. DOI: 10.3390/polym14204396.

26. Louis A.C.F., Venkatachalam S. Corncob waste for food packaging // Agro-Waste Derived Biopolymers and Biocomposites: Innovations and Sustainability in Food Packaging. 2024.

Chapter 3. P. 69–90. DOI: 10.1002/9781394175161.ch3.

27. Wakudkar H., Jain S. A holistic overview on corn cob biochar: A mini-review // Waste Management & Research. 2022. V. 40. No. 8. P. 1143–1155. DOI: 10.1177/0734242X211069741.

28. Radenković M., Kovačević M., Radojičić V., Tošić M., Momčilović M., Živković S. Corn residue-based activated carbon for heavy metal removal: A review of adsorptive performance and properties // Processes. 2025. V. 13. No. 11. P. 1–30. DOI: 10.3390/pr13113406.

29. Iwuozor K.O., Umeh C.T., Emmanuel S.S., Emenike E.C., Egbemhenghe A.U., Ore O.T., Micheal T.T., Omoarukhe F.O., Sagboye P.A., Ojukwu V.E., Adeniyi A.G. A comprehensive review on the sequestration of dyes from aqueous media using maize-/corn-based adsorbents // Water Practice & Technology. 2023. V. 18. No. 12. P. 3065–3108. DOI: 10.2166/wpt.2023.214.

30. Sharma A., Tomer A., Singh J., Chhikara B.S. Biosorption of metal toxicants and other water pollutants by Corn (Maize) plant: A comprehensive review // Journal of Integrated Science and Technology. 2019. V. 7. No. 2. P. 19–28.

31. Enawgaw H., Tesfaye T., Yilma K.T., Limeneh D.Y. Multiple utilization ways of corn by-products for biomaterial production with bio-refinery concept; a review // Materials Circular Economy. 2023. V. 5. No. 1. P. 1–14. DOI: 10.1007/s42824-023-00078-6.

32. Hang Y.D., Woodams E.E. Enzymatic enhancement of citric acid production by *Aspergillus niger* from corn cobs // LWT-Food Science and Technology. 2001. V. 34. No. 7. P. 484–486. DOI: 10.1006/fstl.2001.0784.

33. Sánchez C., Egüés I., García A., Llano-Ponte R., Labidi J. Lactic acid production by alkaline hydrothermal treatment of corn cobs // Chemical Engineering Journal. 2012. V. 181. P. 655–660. DOI: 10.1016/j.cej.2011.12.033.

34. Wang Y., Du J., Li Q., Tao Y., Cheng Y., Lu J., Wang H. Bioconversion of cellulose and hemicellulose in corn cob into L-lactic acid and xylo-oligosaccharides // International Journal of Biological Macromolecules. 2023. V. 253. 126775. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126775.

35. Lau T., Harbourne N., Oruña-Concha M.J. Optimization of enzyme-assisted extraction of ferulic acid from sweet corn cob by response surface methodology // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2020. V. 100. No. 4. P. 1479–1485. DOI: 10.1002/jsfa.10155.

36. Cheng L., Liu H., Cui Y., Xue N., Ding W. Direct conversion of corn cob to formic and acetic acids over nano oxide catalysts // Journal of Energy Chemistry. 2014. V. 23. No. 1. P. 43–49. DOI: 10.1016/S2095-4956(14)60116-9.

37. Ariyanti D., Rimantho D., Leonardus M., Ardyani T., Fiviyanti S., Sarwana W., Hanifa Y., Agustyan E., Meliana Y., Susparini N.T., Fansuri M.H., Putra O.A., Simanungkalit S. Valorization of corn cob waste for furfural production: A circular economy approach // Biomass and Bioenergy. 2025. V. 194. 107665. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.107665.

38. Hromádková Z., Kováčiková J., Ebringerová A. Study of the classical and ultrasound-assisted extraction of the corn cob xylan // Industrial Crops and Products. 1999. V. 9. No. 2. P. 101–109. DOI: 10.1016/S0926-6690(98)00020-X.

39. Melo-Silveira R.F., Fidelis G.P., Costa M.S.S.P., Telles C.B.S., Dantas-Santos N., Elias S.O., Ribeiro V.B., Barth A.L., Macedo A.J., Leite E.L., Rocha H.A.O. In vitro antioxidant, anticoagulant and antimicrobial activity and in inhibition of cancer cell proliferation by xylan extracted from corn cobs // International Journal of Molecular Sciences. 2011. V. 13. No. 1. P. 409–426. DOI: 10.3390/ijms13010409.

40. Ismail S.A., Nour S.A., Hassan A.A. Valorization of corn cobs for xylanase production by *Aspergillus flavus* AW1 and its application in the production of antioxidant oligosaccharides and removal of food stain // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2022. V. 41. 102311. DOI: 10.1016/j.bcab.2022.102311.

41. Zhu Y., Kim T.H., Lee Y.Y., Chen R., Elander R.T. Enzymatic production of xylooligosaccharides from corn stover and corn cobs treated with aqueous ammonia // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2006. V. 129–132. No. 1. P. 586–598.

42. Samanta A.K., Jayapal N., Kolte A.P., Senani S., Sridhar M., Dhali A., Suresh K.P., Jayaram C., Prasad C.S. Process for enzymatic production of xylooligosaccharides from the xylan of corn cobs // Journal of Food Processing and Preservation. 2015. V. 39. No. 6. P. 729–736. DOI: 10.1111/jfpp.12282.

43. Yu X., Yin J., Li L., Luan C., Zhang J., Zhao C., Li S. Prebiotic potential of xylooligosaccharides derived from corn cobs and their in vitro antioxidant activity when combined with *Lactobacillus* // Journal of Microbiology and Biotechnology. 2015. V. 25. No. 7. P. 1084–1092. DOI: 10.4014/jmb.1501.01022.

44. Aniola J., Gawecki J., Czarnocinska J., Galinski G. Corncobs as a source of dietary fiber // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. 2009. V. 59. No. 3. P. 247–249.

45. Sanabria A.F.G. Produccion y ususdel olote del maiz (*Zea mays*). Trabajomonografico de actualization que para obtener el titulode quimico de alimentos. Cuidad Universaria, Mexico, 2024. 142 p. (на испанском).

46. Lau T., Harbourne N., Concha, M.J.O. Valorization of sweet corn (*Zea mays*) cob by extraction of valuable compounds // International Journal of Food Science and Technology. 2019. V. 54. No. 4. P. 1240–1246. DOI: 10.1111/ijfs.14092.

47. Zhou Y., Sun Q., Teng C., Zhou M., Fan G., Qu P. Preparation and improvement of physicochemical and functional properties of dietary fiber from corn cob fermented by *Aspergillus niger* // Journal of Microbiology and Biotechnology. 2023. V. 34. No. 2. P. 330–339. DOI: 10.4014/jmb.2308.08010.

48. Delgado L.V.B., de la Rosa Millán J., Flores D.G. Comprehensive physical and chemical characterization of corncob and Nopal fibers: exploring sustainable alternatives for high-value applications // ACS Food Science & Technology. 2023. V. 3. No. 12. P. 2132–2143. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.3c00298.

49. Hernández-García Y.R., Luzardo-Ocampo I., Gaytán-Martínez M., Loarca-Piña G., Vázquez-Barrios E., Campos-Vega R. Corn cob and corn silk-based ingredients possess bioaccessible and antioxidant phenolic compounds displaying anti-inflammatory effects in vitro // Food & Function. 2024. V. 15. No 24. P. 12069-12082. DOI: 10.1039/D4FO02968B.

50. Xu M., Wang C., Lyu G., Zhong L., Yang L., Wang Z., Qin C., Ji X., Yang G., Chen J., Xu F. Structural characterization and antioxidant activity of milled wood lignin from xylose residue and corncob // Polymers. 2019. V. 11. No. 12. P. 1–9. DOI: 10.3390/polym11122092.

51. Rose D.J., Inglett G.E., Liu S.X. Utilisation of corn (*Zea mays*) bran and corn fiber in the production of food components // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2010. V. 90. No. 6. P. 915–924. DOI: 10.1002/jsfa.3915.

52. Kuan Y.H., Liong M.T. Chemical and physicochemical characterization of agrowaste fibrous materials and residues // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2008. V. 56. No. 19. P. 9252–9257.

53. Viroli S.L.M., Silva L.G. da S., Vaz A.V., Viroli S.G., Carvalho N.P., Duarte H.A., Sousa A.S., Leite L.T., Veloso C., Gomes N.B., Costa F.A., Sales P.V.G. Caracterização da farinha do sabugo de milho e sua utilização como alternativa para enriquecimento de produtos alimentícios // Research, Society and Development. 2022. V. 11. No. 2. P. 1–11. DOI: 10.33448/rsd-v11i2.25783 (на португальском).

54. Lee C.M., Gan Y.L., Chan Y.L., Yap K.L., Tang T.K., Tan C.P., Lai O.M. Physicochemical and sensory analyses of high fibre bread incorporated with corncob powder // International Food Research Journal. 2019. V. 26. No. 5. P. 1609–1616.

55. Hamzah Y., Lian W.F. Physicochemical properties and acceptance of high fibre bread incorporated with

corn cob flour // Asian Journal of Food and Agro-Industry. 2012. V. 5. No. 6. P. 547–553.

56. Ali Z., Anjum F.M., Zahoor T. Sensory characteristics of bread prepared from lactic acid obtained from corn cobs, an agricultural waste // Pakistan Journal of Agricultural Science. 2007. V. 44. No. 3. P. 539–548.

57. Gaikwad P.S., Oswal M., Malini S.H., Supreetha S. Fiber-Enriched Pasta // Advances in Pasta Technology. 2025. P. 175–196. DOI: 10.1007/978-3-031-84497-3.

58. Nguyen T.Q.N., Tran T.T.T., Mai V.X.H., Nguyen T.B., Ton N.M.N., Le V.V.M. Corncob powder and transglutaminase addition in pasta: Effects on proximate composition, physical and cooking properties, and overall acceptability of the product // Cereal Chemistry. 2023. V. 100. No. 2. P. 346–359. DOI: 10.1002/cche.10615.

59. Njideka B.E., Chijioke M.B., Chioma O.N., Nnennaya A.N., Iheduzaju P.I.A. Maize cob as dietary fiber source for high-fiber biscuit // GSC Biological and Pharmaceutical Sciences. 2020. V. 12. No. 1. P. 138–144. DOI: 10.30574/gscbps.2020.12.1.0203.

60. Hoang N.H., Do H.H., Dang T.H.Y., Ton N.M.N., Tran T.T.T., Le V.V.M. Fiber-enriched biscuits prepared with enzyme-treated corncob powder: Nutritional composition, physical properties, and sensory acceptability // Journal of Food Processing and Preservation. 2022. V. 46. No. 8. P. 1–10. DOI: 10.1111/jfpp.16784.

61. Putra E.D.L., Yuliasmi S., Prasetyo B.E., Zebua N.F. The utilization of corn cob´ s cracker as anticipation of harvest failure for economic improvement for farmer in Narigunung 1 village, Karo regency // Abdimas talenta: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat. 2018. V. 3. No. 2. P. 238–241.

62. dos Santos T.M., Andressa I., Nascimento G.K.S., Neves N. de A., Schmiele M. Corncob flour as an alternative ingredient for muffins: technological and nutritional perspectives // Revista Principia. 2025. V. 62. P. 1–17. DOI: 10.18265/2447-9187a2025id8695.

63. Lau T., Clayton T., Harbourne N., Rodriguez-Garcia J., Oruna-Concha M.J. Sweet corn cob as a functional ingredient in bakery products // Food Chemistry. 2022. V. 13. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.fochx.2021.100180.

64. Lau T. Recovery of functional ingredients from sweet corn (*Zea mays*) cobs. Thesis submitted for the requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Food and Nutritional Science. University of Rearing, Reading, Great Britain, 2018. 172 p.

65. Nordin R., Mazlan M.I., Mohsin A.Z., Madzuki I.N. Characterization of dietary fibers from corn cobs as a potential functional ingredient in muffin // Malaysian Applied Biology. 2025. V. 54. No. 1. P. 64–75. DOI: 10.55230/mabjournal.v54i1.3176.

66. Kamaruzaman M.Y.B., Ab Karim S., Ishak F.A.B.C., Arshad M.M.B. The diversity of traditional Malay kuih in Malaysia and its potentials // Journal of Ethnic Foods. 2020. V. 7. No. 1. 22. DOI: 10.1186/s42779-020-00056-2.

67. Kumar N.E., Ahmad F. Effect incorporation of corn cob powder on the Physicochemical Properties and sensory acceptability of kuih kaswi // Journal of Biochemistry, Microbiology and Biotechnology. 2024. V. 12. No. SP1. P. 25–26. DOI: 10.54987/jobimb.v12iSP1.929.

68. Maker gardener. Putu Piring Snack – Homemade Recipe [Электронный ресурс] // https://www.makergardener.com/recipes/putu-piring-snack-homemade-recipe. Дата доступа: 27.12.2025.

69. Ahmad F., Ismail N.E., Chilek T.Z.T., Zamri A.I., Zainol M.K., Wahab R.A., Hamid M.A. Effect incorporated of oat and corn cob powder on physicochemical and sensory properties of Putu Piring // Bulletin of Culinary Art and Hospitality. 2021. V. 1. No. 1. P. 7–12. DOI: 10.17977/um069v1i12021p7-12.

70. Harmayani E., Anal A.K., Wichienchot S., Bhat R., Gardjito M., Santoso U., Siripongvuticorn S., Puripaatanavong J., Payyappallimana U. Healthy food traditions of Asia: exploratory case studies from Indonesia, Thailand, Malaysia, and Nepal // Journal of Ethnic Foods. 2019. V. 6. 1. P. 1–18. DOI: 10.1186/s42779-019-0002-x.

71. Ahmad F., Sapiee M.H. The Effect of corn cob powder and oat fibre incorporation in physicochemical properties and sensory acceptance of otak-otak // The Eurasia Proceedings of Health, Environment and Life Sciences. 2024. V. 13. P. 32–39.

72. Colombo R., Ferron L., Papetti A. Colored corn: An up-date on metabolites extraction, health implication, and potential use // Molecules. 2021.V. 26. No. 1. P. 1–42. DOI: 10.3390/molecules26010199.

73. Velit J.M., Puma-Isuiza G., Liñan-Pérez J., Salvá-Ruiz B.K., Silva-Jaimes M.I. Use of purple corn (*Zea mays* L.) cob in the formulation of functional teas developed using Flash Profile and CATA methods // Scientia Agropecuaria. 2025. V. 16. No. 4. P. 577–590. DOI: https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2025.044.

74. Díaz-García A., Salvá-Ruíz B., Bautista-Cruz N., Condezo-Hoyos L. Optimization of a natural low-calorie antioxidant tea prepared from purple corn (*Zea mays* L.) and stevia (*Stevia rebaudiana* Bert.) // LWT – Food Science and Technology. 2021. V. 150. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111952.

75. Wattanathorn J., Kirisattayakul W., Somboonporn W. A randomized controlled trial on the safety and cognitive benefits of a novel functional drink from a purple waxy corn byproduct in peri-and postmenopausal women // Antioxidants. 2025. V. 14. No. 10. P. 1–25. DOI: 10.3390/antiox14101262.

76. Rojas M.L., Ramirez K., Linares G. Biocompounds recovery from purple corn cob by-product: extraction kinetics, thermal and physicochemical stability of liquid and powdered anthocyanin-rich extract // Food and Bioproducts Processing. 2025. V. 149. P. 25–35. DOI: 10.1016/j.fbp.2024.11.010.

77. Hernández M., Ventura J., Castro C., Boone V., Rojas R., Ascacio-Valdés J., Martínez-Ávila G. UPLC-ESI-QTOF-MS2-Based identification and antioxidant activity assessment of phenolic compounds from red corn cob (*Zea mays* L.) // Molecules. 2018. V. 23. No. 6. P. 1–10. DOI: 10.3390/molecules23061425.

78. Rolandelli G., Favre L. C., Aguirre-Calvo T.R., Farroni A.E., del Pilar Buera M., dos Santos Ferreira C. An optimized purple corn cob extract as an ingredient for the development of maize-based extrudates with novel characteristics // Journal of Cereal Science. 2023. V. 114, 103809. DOI: 10.1016/j.jcs.2023.103809.

79. Sultana B., Anwar F., Przybylski R. Antioxidant potential of corncob extracts for stabilization of corn oil subjected to microwave heating // Food Chemistry. 2007. V. 104. No. 3. P. 997–1005. DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.12.061.

80. Fardani R.A., Hadiatun N., Febriana Y. Antioxidant of bulk cooking oil from corn cob extract // Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. 2025. V. 11. No. 1. P. 193–197. DOI: 10.29303/jppipa.v11i1.9699.

81. Sanchez J.S.G., Siche R. Incorporation of sonicated purple corn cob extracts into food emulsions: effects on physicochemical properties, antioxidant activity, and shelf life // Journal of Food Measurement and Characterization. 2025. V. 19. P. 7034–7051. DOI: 10.1007/s11694-025-03440-1.

82. Swastawati F. Liquid smoke performance of lamtoro wood and corn cob // Journal of Coastal Development. 2007. V. 10. No. 3. P. 189–196.

Информация об авторах

К. И. Шайхиева – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной экологии Казанского национального исследовательского технологического университета.

С. В. Борисова – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии пищевых производств

Казанского национального исследовательского технологического университета.

REFERENCES

1. Lesmana, D., Vianney, Y.M., Goenawan, Y.A., Natalie, K., Sukweenadhi, J., Buschle-Diller, G., Mukti, Y.P., Erawati, C.M., Purwanto, M.G. (2021). Valorization of peel-based agro-waste flour for food products: a systematic review on proximate composition and functional properties. *ACS Food Science and Technology*, 2 (1), 3-20. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.1c00353.

2. Kumar, H., Bhardwaj, K., Sharma, R., Nepovimova, E., Kuča, K., Dhanjal, D.S., Verma, R., Bhardwaj, P., Sharma, S., Kumar, D. (2020). Fruit and vegetable peels: utilization of high value horticultural waste in novel industrial applications. *Molecules*, 25, 1-21. DOI: 10.3390/molecules2.

3. Gowe, C. (2015). Review on potential use of fruit and vegetables by-products as a valuable source of natural food additives. *Food Science and Quality Management*, 45 (1), 47-61.

4. Zhu, Y., Luan, Y., Zhao, Y., Liu, J., Duan, Z., Ruan, R. (2023). Current technologies and uses for fruit and vegetable wastes in a sustainable system: A review. *Foods*, 12, 1-17. DOI: 10.3390/foods12101949.

5. Ganesh, K.S., Sridhar, A., Vishali, S. (2022). Utilization of fruit and vegetable waste to produce value-added products: Conventional utilization and emerging opportunities - A review. *Chemosphere*, 287, 1-14. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132221.

6. Augustin, M.A., Sanguansri, L., Fox, E.M., Cobiac, L., Cole, M.B. (2020). Recovery of wasted fruit and vegetables for improving sustainable diets.*Trends in Food Science & Technology*, 95, 75-85. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.11.010.

7. Râpă, M., Darie-Niță, R.N., Coman, G. (2024). Valorization of fruit and vegetable waste into sustainable and value-added materials. *Waste*, 2 (3), 258-278. DOI: 10.3390/waste2030015.

8. Ueda, J.M., Pedrosa, M.C., Heleno, S.A., Carocho, M., Ferreira, I.C., Barros, L. (2022). Food additives from fruit and vegetable by-products and bio-residues: a comprehensive review focused on sustainability. *Sustainability*, 14 (9), 1-18. DOI: 10.3390/su14095212.

9. Dilucia, F., Lacivita, V., Conte, A., del Nobile, M.A. (2020). Sustainable use of fruit and vegetable by-products to enhance food packaging performance. *Foods*, 9 (7), 1-19. DOI: 10.3390/foods9070857.

10. Ratu, R.N., Velescu, I.D., Stoica, F., Usturoi, A., Arsenoaia, V.N., Crivei, I.C., Postolache, A.N., Lipsa, F.D., Filipov, F., Florea, A.M., Chitea, M.A., Bruma, I.S. (2023). Application of agri-food by-products in the food industry. *Agriculture*, 13, 1-25. DOI: 10.3390/agriculture13081559.

11. Ronie, M.E., Aziz, A.H.A., Kobun, R., Pindi, W., Roslan, J., Putra, N.R., Mamat, H. (2024). Unveiling the potential applications of plant by-products in food - a review. *Waste Management Bulletin*, 2, 183-203. DOI: 10.1016/j.wmb.2024.07.008.

12. Marcillo-Parra, V., Tupuna-Yerovi, D.S., González, Z., Ruales, J. (2021). Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application - a review. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 11-23. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.07.009.

13. Kornen, N.N., Pershakova, T.V., Shakhrai, T.A., Fedoseeva, O.V. (2016). Food and biologically active additives from secondary plant resources. *Scientific journal of KubSAU*, 121 (07), 1-17. (in Russian).

14. Shaikhieva, K.I., Stepanova, S.V., Borisova, S.V., Shaikhiev, I.G. (2025). Use of waste from processing peas (*Pisum sativum*) in food products. *Food Industry*, (9), 56-65. (in Russian).

15. Nartea, A., Kuhalskaya, A., Fanesi, B., Orhotohwo, O.L., Susek, K., Rocchetti, L., Di Vittori, V., Bitocchi, E., Pacetti, D., Papa, R. (2023). Legume byproducts as ingredients for food applications: Preparation, nutrition, bioactivity, and techno-functional properties. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22, 1953-1985. DOI: 10.1111/1541-4337.13137.

16. O'Shea, N., Arendt, E.K., Gallagher, E. (2012). Dietary fibre and phytochemical characteristics of fruit and vegetable by-products and their recent applications as novel ingredients in food products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16. 1-10.

17. Igathinathane, C., Womac, A.R., Sokhansanj, S., Pordesimo, L.O. (2004). Vertical mass and moisture distribution in standing corn stalks. *2004 ASAE Annual Meeting*, 1-20.

18. Medeiros, J.C., Zavala, J., Shahrokhi, M., Minyo, R., Geyer, A., Lindsey, A., Thomison, P., Ortez, O. (2025). Historical changes and yield in the Ohio corn performance test: A 50-year summary. *Agronomy Journal*, 117 (1), 1-19. DOI: 10.1002/agj2.21746.

19. Miranda, M.T., Sepúlveda, F.J., Arranz, J.I., Montero, I., Rojas, C.V. (2018). Analysis of pelletizing from corn cob waste. *Journal of Environmental Management*, 228, 303-311. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.105.

20. Cao, Q., Xie, K.C., Bao, W.R., Shen, S.G. (2004). Pyrolytic behavior of waste corn cob. *Bioresource Technology*, 94 (1), 83-89. DOI: 10.1016/j.biortech.2003.10.031.

21. Arumugam, A., Malolan, V.V., Ponnusami, V. (2021). Contemporary pretreatment strategies for bioethanol production from corncobs: a comprehensive review. *Waste and Biomass Valorization*, 12 (2), 577-612. DOI: 10.1007/s12649-020-00983-w.

22. Lamido, S.I., Alhassan, A.U., Lawal, S. (2021). Effect of process parameter on the production of bioethanol from corn cob and rice husk. *International Journal of Engineering Development and Research*, 9 (4), P. 14-17.

23. Okeke, F.O., Ahmed, A., Imam, A., Hassanin, H. (2024). A review of corncob-based building materials as a sustainable solution for the building and construction industry. *Hybrid Advances*, 6, 1-16. DOI: 10.1016/j.hybadv.2024.100269.

24. Pinto, J., Cruz, D., Paiva, A., Pereira, S., Tavares, P., Fernandes, L., Varum, H. (2012). Characterization of corn cob as a possible raw building material. *Construction and Building Materials*, 34, 28-33. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.014.

25. Mohammed, A.A., Hasan, Z., Omran, A.A.B., Kumar, V.V., Elfaghi, A.M., Ilyas, R. A., Sapuan, S.M. (2022). Corn: its structure, polymer, fiber, composite, properties, and applications. *Polymers*, 14 (20), 1-25. DOI: 10.3390/polym14204396.

26. Louis, A.C.F., Venkatachalam, S. (2024). Corncob waste for food packaging. *Agro-Waste Derived Biopolymers and Biocomposites: Innovations and Sustainability in Food Packaging*, 3, 69-90. DOI: 10.1002/9781394175161.ch3.

27. Wakudkar, H., Jain, S. (2022). A holistic overview on corn cob biochar: A mini-review. *Waste Management & Research*, 40 (8), 1143-1155. DOI: 10.1177/0734242X211069741.

28. Radenković, M., Kovačević, M., Radojičić, V., Tošić, M., Momčilović, M., Živković, S. (2025). Corn residue-based activated carbon for heavy metal removal: A review of adsorptive performance and properties. *Processes,* 13 (11), 1-30. DOI: 10.3390/pr13113406.

29. Iwuozor, K.O., Umeh, C.T., Emmanuel, S.S., Emenike, E.C., Egbemhenghe, A.U., Ore, O.T., Micheal, T.T., Omoarukhe, F.O., Sagboye, P.A., Ojukwu, V.E., Adeniyi, A.G. (2023). A comprehensive review on the sequestration of dyes from aqueous media using maize-/corn-based adsorbents. *Water Practice & Technology*, 18 (12), 3065-3108. DOI: 10.2166/wpt.2023.214.

30. Sharma, A., Tomer, A., Singh, J., Chhikara, B.S. (2019). Biosorption of metal toxicants and other water pollutants by Corn (Maize) plant: A comprehensive review. *Journal of Integrated Science and Technology*, 7 (2), 19-28.

31. Enawgaw, H., Tesfaye, T., Yilma, K.T., Li-

meneh, D.Y. (2023). Multiple utilization ways of corn by-products for biomaterial production with bio-refinery concept; a review. *Materials Circular Economy*, 5 (1), 1-14. DOI: 10.1007/s42824-023-00078-6.

32. Hang, Y.D., Woodams, E.E. (2001). Enzymatic enhancement of citric acid production by *Aspergillus niger* from corn cobs. *LWT-Food Science and Technology*, 34 (7), 484-486. DOI: 10.1006/fstl.2001.0784.

33. Sánchez, C., Egüés, I., García, A., Llano-Ponte, R., Labidi, J. (2012). Lactic acid production by alkaline hydrothermal treatment of corn cobs. *Chemical Engineering Journal*, 181, 655-660. DOI: 10.1016/j.cej.2011.12.033.

34. Wang, Y., Du, J., Li, Q., Tao, Y., Cheng, Y., Lu, J., Wang, H. (2023). Bioconversion of cellulose and hemicellulose in corn cob into L-lactic acid and xylo-oligosaccharides. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126775. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126775.

35. Lau, T., Harbourne, N., Oruña-Concha, M.J. (2020). Optimization of enzyme-assisted extraction of ferulic acid from sweet corn cob by response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,100, (4), 1479-1485. DOI: 10.1002/jsfa.10155.

36. Cheng, L., Liu, H., Cui, Y., Xue, N., Ding, W. (2014). Direct conversion of corn cob to formic and acetic acids over nano oxide catalysts. *Journal of Energy Chemistry*, 23 (1), 43-49. DOI: 10.1016/S2095-4956(14)60116-9.

37. Ariyanti, D., Rimantho, D., Leonardus, M., Ardyani, T., Fiviyanti, S., Sarwana, W., Hanifa, Y., Agustyan, E., Meliana, Y., Susparini, N.T., Fansuri, M.H., Putra, O.A., Simanungkalit, S. (2025). Valorization of corn cob waste for furfural production: A circular economy approach. *Biomass and Bioenergy*, 194, 107665. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.107665.

38. Hromádková, Z., Kováčiková, J., Ebringerová, A. (1999). Study of the classical and ultrasound-assisted extraction of the corn cob xylan. *Industrial Crops and Products*, 9 (2),101-109. DOI: 10.1016/S0926-6690(98)00020-X.

39. Melo-Silveira, R.F., Fidelis, G.P., Costa, M.S.S.P., Telles, C.B.S., Dantas-Santos, N., Elias, S.O., Ribeiro, V.B., Barth, A.L., Macedo, A.J., Leite, E.L., Rocha, H.A.O. (2011). In vitro antioxidant, anticoagulant and antimicrobial activity and in inhibition of cancer cell proliferation by xylan extracted from corn cobs. *International Journal of Molecular Sciences*, 13 (1), 409-426. DOI: 10.3390/ijms13010409.

40. Ismail, S.A., Nour, S.A., Hassan, A.A. (2022). Valorization of corn cobs for xylanase production by *Aspergillus flavus* AW1 and its application in the production of antioxidant oligosaccharides and removal of food stain. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 41, 102311. DOI: 10.1016/j.bcab.2022.102311.

41. Zhu, Y., Kim, T.H., Lee, Y.Y., Chen, R., Elander, R.T. (2006). Enzymatic production of xylooligosaccharides from corn stover and corn cobs treated with aqueous ammonia. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 129-132 (1), 586-598.

42. Samanta, A.K., Jayapal, N., Kolte, A.P., Senani, S., Sridhar, M., Dhali, A., Suresh, K.P., Jayaram, C., Prasad, C.S. (2015). Process for enzymatic production of xylooligosaccharides from the xylan of corn cobs. *Journal of Food Processing and Preservation,* 39 (6), 729-736. DOI: 10.1111/jfpp.12282.

43. Yu, X., Yin, J., Li, L., Luan, C., Zhang, J., Zhao, C., Li, S. (2015). Prebiotic potential of xylooligosaccharides derived from corn cobs and their in vitro antioxidant activity when combined with *Lactobacillus*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25 (7), 1084-1092. DOI: 10.4014/jmb.1501.01022.

44. Aniola, J., Gawecki, J., Czarnocinska, J., Galinski, G. (2009). Corncobs as a source of dietary fiber. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 59 (3), 247-249.

45. Sanabria, A.F.G. Produccion y usosdel olote del maiz (*Zea mays*). Trabajo monografico de actualization que para obtener el titulode quimico de alimentos. Cuidad Universaria, Mexico, 2024. 142 p. (in Spain).

46. Lau, T., Harbourne, N., Concha, M.J.O. (2019). Valorization of sweet corn (*Zea mays*) cob by extraction of valuable compounds. *International Journal of Food Science and Technology*, 54 (4), 1240-1246. DOI: 10.1111/ijfs.14092.

47. Zhou, Y., Sun, Q., Teng, C., Zhou, M., Fan, G., Qu, P. (2023). Preparation and improvement of physicochemical and functional properties of dietary fiber from corn cob fermented by *Aspergillus niger*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 34 (2), 330-339. DOI: 10.4014/jmb.2308.08010.

48. Delgado, L.V.B., de la Rosa Millán, J., Flores, D.G. (2023). Comprehensive physical and chemical characterization of corncob and Nopal fibers: exploring sustainable alternatives for high-value applications. *ACS Food Science & Technology*, 3 (12), 2132-2143. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.3c00298.

49. Hernández-García, Y.R., Luzardo-Ocampo, I., Gaytán-Martínez, M., Loarca-Piña, G., Vázquez-Barrios, E., Campos-Vega, R. (2024). Corn cob and corn silk-based ingredients possess bioaccessible and antioxidant phenolic compounds displaying anti-inflammatory effects in vitro. *Food & Function*, 15 (24), 12069-12082. DOI: 10.1039/D4FO02968B.

50. Xu, M., Wang, C., Lyu, G., Zhong, L., Yang, L., Wang, Z., Qin, C., Ji, X., Yang, G., Chen, J., Xu, F. (2019). Structural characterization and antioxidant activity of milled wood lignin from xylose residue and corncob. *Polymers,* 11 (12), 1-9. DOI: 10.3390/polym11122092.

51. Rose, D.J., Inglett, G.E., Liu, S.X. (2010). Utilisation of corn (*Zea mays*) bran and corn fiber in the production of food components. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90 (6), 915-924. DOI: 10.1002/jsfa.3915.

52. Kuan, Y.H., Liong, M.T. (2008). Chemical and physicochemical characterization of agrowaste fibrous materials and residues. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 56 (19), 9252-9257.

53. Viroli, S.L.M., Silva, L.G. da S., Vaz, A.V., Viroli, S.G., Carvalho, N.P., Duarte, H.A., Sousa, A.S., Leite, L.T., Veloso, C., Gomes, N.B., Costa, F.A., Sales, P.V.G. (2022). Caracterização da farinha do sabugo de milho e sua utilização como alternativa para enriquecimento de produtos alimentícios. *Research, Society and Development*, 11 (2), 1-11. DOI: 10.33448/rsd-v11i2.25783. (in Portugal).

54. Lee, C.M., Gan, Y.L., Chan, Y.L., Yap, K.L., Tang, T.K., Tan, C.P., Lai, O.M. (2019). Physicochemical and sensory analyses of high fibre bread incorporated with corncob powder. *International Food Research Journal*, 26 (5), 1609-1616.

55. Hamzah, Y., Lian, W.F. (2012). Physicochemical properties and acceptance of high fibre bread incorporated with corn cob flour. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 5 (6), 547-553.

56. Ali, Z., Anjum, F.M., Zahoor, T. (2007). Sensory characteristics of bread prepared from lactic acid obtained from corn cobs, an agricultural waste. *Pakistan Journal of Agricultural Science*, 44 (3), 539-548.

57. Gaikwad, P.S., Oswal, M., Malini, S.H., Supreetha, S. (2025). Fiber-Enriched Pasta. *Advances in Pasta Technology*, 175-196. DOI: 10.1007/978-3-031-84497-3.

58. Nguyen, T.Q.N., Tran, T.T.T., Mai, V.X.H., Nguyen, T.B., Ton, N.M.N., Le, V.V.M. (2023). Corncob powder and transglutaminase addition in pasta: Effects on proximate composition, physical and cooking properties, and overall acceptability of the product. *Cereal Chemistry*, 100 (2), 346-359. DOI: 10.1002/cche.10615.

59. Njideka, B.E., Chijioke, M.B., Chioma, O.N., Nnennaya, A.N., Iheduzaju, P.I.A. (2020). Maize cob as dietary fiber source for high-fiber biscuit. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 12 (1), 138-144. DOI: 10.30574/gscbps.2020.12.1.0203.

60. Hoang, N.H., Do, H.H., Dang, T.H.Y.,

Ton, N.M.N., Tran, T.T.T., Le, V.V.M. (2022). Fiber-enriched biscuits prepared with enzyme-treated corncob powder: Nutritional composition, physical properties, and sensory acceptability. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46 (8), 1-10. DOI: 10.1111/jfpp.16784.

61. Putra, E.D.L., Yuliasmi, S., Prasetyo, B.E., Zebua, N.F. (2018). The utilization of corn cob´ s cracker as anticipation of harvest failure for economic improvement for farmer in Narigunung 1 village, Karo regency. *Abdimas Talenta: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 3 (2). 238-241.

62. dos Santos, T.M., Andressa, I., Nascimento, G.K.S., Neves, N. de A., Schmiele, M. (2025). Corncob flour as an alternative ingredient for muffins: technological and nutritional perspectives. Revista Principia, 62, 1-17. DOI: 10.18265/2447-9187a2025id8695.

63. Lau, T., Clayton, T., Harbourne, N., Rodriguez-Garcia, J., Oruna-Concha, M.J. (2022). Sweet corn cob as a functional ingredient in bakery products. *Food Chemistry*, 13, 1-7. DOI: 10.1016/j.fochx.2021.100180.

64. Lau, T. Recovery of functional ingredients from sweet corn (*Zea mays*) cobs. Thesis submitted for the requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Food and Nutritional Science. University of Rearing, Reading, Great Britain, 2018. 172 p.

65. Nordin, R., Mazlan, M.I., Mohsin, A.Z., Madzuki, I.N. (2025). Characterization of dietary fibers from corn cobs as a potential functional ingredient in muffin. *Malaysian Applied Biology*, 54 (1), 64-75. DOI: 10.55230/mabjournal.v54i1.3176.

66. Kamaruzaman, M.Y.B., Ab Karim, S., Ishak, F.A.B.C., Arshad, M.M.B. (2020). The diversity of traditional Malay kuih in Malaysia and its potentials. *Journal of Ethnic Foods*, 7 (1), 22. DOI: 10.1186/s42779-020-00056-2.

67. Kumar, N.E., Ahmad, F. (2024). Effect incorporation of corn cob powder on the Physicochemical Properties and sensory acceptability of kuih kaswi. *Journal of Biochemistry, Microbiology and Biotechnology*, 12 (SP1), 25-26. DOI: 10.54987/jobimb.v12iSP1.929.

68. Maker Gardener. (n.d.). Putu piring snack – homemade recipe. Retrieved December 25, 2025, from https://www.makergardener.com/recipes/putu-piring-snack-homemade-recipe

69. Ahmad, F., Ismail, N.E., Chilek, T.Z.T., Zamri, A.I., Zainol, M.K., Wahab, R.A., Hamid, M.A. (2021). Effect incorporated of oat and corn cob powder on physicochemical and sensory properties of Putu Piring. *Bulletin of Culinary Art and Hospitality*, 1 (1), 7-12. DOI: 10.17977/um069v1i12021p7-12.

70. Harmayani, E., Anal, A.K., Wichienchot, S., Bhat, R., Gardjito, M., Santoso, U., Siripongvuticorn, S., Puripaatanavong, J., Payyappallimana, U. (2019). Healthy food traditions of Asia: exploratory case studies from Indonesia, Thailand, Malaysia, and Nepal. *Journal of Ethnic Foods*, 6 (1), 1-18. DOI: 10.1186/s42779-019-0002-x.

71. Ahmad, F., Sapiee, M.H. (2024). The effect of corn cob powder and oat fibre incorporation in physicochemical properties and sensory acceptance of otak-otak. *The Eurasia Proceedings of Health, Environment and Life Sciences*, 13, 32-39.

72. Colombo, R., Ferron, L., Papetti, A. (2021). Colored corn: An up-date on metabolites extraction, health implication, and potential use. *Molecules*, 26 (1), 1-42. DOI: 10.3390/molecules26010199.

73. Velit, J.M., Puma-Isuiza, G., Liñan-Pérez, J., Salvá-Ruiz, B.K., Silva-Jaimes, M.I. (2025). Use of purple corn (*Zea mays* L.) cob in the formulation of functional teas developed using Flash Profile and CATA methods. *Scientia Agropecuaria*, 16 (4), 577-590. DOI: https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2025.044.

74. Díaz-García, A., Salvá-Ruíz, B., Bautista-Cruz, N., Condezo-Hoyos, L. (2021). Optimization of a natural low-calorie antioxidant tea prepared from purple corn (*Zea mays*L.) and stevia (*Stevia rebaudiana* Bert.). *LWT-Food Science and Technology*, 150, 1-9. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111952.

75. Wattanathorn, J., Kirisattayakul, W., Somboonporn, W. (2025). A randomized controlled trial on the safety and cognitive benefits of a novel functional drink from a purple waxy corn byproduct in peri-and postmenopausal women. *Antioxidants*, 14 (10), 1-25. DOI: 10.3390/ antiox14101262.

76. Rojas, M.L., Ramirez, K., Linares, G. (2025). Biocompounds recovery from purple corn cob by-product: extraction kinetics, thermal and physicochemical stability of liquid and powdered anthocyanin-rich extract. *Food and Bioproducts Processing*, 149, 25-35. DOI: 10.1016/j.fbp.2024.11.010.

77. Hernández, M., Ventura, J., Castro, C., Boone, V., Rojas, R., Ascacio-Valdés, J., Martínez-Ávila, G. (2018). UPLC-ESI-QTOF-MS2-Based identification and antioxidant activity assessment of phenolic compounds from red corn cob (*Zea mays* L.). *Molecules*, 23 (6), 1-10. DOI: 10.3390/molecules23061425.

78. Rolandelli, G., Favre, L. C., Aguirre-Calvo, T.R., Farroni, A.E., del Pilar Buera, M., dos Santos Ferreira, C. (2023). An optimized purple corn cob extract as an ingredient for the development of maize-based extrudates with novel characteristics. *Journal of Cereal Science*, 114, 103809. DOI: 10.1016/j.jcs.2023.103809.

79. Sultana, B., Anwar, F., Przybylski, R. (2007). Antioxidant potential of corncob extracts for stabilization of corn oil subjected to microwave heating. *Food Chemistry*, 104 (3), 997-1005. DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.12.061.

80. Fardani, R.A., Hadiatun, N., Febriana, Y. (2025). Antioxidant of bulk cooking oil from corn cob extract. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11 (1), 193-197. DOI: 10.29303/jppipa.v11i1.9699.

81. Sanchez, J.S.G., Siche, R. (2025). Incorporation of sonicated purple corn cob extracts into food emulsions: effects on physicochemical properties, antioxidant activity, and shelf life. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19, 7034-7051. DOI: 10.1007/s11694-025-03440-1.

82. Swastawati, F. (2007). Liquid smoke performance of lamtoro wood and corn cob. *Journal of Coastal Development*, 10 (3), 189-196.

Information about the authors

K. I. Shaykhieva - Candidate of technical sciences, associate professor at the Department of Environmental Engineering, Kazan National Research Technological University.

S.V. Borisova - Candidate of technical sciences, associate professor at the Department of Food Technology, Kazan National Research Technological University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 90–96.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 90–96.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.001.2:62
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.012 EDN: NZKMPN

ИНЖЕНЕРНОЕ ТВОРЧЕСТВО В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ КАК ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Лариса Александровна Маюрникова[1], Анастасия Александровна Дриль [2], Татьяна Валерьевна Крапива [3]

[1, 3] Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия
[1] nir30@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4592-8382
[3] t.krapiva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9441-8744
[2] Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, dril@corp.nstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4114-4006

Аннотация. *В основе термина «технологическое развитие» лежит термин «технология». Исторически термин «технология» был связан с процессом производства и представлял собой совокупность нематериальной части – знания и умения, необходимые в процессе производства, и материальной составляющей (товары), которую обозначали термином «техника». Поэтому «технология» обычно рассматривалась применительно к конкретному виду производства: технологии получения какого-либо продукта, химические технологии, технологии машиностроения и т.д. [1]. XXI веку свойственны новые технологические уклады, которые характеризуются совокупностью технологий как в производственных, так и непроизводственных сферах: информационные технологии, технологии на основе искусственного интеллекта, когнитивные технологии и т.п. В этой связи «технологическое развитие» на современном этапе развития общества можно описать как процесс применения новых знаний на основе когнитивных технологий при решении практических задач, в том числе проектировании и разработке новых товаров, технологий, услуг. Питание и здоровье населения – одна из составляющих человеческого капитала как базы социально-экономического развития общества. Поэтому важно обозначать целевые показатели продуктов питания нового поколения с заданными свойствами при их разработке. Для этого целесообразно применять методы научно-технического творчества, когнитивные модели и т.п., позволяющие расширить видение свойств новых продуктов за счет анализа структуры, причинно-следственных связей, прогнозирования и оптимизации процессов при достижении результатов. В работе предложена авторская методика поискового проектирования, рекомендуемая для применения в процессе разработки новых продовольственных товаров, в том числе функционального назначения.*

Ключевые слова: *инженерное творчество; пищевые продукты; технический объект; техническая система; поисковое проектирование; функциональные продукты; потребительские свойства; когнитивное моделирование; научно-техническое творчество; ТРИЗ; продовольственная безопасность; инновационный продукт.*

Для цитирования: Маюрникова Л. А., Дриль А. А., Крапива Т. В. Инженерное творчество в процессе проектирования пищевых продуктов как технических объектов // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 90–96. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.012. EDN: https://elibrary.ru/NZKMPN.

Original article

ENGINEERING CREATIVITY IN DESIGN PROCESS OF FOOD PRODUCTS AS TECHNICAL OBJECTS

Larisa A. Mayurnikova [1], Anastasiia A. Dril [2], Tatyana V. Krapiva [3]

[1, 3] Kemerovo State University, Kemerovo, Russia
[1] nir30@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4592-8382
[3] t.krapiva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9441-8744
[2] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, dril@corp.nstu.ru, https://orcid.org/0000-0002-4114-4006

Abstract. *The study examines food products as technical objects and substantiates the relevance of engineering creativity in the design of new-generation foods with predetermined properties. The paper proceeds from the modern understanding of technological development as the application of new knowledge, including cognitive technologies, to solve practical design tasks. The purpose of the work was to correlate the terminology and characteristics used in the design of technical objects with the development of food products and to propose an author's methodology for exploratory design. The research methods included critical analysis, comparison, generalization and systematization of scientific publications devoted to technical objects, technical systems and food-product design. As a result, the common conceptual basis of tech-*

© Л. А. Маюрникова, А. А. Дриль, Т. В. Крапива, 2026

nical-object design and food-product development was demonstrated, and an exploratory design methodology was structured into three blocks: generation and analysis of ideas, formulation of tasks, and analysis and adoption of technical decisions. The proposed approach can be used in the development of functional foods and in educational and research practice.

Keywords: *engineering creativity; food products; technical object; technical system; exploratory design; functional foods; consumer properties; cognitive modeling; scientific and technical creativity; TRIZ; food security; innovative product.*

For citation: Mayurnikova, L. A., Dril, A. A. & Krapiva, T. V. (2026). Engineering creativity in design process of food products as technical objects. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 90-96. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.012. EDN: https: //elibrary.ru/NZKMPN.

ВВЕДЕНИЕ

Современные направления научных исследований с перспективой их внедрения для достижения технологического прорыва в разных отраслях промышленности РФ напрямую связаны с «Технологическими укладами». Так, на Петербургском международном экономическом форуме (ПМЭФ-2025) президент России Владимир Путин в ходе своего выступления отметил необходимость пересмотра трудового законодательства в России в условиях нового технологического уклада и новой более технологичной экономики России. В этом русле рассматриваются вопросы бюджета расходов на науку единой строкой «Наука и инновации» с подразделами «Фундаментальные исследования» и «Прикладные исследования и инновации». Сказанное является предпосылкой для решения важной государственной задачи – повышение качества жизни человека путем удовлетворения различных потребностей, в том числе питания и здоровья.

Здоровье населения является не только важным фактором социально-экономического развития страны, но и составляющей национальной безопасности. Тезис «здоровье – питание» имеет истоки в концепции продовольственной безопасности как элемента национальной безопасности государства. Одной из главных целей продовольственной безопасности является обеспечение населения продовольствием с точки зрения количества и качества/безопасности. Для создания необходимых стратегических запасов необходимо обозначить и решать следующие задачи:

- постоянный мониторинг и своевременное прогнозирование;
- устойчивое развитие отечественного производства продовольственного сырья и пищевой продукции;
- физическая и экономическая доступность продовольственных товаров;
- качество и безопасность пищевых продуктов [2].

При этом необходимо учитывать, что задача мониторинга статистических данных об объемах производимой и реализуемой продукции в соответствии с действующими на момент проведения исследований нормативными документами по обеспеченности (Потребительская продовольственная корзина, минимальный прожиточный минимум, Нормы физиологической потребности в основных пищевых веществах и энергии и др.) напрямую сопряжена с Социально-гигиеническим мониторингом (СГМ), осуществляющим наблюдение, анализ, оценку и прогноз состояния здоровья населения.

Цель – выявление причинно-следственных связей между состоянием здоровья населения и воздействием факторов среды обитания, в частности питания. На современном этапе функционирования этой системы основная ее задача – выявление недостаточности питания (количество и качество) и ее роли в формировании неинфекционных хронических заболевания (НИХЗ), в том числе алиментарно-зависимых (АЗЗ). Анализ зарубежной и отечественной литературы подтверждает актуальность этой проблемы, следствием которой является, с одной стороны, – снижение здоровья, работоспособности и продолжительности жизни, с другой, – рост государственных затрат на лечение [3, 4].

Пути решения. Задачи устойчивого развития отечественного производства продовольственного сырья и пищевой продукции описаны в Доктрине продовольственной безопасности РФ (21.01.2020, № 20). Однако с учетом необходимости обеспечения населения продуктами специализированного назначения (функциональные, обогащенные, для разных категорий и групп населения и т. д.) важной является задача возрождения массового производства витаминов, витаминно-минеральных комплексов (ВМК) и БАД, потому как основная их доля поставляется из-за рубежа. Эта проблема обозначилась на рубеже XX и XXI веков в связи с результатами научных метаисследований, подтверждающих их роль в формировании и поддержании здоровья человека. Усугубилась в период Пандемии (2019–2020 гг.) и сложной геополитической обстановкой (2022 г.), когда многие иностранные производители ВМК и БАД «разорвали» партнерские отношения и покинули российский рынок [5].

Пути решения задачи физической и экономической доступности продовольственных товаров разработаны Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека и ФГБУН "ФИЦ питания и биотехнологии" и изложены в МР 2.3.7.0168-20. Оценка качества пищевой продукции и оценка доступа населения к отечественной пищевой продукции, способствующей устранению дефицита макро- и микронутриентов. Стратегическими целями данного документа являются:

- оценка качества и безопасности пищевой продукции, находящейся в обращении на территории РФ;
- оценка доступа населения к отечественной пищевой продукции, способствующей устранению дефицита макро- и микронутриентов, а также специализированной пищевой продукции для разных групп населения.

Задачу обеспечения качества и безопасности целесообразно рассматривать не только с точки зрения «рынка продовольственных товаров» для удовлетворения жизненных потребностей населения, но и с точки зрения разработки новых пищевых продуктов в системе, обозначенной выше «Фундаментальные исследования – прикладные исследования – инновации». Инновация – конечный результат научно-инновационной деятельности, получивший реализацию в виде нового или усовершенствованного продукта, технологии, услуги, используемых в практике.

Инновационный продукт – новый конкурентоспособный товар, востребованный рынком и подтвержденный интеллектуальной собственностью [6].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ существующих исследований в области подходов к проектированию пищевых продуктов как

технических объектов включал критический подход и рассмотрение сущности проектирования/разработки технических объектов и пищевых продуктов, опубликованных в научной литературе. Выявление аспектов проектирования технических объектов позволило обобщить, систематизировать и применить результаты при разработке авторской методики поискового проектирования функциональных пищевых продуктов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Целью исследований является рассмотрение пищевого продукта как технического объекта, общности их терминов и понятий, соотнесение характеристик и подходов к проектированию и разработке.

Основные научно-технические черты современности отражены в характеристике пятого и шестого технологических укладов: микроэлектроника, информатика, биотехнология, генная инженерия, использования новых видов энергии, материалов, освоения космического пространства, спутниковой связи и т.п. Переход от разрозненных фирм к единой сети крупных и мелких компаний, соединённых электронной сетью на основе интернета, осуществляющих тесное взаимодействие в области технологий, контроля качества продукции, планирования инноваций.

В условиях научно-инновационного развития отраслей и общества сущность научно-технического развития лежит в основе новых форм взаимодействия науки и производства с учетом научно-технического творчества (НТТ). В свою очередь, философские аспекты НТТ необходимо начинать:

- с предмета разработки, а именно технических объектов (ТО) и/или технических систем (ТС), обеспечивающих решения новых технических задач;
- с законов развития технических объектов и систем.

Применительно к сфере питания первый закон развития ТО и ТС основывается на возникновении и развитии новых потребностей в новых условиях жизнедеятельности, социально-экономической обеспеченности, эпидемиологии питания, научных достижений в нутрициологии. Второй закон связан с развитием производства – создание новых технологий для производства товаров и услуг (в частности, продовольственных товаров для разных групп населения) в процессе техноэволюции на базе знаний и умений человека [7].

В словаре философских понятий «объект» (лат. objectum – «предмет») – категория, обозначающая вещь, явление или процесс, на которые направлена предметно-практическая, управляющая и познавательная деятельность субъекта (наблюдателя) [8].

Если объект не соотносится с объективной реальностью и не вступил в отношение с субъектом, он не является объектом. В контексте философского видения объекта пищевые продукты однозначно относятся к объектам, так как цель их разработки и производства – удовлетворение потребностей потребителя/субъекта.

В технике «технический объект» – любое изделие (элемент, устройство, подсистема, функциональная единица или система), которое можно рассматривать в отдельности.

Техническим объектом называют созданные человеком реально существующие устройства, способ, материал, предназначенные для удовлетворения определенных потребностей [9].

Потребность – это физиологическое или психологическое ощущение недостатка чего-либо и необходимости его наличия для выполнения определенных функций «здесь и сейчас» [10].

Удовлетворение потребностей человека как составляющих «качества жизни» связано с уровнем жизни (благосостоянием) населения и является одной из главных задач государства.

Потребность в техническом объекте (общественная или техническая) соответствует функциональному назначению или цели создания объекта. Понятие потребности всегда связано с человеком, поставившим цель реализации потребности и выполняющим проектирование и изготовление технического объекта.

Все технические объекты состоят из элементов, представляющих собой неделимые части целого. Если функционирование одного элемента технического объекта влияет на функционирование другого элемента, то такие технические объекты принято называть техническими системами (ТС). Целесообразно рассмотреть понятия «объект» и «система» применительно к пищевым продуктам через призму понятий, изложенных в ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения (табл. 1).

Таблица 1 – Общность и соотнесение термина «объект» в технике и в сфере питания

Table 1 – Commonality and correlation of the term "object" in engineering and in food science

Термин и понятие «объект» в соответствии с ГОСТ	Понятие термина «объект» применительно к пищевому продукту
1	2
(Технический) объект: предмет рассмотрения, на который распространяется терминология по надежности в технике	(Технический) объект: предмет рассмотрения, на который распространяется терминология по надежности в технике
Термин "объект" может относиться к конкретному объекту и к одному из представителей группы однотипных объектов, в частности, к выбранному случайным образом элементу выборки, партии, серии, генеральной совокупности	В товароведной системе классификации пищевых продуктов пищевые продукты делятся на однородные группы продуктов (хлеб, хлебобулочные изделия; молоко и молочные продукты; напитки безалкогольные и т. д.), которые, в свою очередь, имеют деление до конкретного продукта (объекта) с конкретными характеристиками и свойствами
Система: объект, представляющий собой множество взаимосвязанных элементов, рассматриваемых в определенном контексте как единое целое и отделенных от окружающей среды	Пищевой продукт как система – объект, представляющий собой количественную и качественную совокупность рецептурных ингредиентов в определенном контексте. Продукт из однородной группы пищевых продуктов. Например, творог обезжиренный, творог детский, творог, обогащенный кальцием и т. д.
Система обычно определяется с точки зрения достижения определенной цели, например выполнения требуемых функций	Состав конкретных пищевых продуктов формируется на этапе проектирования и разработки с учетом цели его использования: общего пользования, для конкретной группы населения, при наличии алиментарного заболевания (безлактозный) и т. д.

Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

1	2
Для системы должна быть установлена граница, отделяющая ее от окружающей среды и других систем. Однако на работу системы может влиять окружающая среда и для работы системы могут требоваться внешние ресурсы (лежащие вне границ системы)	Граничные условия для конкретных продуктов питания в рамках однородных групп устанавливают стандарты разного уровня: нормативные документы (ТР/ТС, ГОСТ, СанПиН), технологические документы (ТУ и ТИ, ТТК, СТП и др.). Однако на качество и безопасность пищевых продуктов оказывает влияние окружающая среда, для предотвращения отрицательного влияния которой в НД устанавливаются ПДК контаминантов (содержание тяжелых металлов, пестицидов, микроорганизмов и т. п.)
Подсистема: часть системы, которая представляет собой систему	Пищевые продукты, являясь самостоятельной системой, одновременно являются подсистемой рациона питания человека
Надежность: свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования	Надежность/сохраняемость – одно из потребительских свойств пищевых продуктов, для выполнения которого в документации на конкретный продукт устанавливаются граничные условия: срок годности, в течение которого сохраняются количественные и качественные показатели (органолептические показатели, пищевая ценность, безопасность, функциональность и др.) с учетом условия транспортирования, хранения и потребления

В России требования к объектам технического регулирования контролируются Федеральным законом от 27.12.2002 №184-ФЗ «О техническом регулировании». Закон раскрывает определение технического регулирования, устанавливает принципы технического регулирования и определяет права и обязанности участников регулируемых отношений. Объекты технического регулирования – это продукция и связанные с ней процессы проектирования, производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации. Обязательные требования к объектам устанавливают Технические регламенты. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011) пищевую продукцию устанавливает как объект технического регулирования. За соблюдением требований к объектам технического регулирования в России осуществляется государственный контроль (надзор). Государственный контроль за соблюдением требований НД осуществляют Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор), Федеральная служба по ветеринарному и фитосанитарному надзору (Россельхознадзор), Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), Федеральная таможенная служба и др. Вышесказанное дает основание рассматривать пищевую продукцию как технический объект и применять методы инженерного творчества на этапе проектирования новшеств в сфере питания. В инженерной деятельности выделяется направление, тесно связанное с проработкой общей идеи, замысла создаваемой системы – проектирование.

Проектирование – в современном толковании первый этап процесса удовлетворения общественной потребности в разных отраслях жизнедеятельности, который начинается с осмысления действий, необходимых и достаточных для решения этой проблемы. В этом смысле проектирование – это комплекс исследований: патентно-информационные исследования, научно-технические исследования, изобретательская работа при подготовке множества альтернативных вариантов, пригодных для решения поставленной задачи, анализ и выбор одного наилучшего решения из альтернативных вариантов и его техническая оценка. Формируется облик проектируемой технической системы, для чего составляется технологическая схема, выполняются технологические расчеты, создается техническое задание на проектирование.

Проектирование выполняется проектировщиком, результат деятельности которого – проект, представляющий собой основу для конструирования. Конструирование – второй элемент процесса, на котором на основе результатов проектирования (созданного образа и его характеристик) создается конкретный технический объект с однозначным составом / конструкцией изделия и требованиям к нему и разрабатывается соответствующая технико-технологическая документация.

Важной отличительной особенностью пищевого продукта как технического объекта от других технических объектов является то, что на этапе его проектирования в основе лежит система «человек» – «человек». Проектировщик (человек) – потребитель (человек). Это обуславливает необходимость для проектировщика, с одной стороны, расширить перечень свойств и показателей конкурентоспособности нового пищевого продукта как ТО, с другой, – руководствоваться принципом «вкус – польза» как основным критерием при выборе потребителем. При этом необходимо учитывать, что потребности и вкусы разных групп населения различны и изменяются во времени. В целях решения данной задачи на этапе проектирования ТТО пищевого продукта (особенно специализированного назначения), целесообразно применение методов научно-технического творчества, когнитивного моделирования, математического моделирования и др.

В Стратегии научно-технологического развития РФ до 2035 г. отмечается перспективность воспитания талантливой молодежи, активно участвующей в научно-инновационной деятельности разных сфер жизнедеятельности, обеспечивающей переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции с последующим выведением на рынок. Это отражает сущность основной задачи страны – повышение научно-технического уровня и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Решение этой задачи, в первую очередь, связано с Российской системой подготовки кадров науки и высшего образования (бакалавриат, магистратура, аспирантура, докторантура), играющей важную роль в создании изобретений, проектировании и разработке новых технических объектов на основе инженерного творчества.

Перспективность разработки пищевых продуктов нового поколения – с заданными свойствами, для разных групп населения определена в Стратегии повышения качества пищевой продукции. Совокупность приори-

тетности этих документов определяет план действия в направлении проектирования и разработки новых продуктов питания. В этой связи актуальность данных исследований заключается в необходимости разработки методики поискового проектирования и разработки функциональных продуктов питания, позволяющей реализовать новшества в системе «от идеи до потребителя» с целью реализации их на рынке и повышения эффективности профилактики алиментарных заболеваний.

В таблице 2 представлена авторская методика поискового проектирования, поэтапно систематизированная в три блока: генерация и анализ идеи, постановка задач, анализ и принятие технических решений (разрешение противоречий) разрешение противоречий. Этапы поискового проектирования разбиты на стадии, позволяющие более подробно описать ситуацию, актуальную проблему, выбор пути решения с обозначением характеристик ТТО и ОЭО. Особое внимание уделено интеграции методов научно-технического творчества и когнитивных инструментов для достижения заданных потребительских свойств продуктов, ориентированных на устранение (предотвращения, ослабления) существующей проблемы.

Таблица 2 – Методика поискового проектирования новых продовольственных товаров с заданными свойствами

Table 2 – Exploratory design methodology for new food products with predetermined properties

Этапы поискового проектирования	Стадии поискового проектирования	Характеристика стадий поискового проектирования	Методы научно-технического творчества (МНТТ)
1	2	3	4
1. Исследование проектных ситуаций	Генерация идеи	Выбор приоритетных направлений и критических технологий в определенной (исследуемой) области знаний	- Эвристические методы (стратегия случайного поиска); - методы функционально-структурного исследования объектов; - класс комбинированных алгоритмических методов (стратегия логического поиска)
	Анализ ситуации	Осмысление сложившейся ситуации в исследуемой области знаний. Например, влияние неполноценного / несбалансированного питания в популяции или разных групп населения на развитие НИХЗ, АЗЗ и возможные пути решения проблемы	- Когнитивные модели (В.М. Сергеева – В.Л. Цимбурского, П. Жане; - метод контрольных вопросов; - метод семикратного поиска
	Выявление проблемы	Выявление проблемы, формулирование проблемы, понятие ее сущности, прогнозирование негативных последствий при условии несвоевременного решения проблемы; установление граничных условий проблемы (глобальная, национальная, региональная, локальная)	- Когнитивная модель (Ж. Пиаже); - метод семикратного поиска
	Изучение специфики (особенностей) ппроблемы	Причины формирования НИХЗ, АЗЗ и потенциальные пути снижения скрытого голода (дефицита МН)	- Метод декомпозиции; - идеальный конечный результат (ИКР)
	Актуальность	Описание важности исследований на данном этапе социально-экономического развития с учетом выявленной и сформулированной проблемы	- Метод семикратного поиска
2. Поиск идей и новых технических решений	Выбор объекта исследований	Объект в науке (научной деятельности) – область действительности, совокупность реальных явлений и процессов, на изучение и обоснование которых направлено исследование	- Методы конструирования
	Выбор предмета исследований	Предмет в технических науках – это узкая часть объекта исследования, которая подлежит детальному изучению (характеристики, параметры, модель, метод, технология и др.)	- Методы конструирования
	Анализ предыстории	Сбор научной, научно-технической, патентной и другой информации по теме исследования	- Когнитивная модель К. Левина; - графологические ряды; - гомологические ряды
	Формирование цели	Выдвижение гипотезы	- Метод контрольных вопросов; - когнитивная модель (В.М. Сергеева – В.Л. Цимбурского) - идеальный конечный результат (ИКР)
	Выбор прототипа	Подтверждение состоятельности (жизнеспособности) идеи	- Составление формулы; - метод гипотетического существования идеального устройства; - плацебо метод; - идеальный конечный результат (ИКР)

Продолжение таблицы 2 / Continuation of table 2

1	2	3	4
3. Анализ и принятие технических решений	Выявление недостатков прототипа	Формулирование потенциальной новизны на основе сравнительной оценки	- Когнитивная модель Клапареда
	Постановка задачи / задач	Формирование ценности новшества – заданных потребительских свойств (ПС) разрабатываемого продукта/товара/технологии	- Метод контрольных вопросов; - метод семикратного поиска; - метод мозговой атаки (штурма); - алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ)
	Выявление и анализ противоречий	Например, выявление несоответствия цены и качества разрабатываемого продукта; социального эффекта и экономической эффективности и др.	- Теория решения изобретательских задач (ТРИЗ); - функционально-стоимостной анализ (ФСА); - функционально-физический анализ (ФФА)
	Уточнение задачи	Уточнение количественных и качественных характеристик заданных ПС нового продукта/товара	- Метод контрольных вопросов
	Выбор методов решений	Выбор и адаптация методов НТТ при реализации этапов поискового проектирования	

Анализ научной (статьи, монографии, диссертации) и патентной литературы по направлению исследований в области разработки функциональных продуктов питания для разных групп населения и разной функциональной направленности показывает достаточно большое их количество. Критический анализ исследований, опубликованных в открытом доступе, выявил недостаток применения новых методов и методик, применяемых в процессе проектирования такого рода продуктов. Возможно, это обусловлено факторами противоречивого характера: инерцией психологии разработчиков, которые делают упор на рецептуру и технологию без учета интересов бизнеса и потребителя; наличием достижений в науке и технике (фудомика) относительно персонализированного питания, но отсутствием возможности их применения в научных разработках университетов; низким уровнем знаний потребителя относительно классификационных признаков продуктов (функциональных, обогащенных, специализированных) и их роли (пользы) для организма, что, в свою очередь, слабо формирует спрос на эти продукты и т.д. Использование философских методов, изучающих процессы познания, мышления (когнитивные модели), МНТТ помогут разработчикам глубже понять концептуальные основы проектируемых новшеств.

ВЫВОДЫ

В представленном исследовании обоснована целесообразность рассмотрения пищевых продуктов как технических объектов (ТО) и систем (ТС) в соответствии с ГОСТ 27.002-2015 и Федеральным законом № 184-ФЗ «О техническом регулировании», что позволяет интегрировать методы инженерного творчества на этапе проектирования. Разработанная методика поискового проектирования с использованием эвристических методов, ТРИЗ, когнитивного моделирования и ИКР обеспечивает генерацию инновационных продуктов с заданными потребительскими свойствами, способствуя решению задач Доктрины продовольственной безопасности РФ, включая устойчивое производство и устранение дефицита микронутриентов. Полученные результаты рекомендуются для внедрения в образовательные программы по дисциплинам, связанным с учебно-исследовательской и научно-исследовательской работой студентов, аспирантов и молодых специалистов, а также для НИОКР в сфере функциональных продуктов, с перспективой повышения конкурентоспособности отечественной пищевой промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голлай А.В. Генезис понятия «Технологическое развитие» // Управление в современных системах. 2018. № 3(19). С. 20–24.

2. Моор Т.А., Макарова О.В. Продовольственная безопасность как важнейшая составляющая национальной безопасности страны // Записки учёного. 2021. С. 24–31.

3. Улумбекова Г.Э., Гиноян А.Б., Калашникова А.В., Альвианская Н.В. Финансирование здравоохранения в России (2021–2024 гг.). Факты и предложения // ОРГЗДРАВ: новости, мнения, обучение. Вестник ВШОУЗ. 2019. Т. 5. № 4. С. 4–19.

4. Khan R.S., Grigor J., Winger R., Win A. Functional food product development – Opportunities and challenges for food manufacturers // Trends in Food Science & Technology. 2013. Vol. 30, No. 1. P. 27–37. DOI: 10.1016/j.tifs.2012.11.004.

5. Анализ рынка витаминных препаратов в России в 2021–2025 гг., прогноз на 2026–2030 гг. Источник: https://businesstat.ru/catalog/id8364/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=poisk_analizy_rynkov&utm_content=8988292177&utm_term=&etext=&yclid=17115996598329671679. [Электронный ресурс]. URL: https://businesstat.ru/images/demo/vitamin_preparations_russia_businesstat.pdf. (дата обращения: 07.03.2026).

6. Новоселов С.В., Маюрникова Л.А. Управление инновационными проектами: разработка и практическая реализация инновационных проектов в сфере питания. Ч. 1–2. Санкт-Петербург : ГИОРД, 2021. 400 с.

7. Новоселов С.В., Маюрникова Л.А. Теоретическая инноватика: научно-инновационная деятельность и управление инновациями. Санкт-Петербург : ГИОРД, 2017. 416 с.

8. Краткий словарь философских понятий [Электронный ресурс]. URL: https://edu.tsu.ru/eor/resourse/1085/html/5.html (дата обращения: 12.03.2026).

9. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества : учеб. пособие. 5-е изд., стер. Санкт-Петербург : Лань, 2017. 364 с.

10. Худякова Н.Л. Потребности человека и лич-

ностные ценности как социокультурная форма их существования // Вестник Челябинского государственного университета. 2020. № 4(438). С. 36–47.

Информация об авторах

Л. А. Маюрникова – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и организация общественного питания» ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

А. А. Дриль – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации пищевых производств ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Т. В. Крапива – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология и организация общественного питания» ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

REFERENCES

1. Gollay, A.V. (2018). Genezis ponyatiya "Tekhnologicheskoe razvitie". Upravlenie v sovremennykh sistemakh, 3(19), 20-24.

2. Moor, T.A. & Makarova, O.V. (2021). Prodovolstvennaya bezopasnost kak vazhneyshaya sostavlyayushchaya natsionalnoy bezopasnosti strany. Zapiski uchenogo, 24-31.

3. Ulumbekova, G.E., Ginoyan, A.B., Kalashnikova, A.V. & Alvianskaya, N.V. (2019). Finansirovanie zdravookhraneniya v Rossii (2021-2024 gg.): Fakty i predlozheniya. ORGZDRAV: novosti, mneniya, obuchenie. Vestnik VShOUZ, 5(4), 4-19.

4. Khan, R.S., Grigor, J., Winger, R. & Win, A. (2013). Functional food product development - Opportunities and challenges for food manufacturers. Trends in Food Science & Technology, 30(1), 27-37. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.11.004.

5. Busines Stat. (n.d.). Analiz rynka vitaminnykh prepar-atov v Rossii v 2017-2021 gg., prognoz na 2022-2026 gg. Retrieved [specify], from businesstat.ru/images/demo/vitamin_preparations_russia_demo_businesstat.pdf.

6. Novoselov, S.V. & Mayurnikova, L.A. (2021). Upravlenie innovatsionnymi proektami: razrabotka i prakticheskaya realizatsiya innovatsionnykh proektov v sfere pitaniya (Parts 1-2). Saint Petersburg : GIORD.

7. Novoselov, S.V. & Mayurnikova, L.A. (2017). Teoreticheskaya innovatika: nauchno-innovatsionnaya deyatelnost i upravlenie inno-vatsiyami. Saint Petersburg : GIORD.

8. Kratkiy slovar filosofskikh ponyatiy. (n.d.). [Internet source to be specified].

9. Polovinkin, A.I. (2017). Osnovy inzhenernogo tvorchestva (5th ed.). Saint Petersburg : Lan.

10. Khudyakova, N.L. (2020). Potrebnosti cheloveka i lichnostnye tsennosti kak sotsiokulturnaya forma ikh sushchestvovaniya. Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta, 4(438), 36-47.

Information about the authors

L.A. Mayurnikova - Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of «Technology and Organization of Public Catering», of the Kemerovo State University.

A.A. Dril - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Technology and Organization of Food Industries Department of Novosibirsk State Technical University.

T.V. Krapiva - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of «Technology and Organization of Public Catering» of the Kemerovo State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 97–101.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 97–101.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК637.041
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.013 EDN: OYDYOY

РАСТВОРИМОСТЬ ИНГРЕДИЕНТОВ С БЕЛКАМИ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Алла Львовна Новокшанова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия, novokshanova@ion.ru, https://orcid.org/0000-0002-5049-1472

Аннотация. *Концентраты сывороточных белков используют для улучшения пищевой ценности продуктов энтерального питания и прочей специализированной пищевой продукции. Особенности индивидуальных технологий получения концентратов сывороточных белков отражаются на их физико-химических свойствах. Цель работы состояла в изучении влияния температуры и концентрации на скорость растворения изолята, содержащего 90 % сывороточного белка (ИСБ 90), концентрата, содержащего 80 % сывороточного белка (КСБ 80) и лецитинизированного концентрата сывороточного белка с массовой долей белка 80 % (ЛКСБ 80). Концентрации ингредиентов варьировали от 1 до 10 % с шагом 3 %. Визуальные наблюдения за процессом растворения ингредиентов вели в четырех температурных режимах: 20, 40, 60 и 80 °С. Активную кислотность растворенных концентратов сывороточных белков определяли потенциометрическим методом. Активная кислотность рассматриваемых образцов изменялась от более кислой до менее кислой при прочих равных условиях в ряду: ИСБ 90 → КСБ 80 → ЛКСБ 80. В условиях эксперимента установлено, что оптимальная температура растворения ИСБ 90 составляла 40 °С, для КСБ 80 и ЛКСБ 80 – 60 °С. При 80 °С продолжительность растворения всех наблюдаемых ингредиентов удлинялась в сравнении с более низкими температурами. При этом температура гидратации 80 °С нежелательна при формировании смесей с ИСБ 90 и ЛКСБ 80 из-за значительного удлинения процесса. В системах с КСБ 80 допустим весь исследованный температурный диапазон, в то время как для ЛКСБ 80 приемлем только интервал от 20 до 60 °С. Полученные результаты могут быть применимы в практических условиях при формировании молочных составных и различных специализированных пищевых продуктов, в том числе для энтерального питания.*

Ключевые слова: *специализированные пищевые продукты, энтеральное питание, изоляты сывороточных белков,концентраты сывороточных белков, растворимость, активная кислотность.*

Для цитирования: Новокшанова А. Л. Растворимость ингредиентов с белками молочной сыворотки в зависимости от концентрации и температуры // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 97–101. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.013. EDN: https://elibrary.ru/OYDYOY.

Original article

SOLUBILITY OF INGREDIENTS WITH WHEY PROTEINS DEPENDING ON CONCENTRATION AND TEMPERATURE

Alla L. Novokshanova

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety», Moscow, Russia, novokshanova@ion.ru, https://orcid.org/0000-0002-5049-1472

Abstract. *Whey protein concentrates are used to improve the nutritional value of enteral nutrition products and other specialized food products. The specific technologies used to produce whey protein concentrates affect their physicochemical properties. The aim of this study was to investigate the influence of temperature and concentration on the dissolution rate of a 90% whey protein isolate (WPI 90), an 80% whey protein concentrate (WPC 80), and a lecithinized whey protein concentrate with a protein content of 80% (LPC 80). Ingredient concentrations varied from 1% to 10% in 3% increments. Visual observations of the ingredient dissolution process were conducted at four temperature levels: 20, 40, 60, and 80°C. The active acidity of the dissolved whey protein concentrates was determined potentiometrically. The active acidity of the samples under study varied from more acidic to less acidic, all other things being equal, in the following order: ISB 90 → KSB 80 → LKSB 80. Under experimental conditions, the optimal dissolution temperature was found to be 40°C for ISB 90, while for KSB 80 and LKSB 80 it was 60°C. At 80°C, the dissolution time of all observed ingredients was prolonged compared to lower temperatures. A hydration temperature of 80°C is undesirable when forming mixtures with ISB 90 and LKSB 80 due to a significant prolongation of the process. The entire studied temperature range is permissible for systems with KSB 80, while for LKSB 80, only the range from 20 to 60°C is acceptable. The*

© Новокшанова А. Л., 2026

obtained results can be applied in practical conditions in the formation of dairy components and various specialized food products, including those for enteral nutrition.

Keywords: *specialized food products, enteral nutrition, whey protein isolates, whey protein concentrates, solubility, active acidity.*

For citation: Novokshanova, A. L. (2026). Solubility of ingredients with whey proteins depending on concentration and temperature. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 97-101. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.013. EDN: https://elibrary.ru/OYDYOY.

ВВЕДЕНИЕ

Продукты энтерального питания, предназначенные для зондового питания и/или перорального употребления, относятся к специализированной продукции диетического профилактического и/или диетического лечебного питания [1]. Они могут быть показаны и взрослым, и детям в качестве единственного источника пищевых веществ и энергии [2, 3, 4, 5], а также могут быть использованы в качестве их дополнительного источника при недостаточности питания или риске ее формирования, когда обычный прием пищи невозможен или ограничен [6, 7, 8].

По существу, продукты энтерального питания представляют собой составные пищевые системы, содержащие весь набор нутриентов, необходимых человеку для обеспечения его физиологических потребностей. Протеиновый компонент продуктов энтерального питания можно формировать из источников разного происхождения, но приоритет имеют белки с высокими показателями биологической ценности. При этом наиболее информативными считаются методы, учитывающие не только количественное содержание аминокислот в белке, но и степень их усвоения. Независимо от того, на каком этапе пищеварительного процесса определялось усвоение аминокислот – в конце тонкого кишечника[1] или в конце пищеварительного тракта[2], молочные белки имеют максимальные показатели биологической ценности [9, 10].

На рынке пищевых ингредиентов молочные белки представлены в виде сухих производных казеина и сывороточных белков или их комбинаций. Помимо высокой нутритивной ценности эти виды пищевого сырья отличаются нейтральными вкусами и имеют длительные сроки годности, что обусловливает целесообразность их использования не только в продуктах энтерального питания и в специализированной пищевой продукции, но и в разных отраслях пищевой промышленности [11].

Выделяемые из обезжиренного молока или сыворотки, а впоследствии подвергаемые высушиванию, производные казеина и сывороточных белков в определенной степени утрачивают свои нативные свойства [12, 13, 14, 15], прежде всего гидрофильные.

Цель работы – изучить влияние температуры и концентрации на скорость растворения нескольких видов сухих ингредиентов, содержащих сывороточные белки.

МЕТОДЫ

В работе использованы ингредиенты российского производства (АО «Молвест»): изолят, содержащий 90 % сывороточного белка (ИСБ 90), концентрат, содержавший 80 % сывороточного белка (КСБ 80) и лецитинизированный концентрат сывороточного белка с массовой долей белка 80 % (ЛКСБ 80).

Продолжительность растворения определяли, создавая модельные системы с массовой долей каждого ингредиента от 1 до 10 % и с шагом 3 %. Для этого в стеклянные стаканы вместимостью 200 см^3 вносили соответствующие навески питьевой воды, а затем навески сухих ингредиентов. При этом образцы постоянно помешивали стеклянной палочкой. Все операции и визуальные наблюдения за процессом растворения ингредиентов вели при четырех температурныхрежимах: 20, 40, 60 и 80 ºС.

Продолжительность растворения определяли от начала внесения ингредиента в воду до полного исчезновения видимых его включений в виде хлопьев, комочков или осадка.

Далее в растворах белков, доведенных до температуры (20±1) ºС, определяли активную кислотность потенциометрическим методом [16].

Повторность опытов была трехкратной. Для построения графиков использована программа Microsoft Office Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По внешнему виду все ингредиенты представляли собой сыпучие мелкодисперсные порошки однородного светло-кремового цвета. Цвет ИСБ 90 был наиболее светлым из всех образцов, а цвет ЛКСБ 80 был самым насыщенным. Вкус и запах всех ингредиентов был чистым, сывороточным, сладковатым, без посторонних привкусов и запахов.

Пищевая ценность сухих ингредиентов, содержащих сывороточные белки, по данным производителя, представлена на рисунке 1.

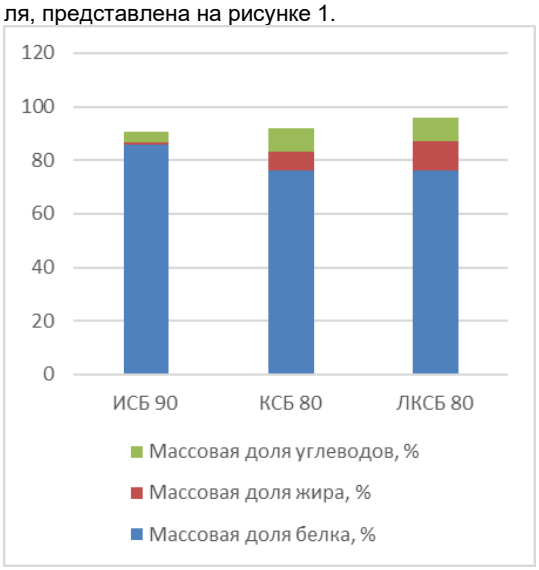


Рисунок 1 – Содержание белка, жира и углеводов в сухих ингредиентах

Figure 1 – Protein, fat, and carbohydrate content in dry ingredients

[1]Digestible Indispensable Amino Acid Score (DIAAS) – не имеет ограничения верхнего предела.

[2]Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score (PDCAAS) – имеет ограничивающий предел в 1,0.

Диапазон содержания белка в ингредиентах колебался в интервале от 76 % в КСБ 80 и ЛКСБ 80 до 86 % в ИСБ 90. Существенную разницу составляло содержание жира: 0,5 % – в ИСБ 90, 7 % – в КСБ 80 и 11 % – в ЛКСБ 80. Жировой компонент ЛКСБ 80 кроме молочного жира включал соевый лецитин. Углеводная составляющая всех исследованных ингредиентов была представлена только лактозой. Разница в содержании лактозы в ингредиентах была минимальной в сравнении с белками и жирами. Диапазон содержания лактозы колебался в интервале от 4 % в ИСБ 90 до 9 % в КСБ 80 и ЛКСБ 80. Следовательно, наибольшее влияние на скорость растворения исследованных сухих ингредиентов, содержащих сывороточные белки, оказывало, прежде всего, содержание в них белка и жира.

Достоверно установлено, что активная кислотность рассматриваемых образцов изменялась от более кислой до менее кислой при прочих равных условиях в ряду:

ИСБ 90 → КСБ 80 → ЛКСБ 80.

При этом все колебания активной кислотности в зависимости от концентрации ингредиента в растворе были недостоверны, как это следует из данных таблицы 1.

Таблица 1 – Активная кислотность опытных образцов
Table 1 – Active acidity of experimental samples

Массовая доля ингредиента, %	Активная кислотность водного раствора, единицы pH		
	ИСБ 90	КСБ 80	ЛКСБ 80
1	5,76±0,01	5,93±0,01	6,09±0,01
4	5,77±0,01	5,92±0,01	6,11±0,01
7	5,78±0,01	5,92±0,01	6,17±0,01
10	5,79±0,01	5,93±0,01	6,18±0,01

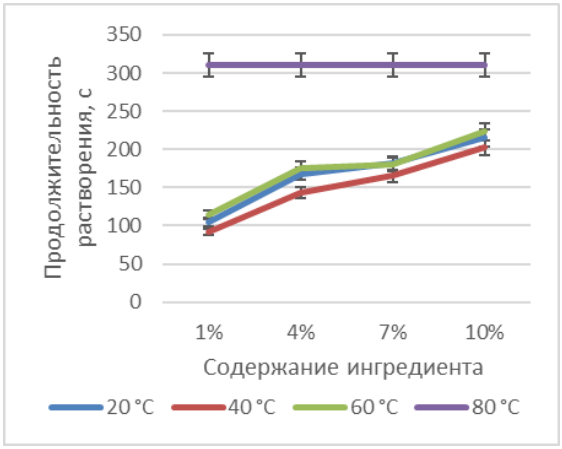
Динамика растворения сухих ингредиентов представлена на рисунке 1. По полученным данным, самую высокую скорость растворения из рассмотренных образцов имел КСБ 80. В минимальной концентрации 1 % он растворялся за (49±1) с при 20 ºС, за (44±1) с – при 40 ºС, за (36±1) с – при 60 ºС и за (47±1) с при 80 ºС.

ОБСУЖДЕНИЕ

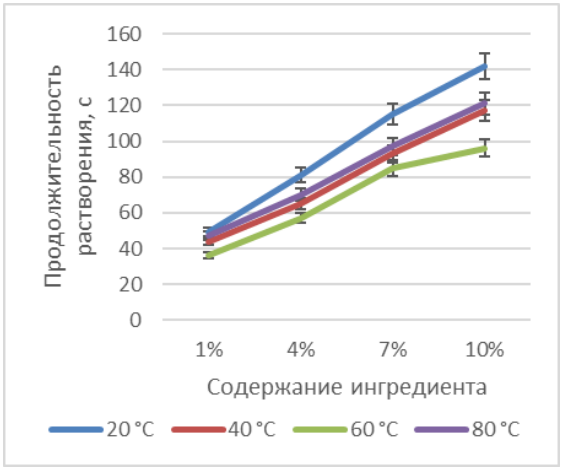
Как известно, сывороточные белки относятся к кислым белкам и, растворяясь в воде, могут в некоторой степени смещать реакцию среды в кислую сторону. Именно этот результат наблюдали в эксперименте. Более кислая реакция среды в растворах ИСБ 90 была обусловлена тем, что концентрация белка в них была выше в сравнении с другими образцами в параллельных измерениях. При равном содержании белка в соответствующих образцах с КСБ 80 и ЛКСБ 80 реакция среды была менее кислой в образцах, содержащих соевый лецитин. По-видимому, это связано с амфифильной природой молекул лецитина и некоторой нейтрализацией активных H^+.

Как следует из таблицы 1, КСБ 80 занимал промежуточное положение между ИСБ 90 и ЛКСБ 80 по показателю активной кислотности. Поскольку скорость гидратации многих веществ определяется наличием зарядов на их поверхности, можно предположить, что степень ионизации КСБ 80 при его содержании от 1 до 10 % от массы системы была наиболее оптимальной для гидратации в воде в интервале температур от 20 до 80 ºС по сравнению с ИСБ 90 и ЛКСБ 80 в таких же условиях, что наглядно отражают графики на рисунке 1.

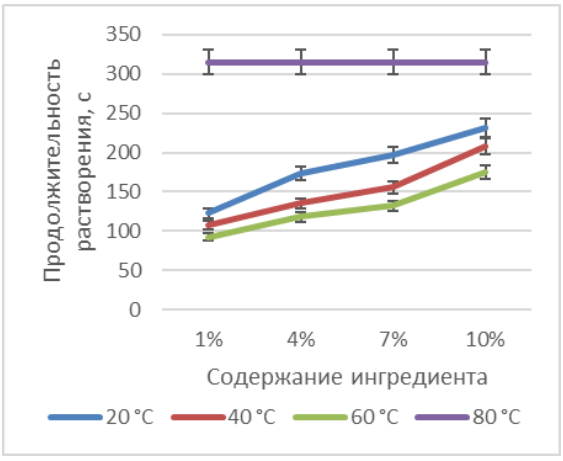
Установлено, что растворимость КСБ 80 положительно коррелировала с концентрацией ингредиента при всех температурных режимах (рисунок 1, *б*).



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Продолжительность растворения сухих ингредиентов, содержащих сывороточные белки:
а – ИСБ 90, б – КСБ 80, в – ЛКСБ 80

Figure 2 – Duration of dissolution of dry ingredients containing whey proteins:a – ISB 90, b – CSB 80, c – LCSB 80

Минимальную длительность растворения КСБ 80 наблюдали при 60 ºС, а максимальную – при 20 ºС.

При температуре 40 и 80 ºС длительность растворения КСБ 80 в концентрации от 1 до 10 % по массе достоверно не отличалась. При 20 ºС КСБ 80 в минимальной концентрации ингредиента 1 % растворялся за (49±1) с, а в максимальной концентрации 10 % – за (142±1) с; при 60 ºС эти же показатели составили соответственно (36±1) и (96±1) с.

Увеличение концентрации сывороточных белков в ИСБ 90 по сравнению с КСБ 80 и ЛКСБ 80 сопровождалось изменением динамики процессов гидратации. При любой концентрации и при всех температурных режимах ИСБ 90 и ЛКСБ 80 растворялись дольше, чем КСБ 80.

При температуре 80 ºС наблюдали постоянную скорость растворения 310 с для ИСБ 90 (рисунок 1, *а*) и 315 с – для ЛКСБ 80 (рисунок 1, *в*) независимо от их концентрации. При трёх других температурных режимах 20, 40 и 60 ºС для ИСБ 90 и ЛКСБ 80 установлены положительные линейные зависимости от концентрации ингредиентов. Однако для ИСБ 90 различия в скорости растворения при 20 и 60 ºС были недостоверными. Минимальную скорость растворения ИСБ 90 наблюдали при 40 ºС. Для ЛКСБ 80 наблюдаемые отличия длительности растворения при 20, 40 и 60 ºС были достоверными. Как следует из графика на рисунке 1, *в*, минимальная скорость растворения ЛКСБ 80 была при 60 ºС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях эксперимента установлено, что оптимальная температура растворения ИСБ 90 составляла 40 ºС, для КСБ 80 и ЛКСБ 80 – 60 ºС. При 80 ºС продолжительность растворения всех наблюдаемых ингредиентов удлинялась в сравнении с более низкими температурами. Этот результат можно объяснить усилением тепловой денатурации сывороточных белков. При этом температура гидратации 80 ºС нежелательна в случае формирования смесей с ИСБ 90 и ЛКСБ 80 из-за значительного удлинения процесса.

Несмотря на то, что содержание белка в сухих КСБ 80 и ЛКСБ 80 и, следовательно, в созданных с ними водных растворах было одинаково, в динамике растворения этих ингредиентов выявлены достоверные отличия. В системах с КСБ 80 допустим весь исследованный температурный диапазон, в то время как для ЛКСБ 80 приемлем только интервал от 20 до 60 ºС.

Полученные результаты могут быть применимы в практических условиях при обосновании режимов технологического процесса производства молочных составных и специализированных продуктов.

Материал подготовлен в рамках государственного задания FGMF-2025-0011.

Автор выражает признательность главному технологу АО «Молвест» / ПАО Молочный Комбинат Воронежский, доктору технических наук Мельниковой Елене Ивановне за предоставленные образцы молочных белков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 35004-2023 Продукты пищевые энтерального питания базовые. М. : ФГБУ «Институт стандартизации», 2023. 21 с.

2. Fabbro E.D., Shalini D., Bruera E. Symptom Control in Palliative Care – Part II: Cachexia / Anorexia and Fatigue. J. Palliat Med 2006; 9(2): 409–421. 25. Cotogni P., Stragliotto S., Ossola M., Collo A., Riso S. The Role of Nutritional Support for Cancer Patients in Palliative Care. Nutrients. 2021 Jan 22; 13(2):306.

3. Arends J., Bachmann P., Baracos V., Barthelemy N., Bertz H., Bozzetti F. [et al.]. ESPEN guidelines on nutrition in cancer patients. Clin Nutr 2017;36 (1):11e48.

4. Barazzoni R., Bischoff S.C., Breda J. [et al.]. ESPEN expert statements and practical guidance for nutritional management of individuals with SARS-CoV-2 infection. Clin Nutr. 2020; 39(6):1631-8. DOI: 10.1016/j.clnu.2020.03.022.

5. Stratton R.J., Hébuterne X., Elia M. A systematic review and meta-analysis of the impact of oral nutritional supplements on hospital readmissions. Ageing Res Rev. 2013; 12(4):884-97. DOI: 10.1016/j.arr.2013.07.002.

6. Потапов А.Л. Дополнительное пероральное питание в составе нутритивной поддержки в онкохирургии. Вестник анестезиологии и реаниматологии. 2020; 17(2):64-69. https://doi.org/10.21292/2078-5658-2020-17-2-64-69.

7. Hoekstra J.C., Goosen J.H., de Wolf G.S., Verheyen C.C. Effectiveness of multidisciplinary nutritional care on nutritional intake, nutritional status and quality of life in patients with hip fractures: a controlled prospective cohort study. Clin Nutr 2011; 30: 455–61.

8. Anbar R., Beloosesky Y., Cohen J. [et al.]. Tight calorie control in geriatric patients following hip fracture decreases complications: a randomized, controlled study. Clin Nutr, 2014; 33: 23–8.

9. Wolfe R.R., Rutherfurd S.M., Kim I.Y. and Moughan P.J. 2016. Protein quality as determined by a digestible indispensable amino acid score: Evaluation of factors underlying the calculation. Nutrition Reviews 74 (9): 584–99. doi: 10.1093/nutrit/nuw022.

10. Forester S.M., Jennings-Dobbs E.M., Sathar S.A. and Layman D.K. 2023. Perspective: Developing a nutrient-based framework for protein quality. *The Journal of Nutrition* 153 (8):2137–46. doi: 10.1016/j.tjnut.2023.06.004

11. Гурский И.А. Текстура обезжиренного йогурта с изолятами и концентратами белков // Пищевые системы. 2023. № 1. С. 29–35.

12. Технологические функции белков молочной сыворотки в энтеральном питании / Новокшанова А.Л. // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 108–111.

13. Mairaj Khalid, Nayef Ghasem, Xing Yang, Karin Schroen, Akmal Nazir. Progress in Membrane Technology for the Enrichment of Individual Whey Proteins, Industrial & Engineering Chemistry Research, 10.1021/acs.iecr.5c00643.

14. Assiya Mirzakulova, Tolkyn Sarsembaeva, Zhulduz Suleimenova, Łukasz Kowalski, Bożena Gajdzik, Radosław Wolniak, Michał Bembenek. Whey: Composition, Processing, Application, and Prospects in Functional and Nutritional Beverages – A Review, Foods, 10.3390/foods14183245, 14, 18, (3245).

15. Raúl J. Delgado-Macuil, Beatriz Perez-Armendariz, Gabriel Abraham Cardoso-Ugarte, Shirlley E. Martinez Tolibia, Alfredo C. Benítez-Rojas, Recent Biotechnological Applications of Whey: Review and Perspectives, Fermentation, 10.3390/fermentation11040217, 11, 4, (217).

16. ГОСТ 32892-2014. Молоко и молочная продукция. Метод измерения активной кислотности (с Поправкой). М. : Стандартинформ, 2015.

Информация об авторах

А. Л. Новокшанова – доктор технических

наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи.

REFERENCES

1. GOST 35004-2023 Basic enteral nutrition products. M. : Federal State Budgetary Institution "Institute of Standardization", 2023. 21 p.

2. Fabbro, E.D., Shalini, D., Bruera, E. Symptom Control in Palliative Care - Part II: Cachex-ia/Anorexia and Fatigue. J Palliat Med 2006; 9(2): 409-421. 25. Cotogni P., Stragliotto S., Ossola M., Collo A., Riso S. The Role of Nutritional Support for Cancer Patients in Palliative Care. Nutrients. 2021 Jan 22;13(2):306.

3. Arends, J., Bachmann, P., Baracos V., Barthelemy, N., Bertz, H., Bozzetti, F. [et al.]. (2017). ESPEN guidelines on nutrition in cancer patients. Clin Nutr 2017; 36 (1):11e48.

4. Barazzoni, R., Bischoff S.C., Breda, J. [et al.]. (2020). ESPEN expert statements and practical guidance for nutritional management of individuals with SARS-CoV-2 infection. Clin Nutr. 2020; 39(6):1631-8. DOI: 10.1016/j.clnu.2020.03.022.

5. Stratton, R.J., Hébuterne X., Elia M. (2013). A systematic review and meta-analysis of the impact of oral nutritional supplements on hospital readmissions. Ageing Res Rev. 2013; 12(4):884-97. DOI: 10.1016/j.arr.2013.07.002.

6. Potapov, A.L. (2020). Additional oral nutrition as part of nutritional support in oncosurgery. Bulletin of Anesthesiology and Reanimatology. 2020; 17(2):64-69. https://doi.org/10.21292/2078-5658-2020-17-2-64-69.

7. Hoekstra, J.C., Goosen, J.H., de Wolf, G.S., Verheyen, C.C. (2011). Effectiveness of multidisciplinary nutritional care on nutritional intake, nutritional status and quality of life in patients with hip fractures: a controlled prospective cohort study. Clin Nutr, 2011; 30: 455–61.

8. Anbar, R., Beloosesky, Y., Cohen, J [et al.]. (2014). Tight calorie control in geriatric patients following hip fracture decreases complications: a randomized, controlled study. Clin Nutr, 2014; 33: 23–8.

9. Wolfe, R.R., Rutherfurd, S.M., Kim, I.Y. and Moughan, P.J. (2016). Protein quality as determined by a digestible indispensable amino acid score: Evaluation of factors underlying the calculation. Nutrition Reviews 74 (9):584-99. doi: 10.1093/nutrit/nuw022.

10. Forester, S.M., Jennings-Dobbs, E.M., Sathar, S.A. and Layman, D.K. (2023). Perspective: Developing a nutrient-based framework for pro¬tein quality. The Journal of Nutrition 153 (8):2137-46. doi: 10.1016/j.tjnut.2023.06.004.

11. Gurskiy, I.A. (2023). Texture of Low-Fat Yogurt with Protein Isolates and Concentrates // Food Systems. 2023. No. 1. pp. 29-35.

12. Novokshanova, A.L. (2025). Developments in the field of specialized nutrition using dairy raw materials. Polzunovskiy vestnik, (2), 108-111. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.016. EDN: https: //elibrary.ru/JMFXGV.

13. Mairaj Khalid, Nayef Ghasem, Xing Yang, Karin Schroen, Akmal Nazir. (2025). Progress in Membrane Technology for the Enrichment of Individual Whey Proteins, Industrial & Engineering Chemistry Research, 10.1021/acs.iecr.5c00643.

14. Assiya Mirzakulova, Tolkyn Sarsembaeva, Zhulduz Suleimenova, Łukasz Kowalski, Bożena Gajdzik, Radosław Wolniak, Michał Bembenek (2025). Whey: Composition, Processing, Application, and Prospects in Functional and Nutritional Beverages - A Review, Foods, 10.3390/foods14183245, 14, 18, (3245).

15. Raúl, J. Delgado-Macuil, Beatriz. (2025). Perez-Armendariz, Gabriel Abraham Cardoso-Ugarte, Shirley E. Martinez Tolibia, Alfredo C. Benítez-Rojas, Recent Biotechnological Applications of Whey: Review and Perspectives, Fermentation, 10.3390/ fermentation11040217, 11, 4, (217).

16. GOST 32892-2014. Milk and Dairy Products. Method for Measuring Active Acidity (with Amendment). Moscow: Standartinform; 2015.

Information about the authors

A.L. Novokshanova - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 102–110.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 102–110.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 678.552.011.046:664.8.038
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.014 EDN: TQUDGG

СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ КРАХМАЛА С ДОБАВКОЙ ДИОКСИДА ТИТАНА

Татьяна Владленовна Крюк [1], Евгений Николаевич Труш [2], Оксана Сергеевна Попова [3], Сергей Владимирович Пильгук [4], Наталья Александровна Романенко [5]

[1, 2, 5] Институт физико-органической химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко, Донецк, Россия
[3] Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, Донецк, Россия
[4] Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия
[1] ktvl2010@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8538-5856
[2] trush.chem@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-5545-9328
[3] omango@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0008-5406
[4] blago2@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5313-0187
[5] nathaly_roman@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-0703-0806

Аннотация. *Технология производства полимерных пленок традиционно включает экструзионную обработку. При этом при разработках новых пленочных материалов на основе крахмала, которые находятся на начальной стадии «проверки формулы», используют более простой способ полива раствора. Для того чтобы в дальнейшем лабораторный метод реализовался в крупномасштабное производство, необходимо обеспечить наличие у пленок определенного набора сорбционных, барьерных и механических характеристик. Показано, что наполнение пленкообразующего раствора, содержащего кукурузный крахмал, натрий карбоксиметилцеллюлозу, поливиниловый спирт (соотношение полимеров 70:17:13 мас./мас.), лимонную кислоту и глицерин, смесью пищевой добавки Е171 (диоксид титана) с экстрактом эхинацеи пурпурной (Echinacea purpurea (L.) Moench) позволяет получить пленочные материалы, обладающие достаточным для упаковки пищевых продуктов уровнем потребительских свойств с использованием технологии полива. Для придания образцам однородности предложено включение в технологию их получения ультразвуковой обработки. Установлено, что использование ультразвуковой обработки пленкообразующей композиции сохраняет стабильность полимерной суспензии в течение всего процесса сушки поливочного раствора. При наполнении композита смесью Е171 и экстракта эхинацеи в количестве 1 % и 5 % от массы полимеров соответственно паропроницаемость пленок снижается на 11 %, прочность при растяжении увеличивается на 11 %, значительно повышается антирадикальная активность и способность выдерживать действие УФ-излучения по сравнению с образцами без добавок. Предложена технологическая схема получения пленочных материалов.*

Ключевые слова: *пищевая упаковка, крахмал, карбоксиметилцеллюлоза, поливиниловый спирт, диоксид титана, экстракт эхинацеи пурпурной, пленочные материалы, ультразвуковая обработка, технология.*

Благодарности: *авторы выражают признательность с.н.с. ИСПМ РАН Гончарук Г.П. за измерение механических характеристик пленочных материалов, а также лаб.-иссл. ИНФОУ Малык Б.В. за анализ образцов методом сканирующей электронной микроскопии. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ИНФОУ (FRES-2024-0001).*

Для цитирования: Свойства и технология получения пищевой пленки на основе крахмала с добавкой диоксида титана / Т. В. Крюк [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 102–110. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.014. EDN: https://elibrary.ru/TQUDGG.

Original article

PROPERTIES AND TECHNOLOGY OF PRODUCING FOOD FILM BASED ON STARCH WITH ADDITIVE OF TITANIUM DIOXIDE

Tatiana V. Kryuk [1], Eugene N. Trush [2], Oksana S. Popova [3], Sergey V. Pilhuk [4], Natalia A. Romanenko [5]

[1, 2, 5] L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, Donetsk, Russia
[3] Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk, Russia
[4] Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia
[1] ktvl2010@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8538-5856

© Крюк Т. В., Труш Е. Н., Попова О. С., Пильгук С. В., Романенко Н. А., 2026

СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ КРАХМАЛА С ДОБАВКОЙ ДИОКСИДА ТИТАНА

[2] trush.chem@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-5545-9328
[3] omango@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0008-5406
[4] blago2@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-5313-0187
[5] nathaly_roman@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-0703-0806

Abstract. *The technology of polymer film production traditionally includes extrusion processing. At the same time, when developing new film materials based on starch, which are at the initial stage of "formula testing", a simpler method of solution casting is used. In order for the laboratory method to be subsequently implemented in large-scale production, it is necessary to ensure that the films have a certain combination of sorption, barrier and mechanical properties. It is shown that loading a film-forming corn starch, sodium carboxymethylcellulose, polyvinyl alcohol (polymer ratio 70:17:13 wt/wt) solution, citric acid and glycerin with a mixture of food additive E171 (titanium dioxide) and an extract of purple coneflower (Echinacea purpirea (L.) Moench) makes it possible to obtain film materials with a level of consumer properties sufficient for packaging food products using the casting technology. In order to impart homogeneity to the samples, it is proposed to include ultrasonic treatment in the production technology. It has been established that the use of ultrasonic treatment of the film-forming composition maintains the stability of the polymer suspension during the entire drying process of the casting solution. When loading the composite with a mixture of E171 and echinacea extract in an amount of 1% and 5% of the polymer mass, respectively, the films vapor permeability decreases by 11%, tensile strength increases by 11%, antiradical activity and the ability to withstand UV radiation significantly increase compared to samples without additives. A process flow chart for producing film materials is presented.*

Keywords: *food packaging, starch, carboxymethyl cellulose, polyvinyl alcohol, titanium dioxide, purple coneflower extract, film materials, ultrasonic treatment, technology*.

Acknowledgements*: the author expresses gratitude to the s.r. of Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials Goncharuk G.P. for measuring the mechanical characteristics of film materialsand also to the r.l.a. of L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry Malyk B.V. for the analysis of samples by scanning electron microscopy, the work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state task of the IPOCC (FRES-2024-0001).*

For citation: Kryuk, T. V., Trush, E. N., Popova, O. S., Pilhuk, S. V. & Romanenko, N. A. (2026). Properties and technology of producing food film based on starch with the additive of titanium dioxide. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 102-110. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.014. EDN: https: //elibrary.ru/TQUDGG.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция минимизации воздействия человека на окружающую среду и сохранения природных ресурсов для будущих поколений, которая усилилась в последние годы, направляет бизнес к изменениям, которые заключаются, в частности, в производстве нового поколения биоразлагаемых материалов. К ним относится пищевая упаковка (ПУ) в виде пленок на основе доступного, воспроизводимого и дешевого крахмала (Кр).

На сегодняшний день крахмальные пленочные материалы в большинстве случаев получают по двум технологиям, которые условно можно обозначить как «мокрые» (литье или полив) и «сухие» (экструзия) [1, 2].

В методе литья пленкообразующий раствор поливают на пластину (стеклянную, пластиковую или металлическую; толщина пленки контролируется по массе раствора) с последующим испарением растворителя путем выдержки при заданной температуре в течение определенного времени и при контролируемой относительной влажности воздуха. В случае получения крахмальных пленок по данной технологии необходимо включение стадии желатинизации полисахарида, или использование предварительно желатинизированного Кр.

Разновидностью метода является ленточное литье, в котором подложка представляет собой конвейерную ленту, непрерывно движущуюся с заданной скоростью. Одновременно с этим к ней подводится тепло (горячий воздух, УФ- или ИК-излучение). Преимущества процесса в том, что он позволяет контролировать толщину раствора с помощью регулируемого ограничителя и производить многослойные пленки путем полива нового раствора на уже готовую первую пленку [3].

В целом метод полива демонстрирует несомненные достоинства (простота, низкая стоимость, отсутствие остаточных напряжений, высокие оптические характеристики получаемой пленки, др.) и является подходящим для мелкомасштабного и/или непериодического производства материалов.

Процедура экструзии основана на термопластичной природе полимеров, Кр не является истинным термопластом, поэтому его обработка требует создания специальных условий. Главное из них – наличие пластификатора, повышающего подвижность полимерных цепей. Это позволяет крахмальным гранулам при нагревании более 90 ºС и сдвиге расширяться с последующим разрушением, в результате Кр плавится и разжижается [4]. Однако высокая температура может ускорить желатинизацию Кр, привести к образованию амилозолипидных комплексов [5], кристаллов с высокой устойчивостью к нагреванию и разложению [6]. Также негативно влияют повышенные скорость вращения шнека (ускоряется деградация Кр [7]) и влажность полимера (снижается вязкость и сокращается время пребывания Кр в полости экструдера, что уменьшает влияние воздействия сжимающих и сдвиговых нагрузок [8]).

В настоящее время активно проводятся исследования по разработке новых технологий получения пленочных материалов из Кр.

Авторами [9] предлагается использование реактивной экструзии, в ходе которой протекают химические или ферментативные реакции полимера, приводящие к его модификации путем прививки, сшивания, полимеризации или поликонденсации. Таким способом были получены пищевые пленки из смесей Кр с ацетатом целлюлозы [10] и полимолочной кислоты [11]. Однако реактивную экструзию невозможно точно регулировать, к тому же она не применима для медленно (более 15 мин) протекающих реакций [12].

Комбинация полива и экструзии позволила разработать пленки из кукурузного крахмала с высоким содержанием амилозы, характеризующиеся более высокими показателями прочности и эластичности и более низким – влагопоглощения [13].

Хороший эффект достигается при последовательном сочетании экструзии и ультразвуковой обработки (УЗО). При ультразвуковом воздействии на расплав,

образующийся при экструзионной обработке нативных крахмалов, наблюдается одновременное улучшение прочностных и деформационных показателей образцов [14]. Действие только УЗО также позволяет получать крахмальные пленки с повышенным уровнем механических свойств. Имеются данные, что УЗО гранул Кр [15] и пленкообразующего раствора [16] улучшает прочностные характеристики материалов. Авторы объясняют такой результат тем, что УЗО способствует разрыву макромолекул Кр и снижению их молекулярной массы, создавая поливочный раствор с низкой вязкостью, в результате в пленках отсутствуют поры и дефекты.

При действии УФ-облучения на крахмальные пленкообразующие растворы увеличивается удлинение при разрыве (ε_p), снижается гидрофильность, чувствительность к влаге, паропроницаемость (ПП) получаемых пленок, однако их УФ-защитные свойства ухудшаются по сравнению с контролем [17].

В целом анализ научной литературы показывает, что разработки в области пленочных материалов на основе Кр находятся на начальной стадии «проверки формулы», которая является основной для обеспечения следующего этапа исследований, направленного на крупномасштабное производство. Для того чтобы такое производство реализовалось, необходимо обеспечить пленкам определенный набор сорбционных, барьерных и механических свойств. Поскольку из нативного Кр невозможно получить материалы с эксплуатационными характеристиками, сравнимыми с пленками, изготовленными из синтетических полимеров, кроме того, свойства крахмальных пленок могут ухудшаться со временем [18], необходимо сосредоточить исследования на поиск добавок, нивелирующих недостатки Кр.

Цель настоящей работы – разработка технологии получения и изучение свойств пленочных материалов на основе кукурузного крахмала, натрий карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) и поливинилового спирта (ПВС), включающих добавки антиоксидантов (экстракт эхинацеи (ЭЭ)) и блокатора УФ-излучения (титана (IV) оксид).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования использовали: кукурузный крахмал, ГОСТ 32159-2013 (ПромАгроПак, Россия); КМЦ, M_W = 90 кДа, DS = 0,7 (USK Chemical, Турция); ПВС, ГОСТ 10779-78, динамическая вязкость 4 %-ного раствора 10 мПа·с, степень гидролиза 96,0 % (Невинномысский Азот, Россия); лимонную кислоту (ЛК), х.ч. (Цитробел, Россия); глицерин (Гл), ч.д.а. (Компонент-реактив, Россия); экстракт эхинацеи пурпурной *Echinaceapurpurea (L.) Moench* (World-Way Biotech Inc., Китай); пищевую добавку Е171 (диоксид титана), средний размер частиц 0,2–0,3 мкм (Зеленые Линии, Россия); 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (ДФПГ*), 98 %, (Sigma-Aldrich, США); этанол, 96 % (РФК, Россия). На всех этапах экспериментов использовалась дистиллированная вода.

Технология получения пленок включала желатинизацию Кр в воде (95 ºС; 0,5 ч), смешение полученного вязкого однородного раствора с Гл, ЛК, раствором КМЦ, раствором ПВС (50 ºС; 0,5 ч), охлаждение до комнатной температуры, введение добавок (при необходимости), УЗО (при необходимости), деаэрацию, полив смеси в полистирольные чашки Петри и высушивание (30 ºС; 20 ч) при относительной влажности воздуха 85 %. УЗО поливочного раствора (21 кГц, 600 Вт) проводили в течение 15 мин с помощью ультразвукового генератора ИЛ100-6 (Инлаб, Россия); вибрационную головку ультразвуковой установки непрерывно охлаждали до температуры 25 ºС. В качестве добавок использовали ЭЭ, Е171 и их смесь. Количество добавок составляло в % от массы полимеров: 5 (ЭЭ), 1 (Е171).

Значения водорастворимости (ВР), ПП пленок определяли гравиметрическим методом [19, 20]. Толщину образцов (*l*) измеряли цифровым микрометром Mitutoyo 227-223 с точностью 0,001 мм (Mitutoyo Absolute, Япония); механические характеристики – предел прочности при растяжении (σ_p), разрывное удлинение, модуль Юнга (E_0) – на разрывной машине Autograph AGS-H (Shimadzu, Япония) при скорости растяжения 5 мм/мин, 25 ºС (ширина образцов составляла 3 мм, длина рабочей части – 35 мм). Перед испытаниями пленки выдерживали в течение суток в эксикаторе при влажности 80 %. Электронно-микроскопические исследования пленочных материалов размером 1×1 см, покрытых слоем золота толщиной 10 нм, выполняли с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5300LV (Jeol, Япония). Спектры пленок, помещенных в рамки из АВС пластика размером 28×28 мм (внутренний размер кюветного отделения), регистрировали с помощью спектрофотометра Helios Gamma (Thermo Electron Corporatio», США) в диапазоне λ = 200–600 нм. Светопоглощение растворов измеряли на фотоколориметре КФК-2МП (Загорский оптико-механический завод, Россия).

Антирадикальную активность (АРА) определяли следующим образом. Предварительно взвешенные образцы пленок массой 0,1 г выдерживали в течение суток в 5 мл 30 % раствора этилового спирта. 1 мл полученного экстракта добавляли в кювету толщиной 10 мм, содержащую 3,5 мл раствора ДФПГ* концентрацией $6 \cdot 10^{-5}$ моль/лв 96 %-ном этаноле. В течение 30 мин записывали изменение оптической плотности раствора (λ = 540 нм, раствор сравнения – 96 % этиловый спирт). АРА (в %) рассчитывали по формуле:

$$\text{АРА} = 1 - \frac{D}{D_0} \times 100,$$

где D и D_0 – оптическая плотность раствора ДФПГ*и исследуемого раствора через 30 мин реакции соответственно.

УФ-деградацию пленок проводили непрерывно в течение 14 суток в герметичной камере, оборудованной УФ лампой Vontech (Медхайтек, Россия). Характеристики УФ-излучения: мощность 21,3 Вт, световой поток 700 лм, освещенность 350 клк, λ = 253,7 нм.

Статистическую обработку всех полученных результатов осуществляли с помощью пакета программ Origin (версия Origin 2019*b*). Число экспериментов для статистической обработки составляло 3–5. Результаты представлены как «среднее значение ± стандартное отклонение», заданный уровень значимости – 95 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее нами было показано [21], что на основе смеси Кр/КМЦ/ПВС (массовое соотношение компонентов 70:17:13) с использованием технологии полива возможно получение пленочных материалов, обладающих приемлемым для ПУ уровнем потребительских свойств, в случае включения в композицию добавок ЛК (сшивающий агент) и ГЛ (пластификатор) в количестве 7 и 37,5 % от массы полимеров соответственно. Несмотря на низкую паропроницаемость и хорошие прочностные характеристики получаемых пленок (табл. 1), степень их гидрофильности достаточно высокая: при контакте с водой уже через непродолжительное время (0,5-1 ч) наблюдается потеря целостности образцов.

Таблица 1 – Свойства пленочных материалов на основе Кр/КМЦ/ПВС

Table 1 – Properties of film materials based on S/CMC/PVA

Добавки в составе пленок	*l*±0,01, мм	ВР, %	ПП, г/(м^2·сут)	$\sigma_р$, МПа	$\varepsilon_р$, %	E_0, МПа	АРА, %
Без добавок	0,11	32 ± 2	49 ± 2	30 ± 3	5,9 ± 0,1	1765 ± 35	17,1 ± 0,7
ЭЭ	0,10	36 ± 2	68 ± 3	19 ± 2	27,1 ± 0,2	745 ± 15	69,0 ± 1,0
Е171	0,09	24 ± 1	37 ± 2	20 ± 2	5,2 ± 0,1	1000 ± 20	2,4 ± 0,1
ЭЭ + Е171	0,09	32 ± 2	43 ± 2	34 ± 3	4,7± 0,1	1430 ± 30	52,1 ± 1,0

Примечание
Образцы, содержащие Е171, получены с применением УЗО

Для улучшения потребительских свойств пленочных материалов, а также для придания им дополнительных свойств в состав пленкообразующего раствора вводили растительный экстракт, богатый полифенолами (экстракт эхинацеи пурпурной) [22], и TiO_2, обладающий армирующим действием [23] и способный эффективно поглощать УФ-излучение [24], которое инициирует фотодеградацию белков и окисление жиров в пищевых продуктах.

Добавки вводили в полимерную композицию как индивидуально, так и в виде смеси. ЭЭ загружали в полностью сформированный охлажденный до комнатной температуры пленкообразующий раствор, перемешивали смесь еще 3 мин, после чего проводили деаэрацию, полив и сушку. Полученные пленки имели ровную матовую поверхность и практически не отличались от образцов, не содержащих ЭЭ (рис. 1, А, Б). При включении в полимерную композицию Е171 (как индивидуально, так и в виде смеси с ЭЭ) поливочный раствор представлял собой нестабилизированную суспензию, в результате чего в сформированных пленках наблюдались агрегаты, сконцентрированные в основном в центральной части образца (рис. 1, В, Г).

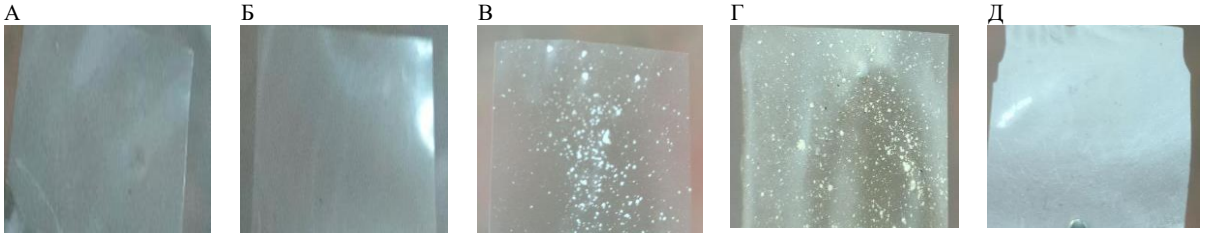


Рисунок 1 – Фотографии пленок на основе Кр/КМЦ/ПВС (А), наполненных ЭЭ (Б), Е171 (В), смесью ЭЭ и Е171 (Г, Д). Д – Образец состава Г, полученный с применением УЗО

Figure 1 – Photos of S/CMC/PVA films (A) loaded with EE (B), E171 (C), EE and E171 mixture (D, E). E – Sample of composition D was obtained using ultrasonic treatment

Чтобы достичь равномерного распределения или избежать образования агрегатов Е171, пленкообразующую композицию после смешения всех ее компонентов подвергли УЗО. Оптимальное время ультразвукового воздействия составило 15 мин: при данной длительности обработки и параметрах работы установки (21 кГц, 600 Вт) достигается образование устойчивой мелкодисперсной суспензии. Полученные по такой технологии пленки имели светло-желтое окраску, равномерную глянцевую поверхность без агломератов в виде частиц неорганической добавки, разрывов и повреждений (рис. 1, Д), что свидетельствует о достижении хорошей гомогенизации композиции и сохранении ее стабильности в течение всего периода сушки.

Микроскопические исследования (СЭМ) показали, что при введении смеси Е171 и ЭЭ морфология поверхности образца и базовой пленки подобны, при этом структура наполненного композита более мелкозерниста (рис. 2).

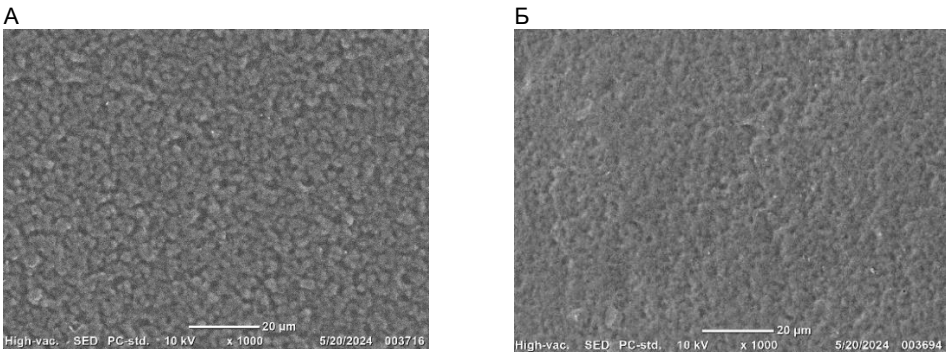


Рисунок 2 – Микрофотографии (СЭМ) пленок на основе Кр/КМЦ/ПВС (А), наполненных смесью ЭЭ и Е171(Б)

Figure 2 – Micrographs (SEM) S/CMC/PVA films (A) loaded with EE and E171 mixture (B)

Далее изучали свойства пленочных материалов, содержащих ЭЭ, Е171 и их смесь (образцы с пищевой добавкой были получены с применением УЗО). Установлено, что введение наполнителей во

всех случаях приводит к некоторому уменьшению толщины пленок. Водорастворимость образцов при добавлении ЭЭ повышается, Е171 – снижается (табл. 1). Данные результаты хорошо согласуются с теоретическими представлениями о том, что ВР пленок на основе биополимеров обычно увеличивается после введения в них экстрактов, богатых высокогидрофильными полифенолами, которые могут легко взаимодействовать с молекулами воды, уменьшать взаимодействие полимерных цепей и вызывать растворение матрицы пленки в воде [25]. TiO_2, напротив, снижает доступность гидроксильных групп Кр, взаимодействующих с водой, за счет образования большого количества водородных связей между полисахаридом и оксидом [26]. Можно предположить, что такой же характер взаимодействия реализуется между TiO_2 и ОН группами производного целлюлозы и ПВС. В присутствии смеси добавок ВР имеет одинаковый с базовой пленкой уровень значений (табл. 1).

Паропроницаемость образцов, содержащих ЭЭ, на 40 % превышает значение данного показателя для пленочных материалов, в состав которых входят только полимеры. Учитывая наличие во вводимой добавке полифенолов, полагаем, что эффект снижения барьерных свойств композитной пленки по отношению к водяному пару может быть обусловлен двумя причинами: увеличением количества свободных ОН групп в составе композиции и ослаблением межмолекулярного взаимодействия между полимерными цепями за счет внедрения между ними фенольных соединений экстракта.

Неорганический компонент, напротив, снижает паропроницаемость в 1,3 раза (табл. 1), что также соответствует имеющимся в литературе данным о влиянии нерастворимого в воде диоксида титана на структуру и свойства полисахаридной матрицы, а именно, блокирование доступных групп ОН крахмала и КМЦ за счет Н-связывания. В результате создается препятствие для диффузии молекул водяного пара, мигрирующих через пленку, что способствует уменьшению ПП [23].

ЭЭ оказывает пластифицирующий эффект, что проявляется в значительном увеличении ε_p (рис. 3). Наполнение полимерной смеси Е171 придает образцам жесткость, а сочетание фитоэкстракта и пищевой добавки позволяет получить достаточно прочные пленки (табл. 1).

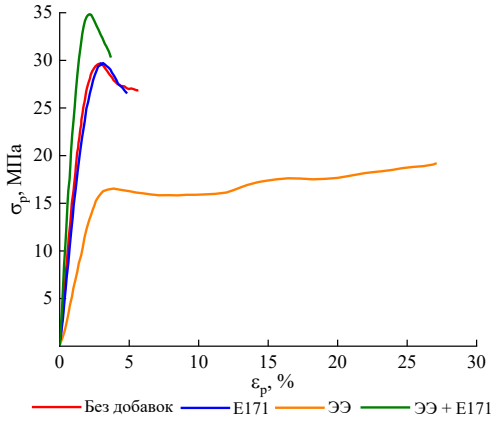


Рисунок 3 – Деформационные кривые растяжения пленочных материалов

Figure 3 – Stress-strain curves of film materials

Антиоксидантные свойства ПУ – важное ее достоинство, поскольку свободные радикалы оказывают неблагоприятное воздействие на пищевые продукты. В случае упаковки их в антиоксидантно активную пленку ингибиторы окисления выделяются во внутреннюю часть упаковки, и это способствует как продлению срока хранения, так и сохранению качества продуктов [27].

Пленочные материалы, полученные из крахмала и поливинилового спирта, не обладают АРА [28], однако известно о слабых антирадикальных свойствах ЛК [29], TiO_2 [30] и сильных – ЭЭ [31]. Оценку АРА пленок проводили путем изучения реакции экстрагированных из них веществ со стабильным свободным радикалом ДФПГ*.

Как видно из полученных кинетических кривых (рис. 4), базовая пленка, в которой присутствует остаточное количество несвязанной ЛК, обладает слабой АРА. Максимальный эффект инактивации ДФПГ*, как и следовало ожидать, проявляется при его реакции с антиоксидантами, входящими в состав ЭЭ. У TiO_2 не выявлена способность поглощать ДФПГ*, более того, его наличие в составе композита подавляет антиоксидантные свойства ЛК и ЭЭ (табл. 1).

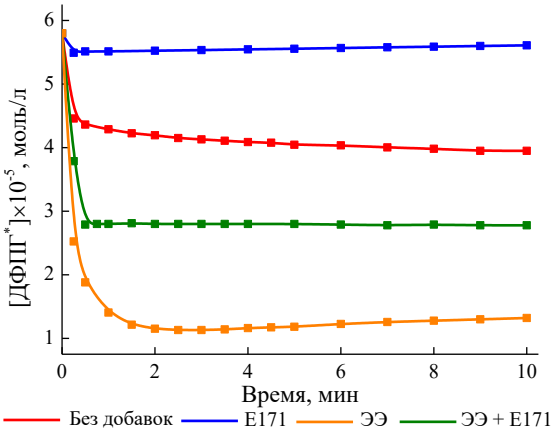


Рисунок 4 – Влияние добавок в составе пленок на кинетику реакции с ДФПГ*

Figure 4 – The influence of fillers in the films on the kinetics of the reaction with DPPH*

Под действием УФ-излучения пленочные материалы подергаются деструкции, что проявляется в изменении их цвета (бесцветные образцы приобретают коричнево-желтую окраску) и характера поглощения в области 200–400 нм. Спектры образцов всех изучаемых составов до и после 14 суток непрерывного облучения представлены на рисунке 5. Как видно, на спектрах пленок без добавок появляется широкая полоса поглощения в области 250–390 нм. У образцов, содержащих ЭЭ, виден характерный пик полифенолов фитоэкстракта в диапазоне 255–300 нм, интенсивность которого заметно уменьшается в результате фотодеградации. TiO_2, как и ожидалось, эффективно предотвращает фотостарение, и эта способность сохраняется также при включении его в композит в составе смеси с ЭЭ. Так, для пленок, наполненных только неорганическим наполнителем, в области 250–390 нм отмечается очень слабый максимум поглощения. В случае наличия в полимерной матрице смеси ЭЭ и Е171 после облучения на спектре сохраняется максимум, характерный для экстракта (250–300 нм), и отсутствует пик поглощения с максимумом при 300 нм, который отвечает деградации композита Кр/КМЦ/ПВС.

Таким образом, диоксид титана выступает как

фотостабилизирующий агент для растительного компонента. Результаты, полученные при изучении АРА и УФ-деградации пленок, наполненных смесью ЭЭ и Е171, могут быть следствием сильного комплексообразования фенольных кислот фитоэкстракта (хлорогеновой, кафтаровой, кофейной) с ионом Ti^{4+} [32].

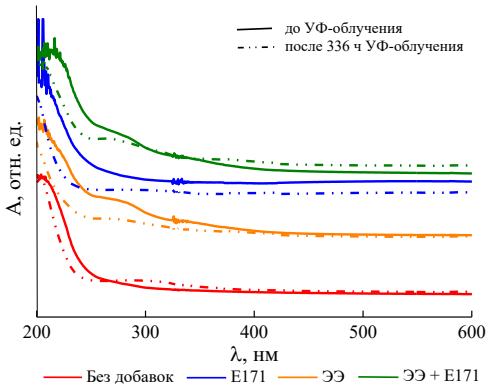


Рисунок 5 – Спектры поглощения пленок до и после УФ-облучения

Figure 5 – Absorption spectra of films before and after UV irradiation

Согласно ГОСТ Р 57432-2017 «Упаковка. Пленки из биоразлагаемого материала», базовый состав наших пленок позволяет отнести их по способу производства к типу 5 (получаемые в результате смешения биоразлагаемых полимерных материалов). Сопоставление свойств материалов требованиям, которые предъявляет к ним нормативный документ по показателям толщина (не более 0,5 мм), разрывная прочность (не менее 14 МПа), разрывное удлинение (не менее 5 %), паропроницаемость (не более 300 г/(м^2·сут), восприимчивость к воде (умеренная). Сравнение перечисленных требований с данными, представленными в таблице 1, показывает, что только по показателю относительное удлинение при разрыве экспериментальные образцы не соответствуют требованиям ГОСТ. При этом отклонение величины ε_p от нормативного значения не велико и составляет всего 6 %.

Таким образом, в целом наши результаты позволяют говорить, что пленки на основе трехкомпонентной полимерной системы Кр/КМЦ/ПВС, содержащие дополнительно смесь ЭЭ и Е171, технология получения которых включает стадию УЗО пленкообразующей композиции, могут представлять собой потенциальный биоразлагаемый упаковочный материал для пищевых продуктов. Установлено, что при депонировании пленок в грунт видимое начало разложения наблюдается уже через месяц экспозиции, за три месяца площадь образцов уменьшается на ~50 %.

Технологическая схема получения материала представлена на рисунке 6.

Из загрузочных емкостей с автоматическими весовыми дозаторами заданные количества ПВС, КМЦ, Кр поступают соответственно в смесители (*1, 2, 3*) с мешалкой и подогревом, туда же подает необходимое количество дистиллированной воды; нагрев и перемешивание включаются одновременно. Температура для Кр 85 ºС, для КМЦ, ПВС – 70 ºС; продолжительность перемешивания и частота вращения мешалки устанавливаются в зависимости от количества реагентов. В начале процесса перемешивания/нагрева в смеситель (*2*) дополнительно поступает ЛК, в смеситель (*3*) – Гл.

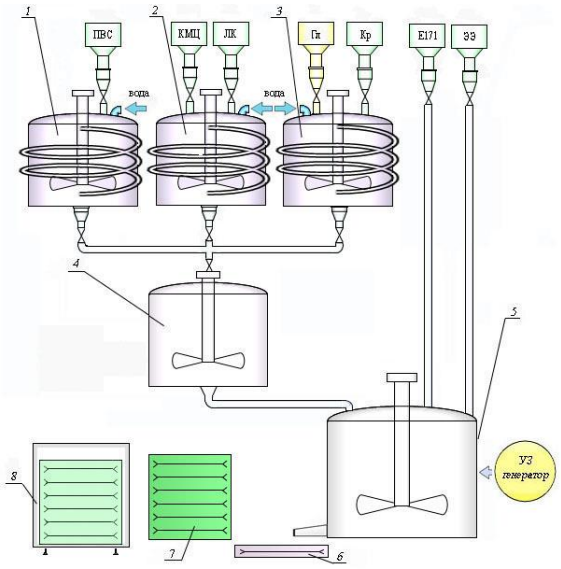


Рисунок 6 – Технологическая схема получения пленочных материалов

Figure 6 – Technological scheme of film materials production

После окончания процесса перемешивания/нагрева полученные растворы из смесителей (*1–3*) поступают в смеситель (*4*), где они перемешиваются в течение заданных времени и скорости при температуре 85 ºС для получения поливочного раствора. В смесителе (*5*) раствор, полученный в смесителе (*4*), смешивается с ЭЭ и Е171 с обработкой ультразвуком для получения однородной смеси. Рабочие параметры УЗО (частота, мощность, продолжительность) зависят от массы пленкообразующего раствора. Далее этот раствор с помощью дозатора наливается на полистирольную подложку (*6*), которая загружается на стеллаж (*7*). Такая схема налива пленкообразующего раствора реализуется последовательно для большого количества поддонов. Стеллаж с поддонами поступает в сушилку с конвекцией (*8*), где пленки формируются в течение 20–24 ч при температуре 30 ºС и относительной влажности воздуха 85 %. Снятие полученных пленок с поддона обеспечивается путем их складирования в стопки и далее – обертки в один слой из полипропиленовой пленки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наполнение композита на основе кукурузного крахмала, КМЦ и ПВС смесью пищевой добавки Е171 и экстракта эхинацеи пурпурной позволяет уменьшить его гидрофильность, улучшить механические свойства, придать антиоксидантную активность и УФ-барьерные свойства. Это позволяет рассматривать такие пленки, как перспективный упаковочный материал для пищевых продуктов. Равномерное распределение неорганического компонента в пленкообразующей композиции достигается в случае ее обработки ультразвуком. Представлена технологическая схема производства упаковочной пленки методом литья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Starch-based biodegradable plastics: methods of production, challenges and future perspective / L.V. Siqueira [et al.] // Current Opinion in Food Science. 2021. Vol. 38. P. 122–130. DOI: 10.1016/j.cofs.2020.10.020.

2. Impact of metal and metal oxide nanoparticles on functional and antimicrobial activity of starch nanocomposite film: A review / M. Navaf [et al.] // Measurement: Food. 2023. Vol. 11. 100099. DOI: 10.1016/j.meafoo.2023.100099.

3. Conductive drying of starch-fiber films prepared by tape casting: Drying rates and film properties / J.O. de Moraes [et al.] // LWT. 2015. Vol. 64. P. 356–366. DOI: 10.1016/J.LWT.2015.05.038.

4. Influence of extrusion process conditions on starch film morphology / P. González-Seligra [et al.] // LWT. 2017. Vol. 84. P. 520–528. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.06.027.

5. Effects of extrusion on starch molecular degradation, order–disorder structural transition and digestibility – A review / X. Huang [et al.] // Foods. 2022. Vol. 11. № 16. 2538. DOI: 10.3390/foods11162538.

6. Enhancement of resistant starch content in modified rice flour using extrusion technology / B. Gulzar [et al.] // Cereal Chemistry. 2021. Vol. 98. № 3. P. 634–641. DOI: 10.1002/cche.10407.

7. Waramboi J.G., Gidley M.J., Sopade P.A. Influence of extrusion on expansion, functional and digestibility properties of whole sweetpotato flour // LWT. 2014. Vol. 59. № 2. P. 1136–1145. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.06.016.

8. Jafari M., Koocheki A., Milani E. Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates // Journal of Cereal Science. 2017. Vol. 75. P. 324–331. DOI: 10.1016/j.jcs.2017.05.005.

9. Advances in conversion of natural biopolymers: A reactive extrusion (REX)–enzyme-combined strategy for starch/protein-based food processing / E. Xu [et al.] // Trends in Food Science and Technology. 2020. Vol. 99. P. 167–180. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.02.018.

10. Herniou-Julien C., Mendieta J.R., Guti´errez T.J. Characterization of biodegradable/non-compostable films made from cellulose acetate/corn starch blends processed under reactive extrusion conditions // Food Hydrocolloids. 2019. Vol. 89. P. 67–79. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.024.

11. In situ reactive compatibilization of polylactic acid (PLA) and thermoplastic starch (TPS) blends; synthesis and evaluation of extrusion blown films thereof / B. Palai [et al.] // Industrial Crops and Products. 2019. Vol. 141. № 11. 111748. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111748.

12. Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry / H. Cheng [et al.] // Trends in Food Science and Technology. 2021. Vol. 114. P. 70–82. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.05.017.

13. Effect of extrusion process on the functional properties of high amylose corn starch edible films and its application in mango (*Mangifera indica L.*) cv. Tommy Atkins / T.A.A. Calderón-Castro [et al.] // Journal of Food Science and Technology. 2018. Vol. 55. № 3. P. 905–914. DOI: 10.1007/s13197-017-2997-6.

14. Разработка технологии получения биоразлагаемых композиций на основе полиэтилена, крахмала и моноглицеридов / И.Ю. Васильев [и др.] // Тонкие химические технологии. 2020. Т. 15. № 6. С. 44–55. DOI: 10.32362/2410-6593-2020-15-6-44-55.

15. Comparative study of the physical and tensile properties of jicama (*Pachyrhizuserosus*) starch film prepared using three different methods / H. Abral [et al.] // Starch–Starke. 2019. Vol. 71. № 5–6. 1800224.

16. Способ получения биоразлагаемого композиционного материала на основе растительных биополимеров (варианты): пат. 2731695 Рос. Федерация № 2019139536; заявл. 03.12.2019; опубл. 08.09.2020, Бюл. № 25. 13 с.

17. Shahabi-Ghahfarrokhi I., Goudarzi V., Babaei-Ghazvini A. Production of starch based biopolymer by green photochemical reaction at different UV region as a food packaging material: Physicochemical characterization // International Journal of Biological Macromolecules. 2018. Vol. 122. P. 201–209. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.15.

18. Starch-based films: Major factors affecting their properties / R. Thakur [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2019. Vol. 132. P. 79–89. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190.

19. Light processable starch hydrogels / C. Noè [et al.] // Polymers. 2020. Vol. 12. № 6. P. 1359–1372. DOI: 10.3390/polym12061359.

20. ASTM E96/E96M–24a. Test methods for gravimetric determination of water vapor transmission rate of materials. West Conshohocken :ASTM, 2024. 6 p.

21. Разработка состава пленочных материалов на основе полисахаридов для пищевой упаковки / Т.В. Крюк [и др.] // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2024. Т. 17. № 4. С. 67–75.

22. Antioxidant, antidiabetic, and antihypertensive properties of *Echinacea purpurea* flower extract and caffeic acid derivatives using in vitro models / C. Shiow-Ying [et al.] // Journal of Medicinal Food. 2017. Vol. 20. № 2. P. 171–179. DOI: 10.1089/jmf.2016.3790.

23. Modification of physicochemical and thermal properties of starch films by incorporation of TiO_2 nanoparticles / S.A. Oleyaei [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2016. Vol. 89. P. 256–264. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.04.078.

24. Recent progress on titanium dioxide nanomaterials for photocatalytic applications / M. Nasr [et al.] // Chem Sus Chem. 2018. Vol. 11. № 18. P. 3023–3047. DOI: 10.1002/cssc.201800874.

25. Датчики цвета в «интеллектуальной упаковке» пищевых продуктов / Р.В. Крюк [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 2. С. 321–333. DOI: 10.21603/2074-9414-2022-2-2366.

26. Toughened and water-resistant starch/TiO_2 bionanocomposites as an environment-friendly food packaging material / J. Xiong [et al.] // Materials Research Express. 2019. Vol. 6. № 5. 055045. DOI: 10.1088/2053-1591/ab058b.

27. Recent advances and applications in starch for intelligent active food packaging: a review / D. Liu [et al.] // Foods. 2022. Vol. 11. № 18. 2879. DOI: 10.3390/foods11182879.

28. Pineapple peel extract incorporated poly(vinyl alcohol)-corn starch film for active food packaging: preparation, characterization and antioxidant activity / P. Kumar [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2021. Vol. 187. P. 223–231. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.07.136.

29. Gromovaya V.F., Shapoval G.S., Mironyuk I.E. Antiradical and antioxidant activity of biologically active carboxylic acids // Russian Journal of General Chemistry. 2002. Vol. 72. № 5. P. 774–777. DOI: 10.1023/A:1019520621409.

30. Evaluation of the specific migration according to EU standards of titanium from chitosan/metal complexes films containing TiO_2 particles into different food simulants. A comparative study of the nano-sized vs micro-sized particles / D. Enescu [et al.] // Food Packaging and

Shelf Life. 2020. Vol. 26. 100579. DOI: 10.1016/j.fpsl. 2020.100579.

31. Evaluating the antioxidant activity of ethanol extract from *Echinacea purpurea (L.) Moench* / A.P. Firzani [et al.] // Indonesian Journal of Biotechnology and Biodiversity. 2022. Vol. 6. № 2. P. 39–44. DOI: 10.47007/ijobb.v6i2.132.

32. Photochemically inert broad-spectrum sunscreen by metal-phenolic network coatings of titanium oxide nanoparticles / S. Choi [et al.] // ACS Applied Materials & Interfaces. 2024. Vol. 16. № 13. P. 16767–16777. DOI: 10.1021/acsami.4c00174.

Информация об авторах

Т. В. Крюк – кандидат химических наук, заместитель директора по научной работе Института физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко.

Е. Н. Труш – младший научный сотрудник молодежной лаборатории «Функциональные материалы на основе полисахаридов» Института физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко.

О. С. Попова – старший преподаватель кафедры «Таможенное дело и экспертиза товаров» Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского.

С. В. Пильгук – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология топлива» Донецкого национального технического университета.

Н. А. Романенко – младший научный сотрудник молодежной лаборатории «Функциональные материалы на основе полисахаридов» Института физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко.

REFERENCES

1. Siqueira, L.V., Arias, C.I.L.F., Maniglia, B.C. & Tadini, C.C. (2021). Starch-based biodegradable plastics: methods of production, challenges and future perspective. *Current Opinion in Food Science*, 38, 122-130. doi: 10.1016/j.cofs. 2020.10.020.

2. Navaf, M., Sunooj, K., Aaliya, B., Akhila, P.P., Sudheesh, C., Mir, S. & George, J. (2023). Impact of metal and metal oxide nanoparticles on functional and antimicrobial activity of starch nanocomposite film: A review. *Measurement: Food*, 11, 100099. doi: 10.1016/j.meafoo.2023.100099.

3. de Moraes, J.O., Scheibe, A.S., Augusto, B., Carciofi, M. & Laurindo, J.B. (2015). Conductive drying of starch-fiber films prepared by tape casting: Drying rates and film properties. *LWT*, 64, 356-366. doi: 10.1016/J.LWT.2015.05.038.

4. González-Seligra, P., Guz, L., Ochoa-Yepes, O., Goyanes, S. & Famá, L. (2017). Influence of extrusion process conditions on starch film morphology, *LWT*, 84, 520-528. doi: 10.1016/j.lwt.2017.06.027.

5. Huang, X., Liu, H., Ma, Y., Mai, S. & Li, C. (2022). Effects of extrusion on starch molecular degradation, order-disorder structural transition and digestibility - A review. *Foods*, vol. 11(16), 2538. doi: 10.3390/foods11162538.

6. Gulzar, B., Hussain, S.Z., Naseer, B. & Naik, H.R. (2021). Enhancement of resistant starch content in modified rice flour using extrusion technology. *Cereal Chemistry*, 98(3), 634-641. doi: 10.1002/cche.10407.

7. Waramboi, J.G., Gidley, M.J. & Sopade, P.A. (2014). Influence of extrusion on expansion, functional and digestibility properties of whole sweet potato flour. *LWT*, 59(2), 1136-1145. doi: 10.1016/j.lwt.2014.06.016.

8. Jafari, M., Koocheki, A. & Milani, E. (2017). Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates.*Journal of Cereal Science*, 75, 324-331. doi: 10.1016/j.jcs.2017.05.005.

9. Xu, E., Campanella, O.H., Ye, X., Jin, Z., Liu, D. & BeMiller, J.N. (2020). Advances in conversion of natural biopolymers: A reactive extrusion (REX)-enzyme-combined strategy for starch/protein-based food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 167-180. doi: 10.1016/j.tifs.2020.02.018.

10. Herniou-Julien, C., Mendieta, J.R. & Guti´errez, T.J. (2019). Characterization of biodegradable/non-compostable films made from cellulose acetate/corn starch blends processed under reactive extrusion conditions. *Food Hydrocolloids*, 89, 67-79. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.024.

11. Palai, B., Biswal, M., Mohanty, S. & Nayak, S.K. (2019). In situ reactive compatibilization of polylactic acid (PLA) and thermoplastic starch (TPS) blends; synthesis and evaluation of extrusion blown films thereof. *Industrial Crops and Products*, 141(11), 111748. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111748.

12. Cheng, H., Chen, L., McClements, D.J., Yang, T., Zhang, Z., Ren, F., Miao, M., Tian, Y. & Jin, Z. (2021). Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 70-82. doi: 10.1016/j.tifs. 2021.05.017.

13. Calderón-Castro, T.A.A., Vega-García, M.O., Zazueta-Morales, J.J., Fitch-Vargas, P.R., Carrillo-López, A., Gutiérrez-Dorado, R., Limón-Valenzuela, V. & Aguilar-Palazuelos, E. (2018). Effect of extrusion process on the functional properties of high amylose corn starch edible films and its application in mango (*Mangifera indica L.*)cv Tommy Atkins. *Journal of Food Science and Technology*, 55(3), 905-914. doi: 10.1007/s13197-017-2997-6.

14. Vasiliev, I.Yu., Ananiev, V.V., Kolpakova, V.V. & Sarjveladze, A.S. (2020). Development of technology for obtaining biodegradable compositions based on polyethylene, starch and monoglycerides. *Fine chemical technologies*, 15(6), 44-55. doi: 10.32362/2410-6593-2020-15-6-44-55. (In Russ.).

15. Abral, H., Soni Satria, R., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Affi, J., Asrofi, M., Handayani, D., Sapuan, S.M., Stephane, I., Sugiarti, E. & Muslimin, A.N. (2019). Comparative study of the physical and tensile properties of jicama (*Pachyrhizuserosus*) starch film prepared using three different methods. *Starch–Stärke*, 71(5-6), 1800224. doi: 10.1002/star.201800224.

16. Potoroko, I.Yu., Malinin, A.V., Tsaturov, A.V., Naumenko, N.V. & Kalinina, I.V. (2020). Method for obtaining biodegradable composite material based on plant biopolymers (variants). *Pat. 2731695. Russian Federation, published on 08.09.2020*. Bull. No. 25. (In Russ.).

17. Shahabi-Ghahfarrokhi, I., Goudarzi, V. & Babaei-Ghazvini, A. (2018). Production of starch based biopolymer by green photochemical reaction at different UV region as a food packaging material: Physicochemical characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122, 201-209. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.15.

18. Thakur, R., Pristijono, P., Scarlett, C.J., Bowyer, M., Singh, S.P. & Vuong, Q.V. (2019). Starch-based

films: Major factors affecting their properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 79-89. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190.

19. Noè, C., Tonda-Turo, C., Chiappone, A., Sangermano, M. & Hakkarainen, M. (2020). Light processable starch hydrogels. *Polymers*, 2(6), 1359-1372. doi: 10.3390/polym12061359.

20. Test methods for gravimetric determination of water vapor transmission rate of materials. (2023). ASTM E96/E96M-23. West Conshohocken: ASTM.

21. Kryuk, T.V., Popova, O.S., Tyurina, T.G., Siversky, A.V. & Romanenko, N.A. (2024). Development of film materials composition based on polysaccharides for food packaging. *Food Industry: Science and Technologies*, 17(4), 67-75. (In Russ.).

22. Chiou, S.Y., Sung, J.M., Huang, P.W. & Lin, S.D. (2017). Antioxidant, antidiabetic, and antihypertensive properties of *Echinacea purpurea* flower extract and caffeic acid derivatives using in vitro models. *Journal of Medicinal Food*, 20(2), 171-179. doi: 10.1089/jmf.2016.3790.

23. Oleyaei, S.A., Zahedi, Y., Ghanbarzadeh, B. & Moayedi, A.A. (2016). Modification of physicochemical and thermal properties of starch films by incorporation of TiO2 nanoparticles. *International journal of biological macromolecules*, 89, 256-264. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2016.04.078.

24. Nasr, M., Eid, C., Habchi, R., Miele, P. & Bechelany, M. (2018). Recent progress on titanium dioxide nanomaterials for photocatalytic applications. *Chem Sus Chem*, 11(18), 3023-3047. doi: 10.1002/cssc.201800874.

25. Kryuk, R.V., Kurbanova, M.G., Kolbina, A.Yu., Plotnikov, K.B., Plotnikov, I.B., Petrov, A.N. & Khelef, E.A.M. (2022). Color sensors in smart food packaging. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(2), 321-333. doi: 10.21603/2074-9414-2022-2-2366. (In Russ.).

26. Xiong, J., Sheng, C., Wang, Q. & Guo, W. (2019). Toughened and water-resistant starch/TiO_2 bionanocomposites as an environment-friendly food packaging material. *Materials Research Express*, 6(5), 055045. doi: 10.1088/2053-1591/ab058b.

27. Liu, D., Zhao, P., Chen, J., Yan, Y. & Wu, Z. (2022). Recent advances and applications in starch for intelligent active food packaging: A review. *Foods*, 11(18), 2879. doi: 10.3390/foods11182879.

28. Kumar, P., Tanwar, R., Gupta, V., Upadhyay, A., Kumar, A. & Gaikwad, K.K. (2021). Pineapple peel extract incorporated poly (vinyl alcohol)-corn starch film for active food packaging: Preparation, characterization and antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 223-231. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.07.136.

29. Gromovaya, V.F. Shapoval, G.S. & Mironyuk, I.E. (2002). Antiradical and antioxidant activity of biologically active carboxylic acids. *Russian Journal of General Chemistry*, 72(5), 774-777. doi: 10.1023/A:1019520621409.

30. Enescu, D., Dehelean, A., Gonçalves, C., Cerqueira, M.A., Magdas, D.A., Fucinos, P. & Pastrana, L.M. (2020). Evaluation of the specific migration according to EU standards of titanium from chitosan/metal complexes films containing TiO_2 particles into different food simulants. A comparative study of the nano-sized vs micro-sized particles. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100579. doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100579.

31. Arifin, P.F., Assa, T.I., Nora, A. & Wisastra, R. (2022). Evaluating the antioxidant activity of ethanol extract from *Echinacea purpurea (L.) Moench*. *Indonesian Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 6(2), 39-44. doi: 10.47007/ijobb.v6i2.132.

32. Choi, S., Rahman, R.T., Kim, B.M., Kang, J., Kim, J., Shim, J. & Nam, Y.S. (2024). Photochemically inert broad-spectrum sunscreen by metal-phenolic network coatings of titanium oxide nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(13), 16767-16777. doi: 10.1021/acsami.4c00174.

Information about the authors

T.V. Kryuk - Candidate of Chemical Sciences, Deputy Director for Scientific Work of the L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry.

E.N. Trush - Junior research fellow of the youth laboratory "Functional materials based on polysaccharides" of the L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry.

O.S. Popova - Senior Lecturer of the Department "Customs Affairs and Goods Expertise" of the Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky.

S.V. Pilhuk - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Chemical Fuel Technology" of the Donetsk National Technical University.

N.A. Romanenko - Junior research fellow of the youth laboratory "Functional materials based on polysaccharides" of the L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 111–122.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 111–122.

Обзорная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.644.7
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.015 EDN: XYSXRO

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ РАСТВОРИМЫХ ПИЩЕВЫХ ВОЛОКОН СЕМЯН ЛЬНА В СОСТАВ МУЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Дмитрий Павлович Ефремов [1], Ирина Михайловна Жаркова [2]

[1] ООО «АгроЛен», Алтайский край, Россия
[1] smkaltai@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6234-8174
[2] Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия
[2] zharkova.i@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0001-8662-4559

Аннотация. *О важности включения в рацион питания продуктов, служащих источниками пищевых волокон, в том числе растворимых, свидетельствуют рекомендации диетологов. При этом проблема состоит в необходимости комплексного подхода к введению их в пищевые матрицы, учитывающего одновременно функционально-технологические свойства и медико-биологическое воздействие.*

Цель работы – обобщение и анализ основных результатов исследований, объясняющих рост популярности растворимых пищевых волокон льняного семени в качестве ингредиента пищевых продуктов, поиск наиболее предпочтительных технологических решений, позволяющих максимально эффективно раскрыть их потенциал.

Поиск информации вели по библиографическим базам «PubMed» и eLIBRARY с применением ключевых слов: «семена льна», «soluble dietary fiber of flax seeds» во временном диапазоне с 2000 по 2026 год. В исключительных случаях рассматривали статьи более раннего периода опубликования. Обработку информации осуществляли с помощью общепринятых методов (анализ, систематизация, обобщение).

Несмотря на обилие информации, касающейся разработки пищевых продуктов с включением растворимых пищевых волокон семян льна, нельзя сказать, что все технологические и диетологические вопросы полностью решены. Актуально продолжение исследований, связанных с изучением влияния сортовых особенностей льна, почвенно-климатических условий выращивания, технологии переработки на количество, состав и свойства растворимых пищевых волокон. Отдельного внимания заслуживают исследования, направленные на поиск наиболее эффективных способов введения растворимых пищевых волокон в разнообразные пищевые матрицы с подтверждением в клинических условиях возможностей профилактики и/или лечения социально-значимых заболеваний.

Ключевые слова: *семена льна, растворимые пищевые волокна, полисахаридный комплекс, технологические свойства, биологическая эффективность.*

Благодарности: *Исследование выполнено в рамках внутренней НИР ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий».*

Для цитирования: Ефремов Д. П., Жаркова И. М. Теоретическое обоснование целесообразности включения растворимых пищевых волокон семян льна в состав мучных изделий // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 111–122. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.015. EDN: https://elibrary.ru/XYSXRO.

Review article

THEORETICAL JUSTIFICATION OF FEASIBILITY OF INCLUDE SOLUBLE FLAX SEED FIBER IN COMPOSITION OF FLOUR PRODUCTS

Dmitry P. Efremov [2], Irina M. Zharkova [3]

[1] LLC "AgroLen", Altai Region, Russia
[1] smkaltai@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6234-8174
[2] Voronezh state university of engineering technologies, Voronezh, Russia
[2] zharkova.i@vsuet.ru, https://orcid.org/0000-0001-8662-4559

Abstract. *Nutritionists recommend incorporating foods that provide dietary fiber, including soluble fiber, into the diet. However, a comprehensive approach to incorporating these foods into food matrices is essential, taking into account both their functional and technological properties and their biomedical effects.*

The aim of this study is to summarize and analyze key research findings explaining the growing popularity of soluble flaxseed fiber as a food ingredient and to identify the most suitable technological solutions to maximize its potential.

© Ефремов Д. П., Жаркова И. М., 2026

The search was conducted in the Pub Med and eLIBRARY bibliographic databases using the keywords "flax seeds" and "soluble dietary fiber of flax seeds" for the period from 2000 to 2026. In exceptional cases, articles from earlier publication periods were considered. Information was processed using generally accepted methods (analysis, systematization, and generalization). Despite the abundance of information regarding the development of food products incorporating soluble flaxseed fiber, it cannot be said that all technological and nutritional issues have been fully resolved. Continued research is needed to understand the impact of flaxseed variety characteristics, soil and climate conditions, and processing technology on the quantity, composition, and properties of soluble fiber. Research aimed at identifying the most effective methods for introducing soluble fiber into a variety of food matrices, with clinical validation of the potential for preventing and/or treating socially significant diseases, deserves special attention.

Keywords: *flax seeds, soluble dietary fiber, polysaccharide complex, technological properties, biological efficiency.*

Acknowledgements: *The research was carried out within the framework of the internal research of the Voronezh State University of Engineering Technologies.*

For citation: Efremov, D. P., Zharkova, I. M. (2026). Theoretical justification of feasibility of include soluble flax seed fiber in composition of flour products. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 111-122. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.015. EDN: https: //elibrary.ru/XYSXRO.

ВВЕДЕНИЕ

Значение семян льна масличного и продуктов их переработки для поддержания здоровья и активного долголетия человека переоценить невозможно [1, 2]. Оно выражается в профилактике сахарного диабета [3–5], рака [6], снижении индекса ожирения и улучшении видового состава микробиоты кишечника [7], активации защитных эффектов против неалкогольной жировой болезни печени [8], облегчении некоторых симптомов перименопаузы [9]. В сочетании с традиционной медициной льняное семя может служить эффективным средством лечения гипертонии [10].

Такой широкий спектр положительного воздействия на организм человека обусловлен наличием в семенах льна большого разнообразия нутриентов, обладающих биологически активными свойствами. В этой связи, в первую очередь, необходимо назвать компоненты липидного комплекса [4, 11–18], белки [5, 19–21], лигнаны [12, 22–28], в т.ч. секоизоларицирезинол дигликозид [19, 22, 24, 26, 29, 30], клетчатку [2, 3, 24, 31]. Наряду с клетчаткой, которая представляет собой нерастворимое пищевое волокно, в семенах льна содержатся и растворимые пищевые волокна (РПВ), которые, в свою очередь, являются компонентом «двойного назначения», поскольку проявляют свойства, значимые для производства пищевых продуктов с технологической точки зрения, а для потребителей – значимые с медико-биологической точки зрения.

О важности включения в рацион питания разнообразных продуктов, служащих источниками пищевых волокон (по определению Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов (EFSA), «пищевые волокна» – это неперевариваемые углеводы плюс лигнин), свидетельствуют рекомендации диетологов, в том числе направленные на разработку более простых методов учета их потребления, например, приложения для мобильного телефона [32].

Согласно определению Codex Alimentarius, к пищевым волокнам относят съедобные углеводные полимеры, состоящие из трех и более мономерных единиц, устойчивые к действию эндогенных пищеварительных ферментов, т.е., не гидролизующиеся и не всасывающиеся в тонком кишечнике [33].

В научно-технической литературе используют термины «растворимые» и «нерастворимые» пищевые волокна, однако в диетологическом смысле такого различия не делают, и рекомендации ФАО/ВОЗ касаются потребления пищевых волокон в целом, на уровне 25 г [34] или 20–25 г в сутки [35] для взрослого человека.

Цель работы – обобщение и анализ основных результатов исследований, объясняющих рост популярности растворимых пищевых волокон льняного семени в качестве ингредиента пищевых продуктов, поиск наиболее предпочтительных технологических решений, позволяющих максимально эффективно раскрыть их потенциал.

МЕТОДЫ

Поиск научной информации вели по библиографическим базам «PubMed» и eLIBRARY с применением ключевых слов: «семена льна», «soluble dietary fiber of flax seeds», временной диапазон опубликования результатов исследований – с 2000 по 2026 год. В исключительных случаях рассматривали статьи более раннего периода опубликования. Обработку информации осуществляли с помощью общепринятых аналитических методов, таких как анализ, систематизация и обобщение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Биологическое значение растворимых пищевых волокон.

В организме человека отсутствуют пищеварительные ферменты, способные гидролизовать растворимые пищевые волокна. Растворимые пищевые волокна, попадая в толстую кишку, оказываются в зоне воздействия ферментов кишечных бактерии, расщепляющих их на олигосахариды или моносахариды, которые затем используются бактериями в качестве основного источника углерода и энергии [36–38]. Это возможно благодаря тому, что бактерии, обитающие в кишечнике человека, содержат около 130 семейств гликозид-гидролаз 22 семейства полисахарид-лиаз и 16 семейств углеводных эстераз, обеспечивающих микробиоте гибкость при переходе с одного источника энергии из пищевых волокон на другой [39].

То есть растворимые пищевые волокна обладают пребиотическим действием, увеличивая количество полезных бактерий и улучшая кишечную среду [38]. Образующиеся при этом продукты метаболизма (в основном короткоцепочечные жирные кислоты) обеспечивают множество преимуществ для здоровья человека, таких как снижение риска желудочно-кишечных заболеваний, включая синдром раздраженного кишечника, дивертикулярная болезнь, функциональный запор и др. [36].

Lai K.W. с соавт. продемонстрировали пребиотический потенциал растворимых пищевых волокон семян льна и чиа [40]: растворимые пищевые волокна семян льна более устойчивы к гидролизу кислотой и панкреатином, их относительная пребиотическая

ценность составила 98 %, что выше, чем у коммерческих пребиотиков, включая инулин, фруктоолигосахариды и изомальтоолигосахариды. Результаты показали также, что льняная слизь частично переваривается в желудочно-кишечном тракте и способствует росту L. rhamnosus GG.

Целенаправленное регулирование и контроль постпрандиальных гликемических показателей имеют решающее значение для профилактики и лечения диабета. Описаны некоторые механизмы действия растворимых пищевых волокон, от повышения вязкости химуса до образования короткоцепочечных жирных кислот в результате ферментации, которые стимулируют моторику желудочно-кишечного тракта и высвобождение гормонов GLP-1 и PYY. Постпрандиальная гликемическая реакция, вызванная употреблением инулина и резистентного крахмала, хорошо изучена. Активно исследуется возможность контроля уровня глюкозы в крови с помощью камедей, β-глюкана, псиллиума, арабиноксилана, растворимых кукурузных волокон, резистентного мальтодекстрина, глюкоманнана [41].

Следует отметить, что среди растворимых пищевых волокон выделяют две группы: невязкие и вязкие или гелеобразующие. К первой группе относят, например, инулин, а ко второй – слизи семян подорожника, чиа и льна.

Благодаря большой молекулярной массе и высокой гидрофильности вязкие растворимые пищевые волокна (β-глюкан, пектины, камеди) могут растворяться в воде и образовывать студенистую структуру [33]. β-глюкан состоит из D-глюкозы, связанной β-гликозидной связью; пектин в основном состоит из D-галактуроновых кислот, связанных α-1,4-гликозидной связью, и содержит небольшое количество рамнозы, арабинозы и галактозы; камеди – высокомолекулярные углеводы, которые при низких концентрациях могут соединяться с водой с образованием гелей.

Доказано, что потребление вязких растворимых пищевых волокон замедляет гидролиз высококалорийных питательных веществ (крахмал и триглицериды) и всасывание продуктов гидролиза в тонком кишечнике. То есть растворимые пищевые волокна могут значительно замедлить общее потребление энергии, а также глюкозы и холестерина, поэтому они снижают риск развития ожирения, сахарного диабета 2 типа, гиперлипидемии [36].

Растворимые пищевые волокна, способные увеличивать вязкость продукта или вязкость химуса, способны замедлять, но не снижать общее всасывание питательных веществ, которое может происходить по всему тонкому кишечнику [42].

Вязкие растворимые пищевые волокна способствуют повышению усвояемости минеральных веществ, благодаря своей способности связывать ионы металлов (кальций, магний, железо, медь и цинк) и, таким образом, транспортировать их в дистальный отдел толстой кишки, где они высвобождаются под действием ферментов кишечных бактерий. Высвободившиеся ионы металлов помогают организму сопротивляться действию патогенов, способствуют увеличению разнообразия кишечного бактериального сообщества и защите кишечника от инфекции [43]. Кроме того, короткоцепочечные жирные кислоты, вырабатываемые кишечными бактериями при ферментации растворимых пищевых волокон, образуют с высвободившимися металлами соли, которые хорошо всасываются толстой кишкой [44, 45].

Семена льна привлекают к себе все больше внимания научного сообщества также благодаря наличию в составе растворимых полисахаридов универсального полисахарида рамногалактуронана [46]. Другой их компонент – арабиноксилан, способствует улучшению метаболизма глюкозы и инсулина [47, 48]. Для обеспечения значимого эффекта рекомендуется потребление 8 г арабиноксилана в день [49].

На примере введения растворимых пищевых волокон семян льна в сахаросодержащий продукт из аффинированного желтого сахара авторы [50] показали возможность снижения гликемического индекса продукта на 29 %; в эксперименте с тест-организмами P.caudatum наблюдали повышение их стресс-устойчивости на 40 %. Данный эффект служит подтверждением того, что комплекс растворимых пищевых волокон семян льна обладает выраженными протекторными свойствами и способен проявлять защитное действие, способствуя сохранению структуры и функциональной активности ДНК, полиненасыщенных жирных кислот в мембранных липидах, функциональной активности белков, липидов клеточных мембран и липопротеидов.

Технологическое значение растворимых пищевых волокон.

Среди важнейших функционально-технологических свойств растворимых пищевых волокон можно назвать водоудерживающую, эмульгирующую, гелеобразующую, пенообразующую и стабилизирующую способности, а также способность влиять на вязкость продукта [51], его текстуру [52–55], скорость ретроградации крахмала [52, 55–57]. Установлено, что растворимые пищевые волокна, вступая в химические взаимодействия с веществами других классов, могут существенно изменять их свойства. Так, в исследовании [58] показано, что в результате реакции между растворимыми пищевыми волокнами плодов шелковицы и сывороточными белками происходит увеличение эмульгирующей способности последних, в том числе повышается стабильность эмульсии.

Sempio R. с соавт. показали, что добавление водорастворимого пищевого волокна – арабиноксилана из кукурузы к комбинации кукурузного резистентного крахмала типа IV и целлюлозы позволяет получить пшеничный хлеб при максимальном сохранении традиционных потребительских характеристик [59]. При этом оптимальная дозировка пищевых волокон составила (% от массы муки в тесте): резистентный крахмал FibersymRW – 40, целлюлоза VitacelL600-30 – 11 и арабиноксилан AgriFiberSFC – 2 при добавлении пшеничной клейковины из расчета обеспечения ее количества на уровне контрольного образца теста (без пищевых волокон). Такая комбинация нерастворимых неферментируемых (целлюлозы), нерастворимых ферментируемых (резистентный крахмал IV типа) и растворимых ферментируемых (арабиноксилана) пищевых волокон обладает более приемлемыми технологическими характеристиками для введения в рецептуру пшеничного хлеба, чем каждый из компонентов по отдельности, т.е. при таком варианте можно достичь более значимого эффекта обогащения продукции пищевыми волокнами (в порции хлеба 50 г содержится количество пищевых волокон, равное 15 % от суточной потребности в них взрослого человека).

Другой представитель растворимых пищевых волокон – арабиногалактан, имеет статус пищевой добавки, относящейся к загустителям, желирующим агентам и стабилизаторам консистенции. Меренко-

вой С.П. и Девяткиным Д.И. показана эффективность применения арабиногалактана в дозировке 2,5 % для нивелирования ухудшающего влияния высоких дозировок муки масличных культур (10 % соевой, льняной или конопляной муки) на свойства теста и качество хлеба [60]. Отмечена интенсификация ферментативных процессов на этапе брожения полуфабрикатов, что способствует более активному росту кислотности. В результате возможно сокращение продолжительности брожения теста на 11,8–23,5 % при хорошо развитой структуре клейковинного каркаса, позволяющего получить хлеб с хорошей пористостью пластичного мякиша.

Поскольку многочисленные представители растительных растворимых пищевых волокон существенно отличаются друг от друга по составу моноз и видам их связей, то весьма разнообразны их технологические и биологические свойства [61].

Отдельного внимания заслуживают растворимые пищевые волокна семян льна (слизь). Многочисленные исследования, проведенные в разных странах мира, свидетельствуют об их высоком потенциале как технологического компонента (загустителя, стабилизатора, влагоудерживающего агента) [57, 62–66] и как функционального ингредиента [64, 67, 68].

Сроки годности мучных изделий во многом определяются скоростью ретроградации крахмала. Известно, что введение в рецептуру гидроколлоидов, например гуаровой камеди, позволяет замедлить ретроградацию крахмала. Yang X. с соавт. исследовали эффективность растворимых пищевых волокон семян льна (порошок, чистота 99,8 %) для замедления ретроградации кукурузного крахмала [69]. Установлено, что чем выше дозировка растворимых пищевых волокон семян льна, тем значительнее эффект торможения ретроградации крахмала, при этом увеличение дозировки волокон свыше 0,4 % не целесообразно. Механизм наблюдаемого эффекта авторы объясняют тем, что растворимые пищевые волокна семян льна снижают относительную кристалличность, увеличивают подвижность воды и изменяет сетевую структуру гелей кукурузного крахмала. Это достигается за счет образования водородных связей между растворимыми пищевыми волокнами семян льна и кукурузным крахмалом, которые препятствуют потере воды и перекристаллизации крахмала. Кроме того, растворимые пищевые волокна семян льна обволакивают гранулы крахмала и изменяют распределение воды в смесях крахмал–волокна, препятствуя перекристаллизации амилозы и амилопектина, повышению подвижности воды при уменьшении ее потерь [69].

Feng M. с соавт. продолжили предыдущее исследование и проанализировали образцы модельных образцов гелей из кукурузного крахмала и порошка растворимых полисахаридов семян льна в дозировке до 0,4 % в процессе хранения при температурах от –20 ºС до +20 ºС [70]. Отмечена практически полная остановка ретроградации крахмала при температуре хранения –20 ºС, но при этом гели характеризовались наибольшей твердостью. Наибольшая ретроградация гелей при самой высокой скорости перекристаллизации была отмечена при температуре хранения +4 ºС. Самую мягкую текстуру имели гели, хранившиеся при +20 ºС, степень ретроградации в них была ниже, чем у гелей, хранившихся при +4 ºС.

Яковлевой А.А. с соавт. изучены функционально-технологические свойства растворимых пищевых волокон в составе полисахаридного комплекса из семян льна сорта ЛМ-98: водоудерживающая способность составила 15 г/г, а жироудерживающая – 1,0 г/г [71]. На модели водной эмульсии из изолята горохового белка и полисахаридного комплекса авторы продемонстрировали способность последнего к агрегации белков.

Состав и строение растворимых пищевых волокон семян льна.

Содержание пищевых волокон в семенах льна составляет в среднем 29 г/100 г, из которых 25 % приходится на растворимые волокна, а 75 % – на нерастворимые волокна [2]. По данным [72], соотношение растворимых и нерастворимых пищевых волокон в семенах льна может колебаться в интервале от 20:80 до 40:60. Состав растворимых пищевых волокон неоднороден: компоненты имеют разную структуру, что наряду с внешними факторами (температура, активная кислотность среды) оказывает влияние на их растворимость [36]. Растворимые пищевые волокна, образующие льняную слизь, состоят из галактуроновой кислоты (21–36 %), ксилозы (19–38 %), рамнозы (11–16 %), галактозы (12–16 %), арабинозы (8–13 %) и глюкозы (4–6 %) [73, 74]. В обобщенном виде их характеристика представлена на рисунке 1 [75–79].

Растворимые пищевые волокна семян льна состоят из двух полисахаридных фракций: кислой (галактуроновые кислоты) и нейтральной (галактоглюканы и арабиноксиланы). Они содержат цепи из чередующихся остатков D-галактуроновой кислоты, L-рамнозы и D-арабинозы, к которым присоединены боковые цепи, состоящие из остатков 3-О-метил-D-галактозы, D-галактозы, L-рамнозы и D-ксилозы, а также 4-О-метил-D-глюкуроновой кислоты. Растворимые пищевые волокна семян льна образуют комплексы с белками (их доля порядка 5 %), что влияет на их реологические свойства [46].

Наличие в составе льняной слизи арабинозы и ксилозы свидетельствует о присутствии арабиноксилана, а наличие рамнозы и галактуроновой кислоты – о присутствии рамногалактуронана I, в структуру боковых цепей которого могут входить имеющиеся в составе слизи галактоза и фукоза [80].

Соотношение рамнозы и галактуроновой кислоты в рамногалактуронане, по данным Elboutachfaiti R., находится в диапазоне от 1,22 до 0,85, т.е. близко к единице, что свидетельствует о его монодисперсной природе [81].

Количество растворимых пищевых волокон в семенах льна зависит от сорта и условий выращивания. Яковлевой А.А. с соавт. исследованы 6 отечественных сортов льна-долгунца и льна масличного: содержание растворимых пищевых волокон находилось в диапазоне от 2,45 % до 4,64 %, т.е. различалось почти в 2 раза [82]. Авторами также установлено, что при наличии в составе растворимых пищевых волокон более 50 % высокомолекулярной фракции меняется организация их пространственной структуры: в ней появляется тройная спиральная конформация цепи. Полисахариды с тройной спиральной конформацией активно исследуются при разработке устойчивых «зеленых» биополимеров в области пищевых и биологических наук [83].

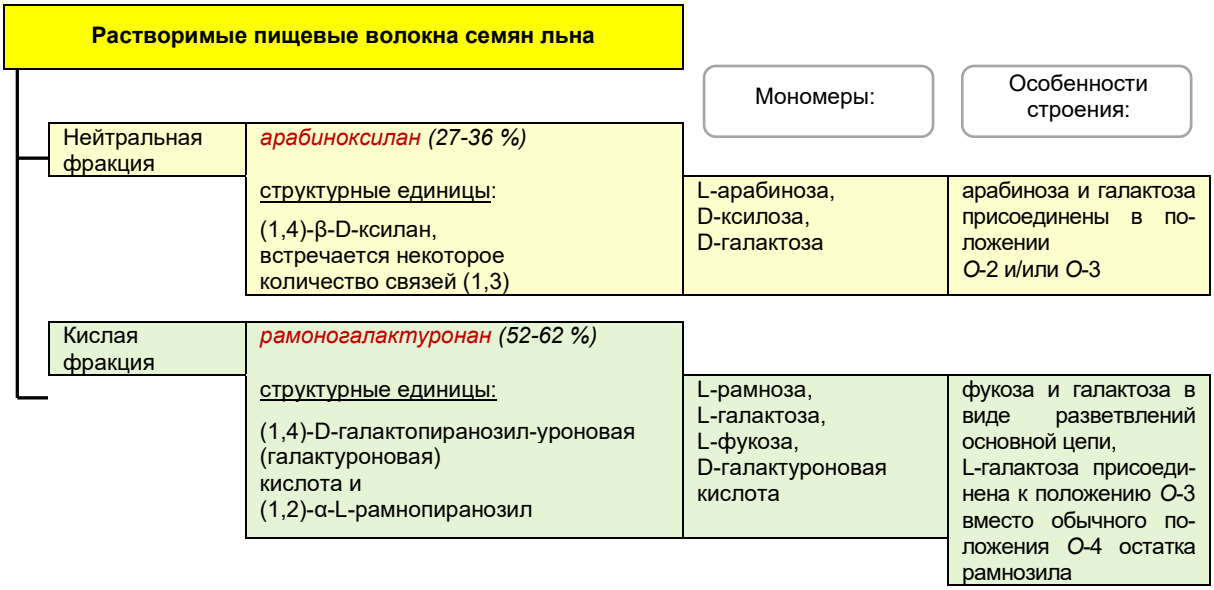


Рисунок 1 – Типичный состав растворимых пищевых волокон семян льна [75–79]
Figure 1 – Typical soluble dietary fiber composition of flaxseed [75–79]

Способы получения растворимых пищевых волокон семян льна.

Растворимые пищевые волокна семян льна являются компонентом так называемых слизей, которые продуцируются внешними клеточными слоями семенных оболочек [84]. Извлекают их, как правило, в виде полисахаридных комплексов, содержащих сопутствующие вещества (белки, лигнаны, минеральные вещества).

В России и за рубежом разработано и запатентовано большое количество способов извлечения растворимых пищевых волокон из семян льна с получением самостоятельного коммерчески привлекательного ингредиента, обладающего свойствами стабилизатора, эмульгатора и пенообразователя. При всем многообразии обосновываемых авторами рациональных технологических режимов все способы сводятся к нескольким основным операциям: перевод пищевых волокон в раствор, отделение гидратированных волокон от массы семян с последующей сушкой или извлечением путем осаждения. Способы различаются выбором растворителя (питьевая вода, дистиллированная вода; pH 2-7), гидромодулем (1:5 – 1:30), температурой экстракции (18–100 ºС) и ее продолжительностью (1–10 ч), способом отделения растворенных пищевых волокон от семян (центрифугирование, фильтрация через фильтр, в том числе вакуумная, декантация), способом осаждения (этиловый спирт и его количество), способом сушки (распылительная, вакуумная, лиофильная) [80, 85–88]. Для повышения эффективности экстракции осуществляют перемешивание массы, возможно применение ультразвуковой обработки [84, 89], механических колебаний (продолжительность экстракции сокращается до 14–16 мин.) [90], обработки микроволновым излучением [84]. В работе [91] предложено смесь семян льна с водой (гидромодуль 1:10) подвергнуть кипячению в течение 15 мин., а отделенный экстракт лиофильно высушить.

В способе [85], предусматривающем экстрагирование растворимых пищевых волокон водой (предпочтительно дистиллированной) в течение 1 ч при гидромодуле 1:20 и температуре 40 ºС с целью снижения затрат на высушивание отделенного от семян экстракта, предложено предварительно концентрировать экстракт на роторном испарителе при температуре 40 ºС до 1/3 объема и после этого направлять в распылительную сушилку.

Хариной М.В. с соавт. доказано, что экстрагирование растворимых пищевых волокон в дистиллированной воде при гидромодуле 1:8 позволяет достичь максимальной эффективности процесса: содержание сухих веществ в экстракте составляет 2,10±0,03 %, что соответствует 1,47±0,02 % от массы семян льна, при этом сухие вещества экстракта содержат 87,93±2,47 % углеводов, а также фенольные вещества и белки [80]. Мономерный состав углеводов в продукте, полученном данным способом из семян льна сорта Могилевский, представлен фукозой, рамнозой, арабинозой, галактозой, глюкозой, ксилозой, галактуроновой и глюкуроновой кислотами. Также авторы установили, что мономерный состав растворимых пищевых волокон практически сохраняется при лиофильной сушке экстракта.

Перечисленными методами получить растворимые пищевые волокна полностью очищенными от сопутствующих веществ (в т.ч. белков) не удается. Белки образуют нековалентные связи с компонентами кислой фракции растворимых полисахаридов семян льна, и их количество в конечном продукте может колебаться в широких пределах (от 5 до 60 %) в зависимости от условий проведения экстракции [92, 93].

Миневич И.Э. с соавт. запатентован способ извлечения растворимых пищевых волокон из семян льна в виде полисахаридного комплекса [85]. Данный способ предусматривает водную экстракцию растворимых пищевых волокон, отделение экстракта от семян, его концентрирование и сушку полисахаридного комплекса.

Технологические свойства растворимых пищевых волокон семян льна, а точнее продукта, содержащего их комплекс с сопутствующими компонентами, зависят в основном от соотношения между фракциями пищевых волокон и от количества присоединенных белков. Известно, что поверхностная активность и эмульгирующая способность растворимых пищевых волокон семян льна обусловлены наличием связанных с ними белков [94].

Опыт использования растворимых пищевых волокон семян льна в технологии мучных изделий.

Бойцовой Т.М. с соавт. запатентован способ производства хлебобулочных изделий, предусматривающий внесение на стадии приготовления теста из смеси ржаной и пшеничной муки на большой густой ржаной закваске полуфабриката из растительного сырья. При этом полуфабрикат из растительного сырья готовят путем настаивания в течение 70–90 мин. семян льна в воде при гидромодуле 1:20 и температуре 65–70 ºС, а затем разбавляют питьевой водой при соотношении настой: вода 70:30 – 100:0. Дозировка настоя составляет 29,4–42 кг/100 кг готового продукта, т.е. 1,4–2,0 кг семян льна в 100 кг хлебобулочного изделия [46]. Благодаря наличию в настое альбуминовой фракции белков и минеральных веществ, активизируется технологическая микрофлора в тесте, что в конечном итоге приводит к сокращению цикла производства ржано-пшеничного хлеба на закваске 1,5 ч или на 30 %. Однако достичь существенного обогащения конечного продукта растворимыми пищевыми волокнами невозможно из-за высокого гидромодуля при приготовлении настоя и дополнительного разбавления его водой перед внесением в тесто.

Хариной М.В. с соавт. запатентован способ производства хлебобулочных изделий при включении в состав их рецептуры высушенной слизи семян льна [80]. При этом высушенная слизь семян льна представляет собой комплекс растворимых пищевых волокон, содержащий в своем составе 1,5–2,25 % белков. Авторы рекомендуют вносить такой ингредиент при замесе теста для пшеничных и ржано-пшеничных хлебобулочных изделий в дозировке от 0,5 до 2,5 % от массы муки. В результате изменяются свойства теста (улучшается газообразующая и газоудерживающая способности, сокращается продолжительность брожения до достижения заданной кислотности), повышается пористость мякиша хлеба. Причем в пшеничном тесте авторы отмечают изменения более значимые, чем в ржано-пшеничном тесте. Благодаря введению в рецептуру пшеничного хлеба растворимых пищевых волокон семян льна снижаются затраты энергии на деформацию кусочка хлеба во рту до состояния, пригодного для проглатывания (разжевываемость продукта) на 12,5 и 50,0 % соответственно. В случае ржано-пшеничного хлеба разжевываемость облегчается на 33,3 и 44,4 % соответственно (по сравнению с хлебом без растворимых пищевых волокон семян льна) [80].

Наряду с кэробом семена льна и продукты их переработки могут использоваться в производстве безглютеновой продукции [95, 96].

Korus J. с соавт. показали возможность замены гуаровой камеди и пектина лиофилизированным экстрактом льняной слизи (дозировка 1,2–2,4 % от массы крахмала) при улучшении органолептики безглютенового хлеба [91].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на обилие информации, касающейся разработки пищевых продуктов с включением в их рецептуру растворимых пищевых волокон семян льна, нельзя сказать, что все технологические и диетологические вопросы полностью решены. Поэтому актуальным является продолжение исследований, связанных с изучением влияния сортовых особенностей льна, почвенно-климатических условий его выращивания, технологии переработки на количество, состав и свойства растворимых пищевых волокон. Отдельного внимания заслуживают исследования, направленные на поиск наиболее эффективных способов введения растворимых пищевых волокон в разнообразные пищевые матрицы и подтверждение в клинических условиях эффективности включения их в рацион питания для профилактики и/или лечения социально-значимых заболеваний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parikh M., Maddaford T.G., Austria J.A., Aliani M., Netticadan T., Pierce G.N. Dietary Flaxseed as a Strategy for Improving Human Health // Nutrients. 2019. Vol. 11(5). 1171. https://doi.org/10.3390/nu11051171 .

2. Kauser S., Hussain A., Ashraf S., Fatima G., Ambreen, Javaria S., Abideen Z.U., Kabir K., Yaqub S., Akram S., Shehzad A., Korma S.A. Flaxseed (Linum usitatissimum); Phytochemistry, Pharmacological Characteristics and Functional Food Applications // Food Chemistry Advances. 2024. Vol. 4. 100573. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100573 .

3. Wu S., Jia W., He H., Yin J., Xu H., He C., Zhang Q., Peng Y., Cheng R. Can Enhance Satiety and Reduce Postprandial Blood Glucose in Healthy Adults: A Randomized Cross-Over Trial // Nutrients. Vol. *15*(21). 4569. https://doi.org/10.3390/nu15214569.

4. Kapoor P., Parrey Z.A., Mir B.A., Wani A.W., Kumari R., Rakhra G., Joshi R., Rakhra G., Khan W.A., Abass K.S., Rajab B.S., Farid A., Alghamdi S. Flaxseed in Diabetes Management: Nutritional and Therapeutic Insights // Current nutrition reports. 2025. Vol. 14(1). 109. https://doi.org/10.1007/s13668-025-00696-3.

5. López-Toledo S., Pineda De la Cruz M.C., Gutiérrez-Hurtado I.A., Gijón-Soriano A.L., Martínez-Martínez E., Valencia-Santiago C., Orellana-Centeno J.E., Ramírez-García S.A., Pacheco-Cruz R. Flaxseed Improves Glucose and Lipid Metabolism in Mexican Subjects with Type 2 Diabetes: A Parallel Randomized Clinical Trial // Nutrients. 202). Vol. 17(4). 709. https://doi.org/10.3390/nu17040709 .

6. Stepień A.E., Trojniak J., Tabarkiewicz J. Anti-Oxidant and Anti-Cancer Properties of Flaxseed // International journal of molecular sciences. 2025. Vol. 26(3). 1226. https://doi.org/10.3390/ijms26031226 .

7. Tian Y., Zhou Y., Liao W., Xia J., Hu Q., Zhao Q., Zhang R., Sun G., Yang L., Li L. Flaxseed powder supplementation in non-alcoholic fatty liver disease: a randomized controlled clinical trial // Food & function. 2025. Vol. 16(4). Pp. 1389–1406. https://doi.org/10.1039/d4fo05847j.

8. Zharkova I.M., Grebenshchikov A.V., Efremov D.P., Maksimov S.A., Eliashevich S.O., Orekhova A.V., Kiselev A.R. Combination of flaxseed and clarified tomato juice in bread: Delayed effect on metabolic disorders during long-term unbalanced diet in an in vivo experiment // Nutrition and health. 2024. Vol. 31(4), Pp. 1449–1463. https://doi.org/10.1177/02601060241298740.

9. Shrivastava R., Bhattacharya S., Verma N., Mehdi A.A., Pandey A., Ansari J.A. Dietary Status and the Effect of Flaxseed Supplementation on the Severity of Perimenopausal Symptoms // Cureus. 2025. Vol. 17(2). e79725. https://doi.org/10.7759/ cureus.79725.

10. Musazadeh V., Hamidi N., Mahmoudinezhad M., Jafari A., Shidfar F. Can flaxseed supplementation alleviate blood pressure in patients with metabolic diseases? Evaluating the strength of evidence using a meta-analysis and GRADE approach // Journal of diabetes and metabolic disorders. 2025. Vol. 24(2). 149. https://doi.org/10.1007/s40200-025-01656-y.

11. Heidor R., Yamamoto R.C., da Silva C.F.A., Ruff J.R., Purgatto E., Moreno F.S. Flaxseed Oil Inhibits Hepatic Preneoplastic Lesions, DNA Damage, and γ-H2AX Expression During Initial Phases of Hepatocarcinogenesis // Nutrition and Cancer. 2026. Vol. 78(1). Pp. 80–91. https://doi.org/10.1080/01635581.2025.2562639.

12. Caligiuri S.P.B., Parikh M., Stamenkovic A., Pierce G.N., Aukema H.M. Dietary modulation of oxylipins in cardiovascular disease and aging // American journal of physiology. Heart and circulatory physiology. 2017. Vol. 313(5). H903–H918. https://doi.org/10.1152/ajpheart.00201.2017.

13. Duarte S., Shah M.A., Sanches Silva A. Flaxseed in Diet: A Comprehensive Look at Pros and Cons // Molecules (Basel, Switzerland). 2025. Vol. 30(6). 1335. https://doi.org/10.3390/ molecules30061335.

14. Hirst B.C., Dibrov E., Hirst S.D., Pierce G.N. Physiological and Pathological Considerations for the Use of Flaxseed as a Therapeutic Dietary Strategy // Reviews in cardiovascular medicine. 2023. Vol. 24(5). 149. https://doi.org/10.31083/j.rcm2405149 .

15. Ganguly R., Hasanally D., Stamenkovic A., Maddaford T.G., Chaudhary R., Pierce G.N., Ravandi A. Alpha linolenic acid decreases apoptosis and oxidized phospholipids in cardiomyocytes during ischemia/reperfusion // Molecular and cellular biochemistry. 2018. Vol. 437(1-2). Pp. 163–175. https://doi.org/ 10.1007/s11010-017-3104-z.

16. Xie N., Zhang W., Li J., Liang H., Zhou H., Duan W., Xu X., Yu S., Zhang H., Yi D. α-Linolenic acid intake attenuates myocardial ischemia/reperfusion injury through anti-inflammatory and anti-oxidative stress effects in diabetic but not normal rats // Archives of medical research. 2011. Vol. 42(3). Pp. 171–181. https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2011.04.008 .

17. Zhu L., Sha L., Li K., Wang Z., Wang T., Li Y., Liu P., Dong X., Dong Y., Zhang X., Wang H. Dietary flaxseed oil rich in omega-3 suppresses severity of type 2 diabetes mellitus via anti-inflammation and modulating gut microbiota in rats // Lipids in health and disease. 2020. Vol. 19(1). 20. https://doi.org/10.1186/s12944-019-1167-4.

18. Mitrović N., Zarić Kontić M., Grković I. Neuroprotection by Flaxseed Oil in a Model of Hippocampal Injury Induced by Trimethyltin Involves Purinergic System Modulation // International journal of molecular sciences. 2025. Vol. 26(21). 10283. https://doi.org/ 10.3390/ijms262110283.

19. Mueed A., Shibli S., Korma S.A., Madjirebaye P., Esatbeyoglu T., Deng Z. Flaxseed Bioactive Compounds: Chemical Composition, Functional Properties, Food Applications and Health Benefits-Related Gut Microbes // Foods (Basel, Switzerland). 2022. Vol. 11(20). 3307. https://doi.org/10.3390/foods11203307.

20. Dzuvor C.K.O., Taylor J.T., Acquah C., Pan S., Agyei D. Bioprocessing of Functional Ingredients from Flaxseed // Molecules (Basel, Switzerland). 2018. Vol. 23(10). 2444. https://doi.org/ 10.3390/molecules23102444.

21. Noreen S., Hashmi B., Tufail T., Ikram A., Arshad M.T., Gnedeka K.T. Synergistic Beneficial Effects of Flaxseed (Linum usitatissimum L.) Oil and Olive (Olea europaea L.) Oil Against Metabolic Dysfunction Associated Fatty Liver and Its Complications // Food science & nutrition. 2024. Vol. 13(1). e4638. https://doi.org/ 10.1002/fsn3.4638.

22. Plaha N.S., Awasthi S., Sharma A., Kaushik N. Distribution, biosynthesis and therapeutic potential of lignans // 3 Biotech. 2022. Vol. 12(10). 255. https://doi.org/10.1007/s13205-022-03318-9.

23. Calado A., Neves P.M., Santos T., Ravasco P. The Effect of Flaxseed in Breast Cancer: A Literature Review // Frontiers in nutrition. 2018. Vol. 5. 4. https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00004 .

24. Parikh M., Netticadan T., Pierce G.N. Flaxseed: its bioactive components and their cardiovascular benefits // American journal of physiology. Heart and circulatory physiology. 2018. Vol. 314(2). H146–H159. https://doi.org/10.1152/ajpheart.00400.2017.

25. Elshenawy E.A., Mohammed H.A., Mahmoud Y.I. Flaxseed Lignans Alleviates Doxorubicin-Induced Premature Ovarian Insufficiency in Adult Female Mice // Reproductive sciences (Thousand Oaks, Calif.). 2025. Vol. 32(11). Pp. 3676–3687. https://doi.org/10.1007/s43032-025-01980-x .

26. Prasad K. Antihypertensive Activity of Secoisolariciresinol Diglucoside (SDG) Isolated from Flaxseed: Role of Guanylate Cyclase // International Journal of Angiology. 2004. Vol. 13. Pp. 7–14. https://doi.org/10.1007/s00547-004-1060-4.

27. Wu H., Liu J., Zhang X.H., Jin S., Li P., Liu H., Zhao L., Wang J., Zhao S., Tian H.D., Lai J. R., Hao Y., Liu G.R., Hou K., Yan M., Liu S.L., Pang D. The combination of flaxseed lignans and PD-1/ PD-L1 inhibitor inhibits breast cancer growth via modulating gut microbiome and host immunity // Drug resistance updates : reviews and commentaries in antimicrobial and anticancer chemotherapy. 2025. Vol. 80. 101222. https://doi.org/10.1016/j.drup.2025. 101222.

28. Barre D.E., Mizier-Barre K.A., Griscti O. Various apolipoprotein E genotypes relate to responsiveness to flaxseed lignan complex in older persons with type 2 diabetes mellitus // Endocrine regulations. 2024. Vol. 58(1). Pp. 220–224. https://doi.org/10.2478/ enr-2024-0026.

29. Duś-Ilnicka I., Prescha A., Mordal A., Środa-Pomianek K., Sobieszczańska B., Bielecka M., Czyżnikowska Ż., Szperlik J., Matkowski A., Radwan-Oczko M. Flaxseed Extracts Impact the Cellular Structure of a Keratinocyte Model for Oral Lichen Planus-A Preliminary Study // International journal of molecular sciences. 2025. Vol. 26(12). 5462. https://doi.org/10.3390/ijms26125462.

30. Wang S., Chen J., Li Y., Wang Y. Secoisolariciresinol diglucoside (SDG) from flaxseed meal alleviates hyperuricemia in mice by regulating uric acid metabolism and intestinal homeostasis // Food research international (Ottawa, Ont.). 2025. Vol. 217. 116770. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116770.

31. Kavyani Z., Pourfarziani P., Mohamad Jafari Kakhki A., Sedgh Ahrabi S., Hossein Moridpour A., Mollaghasemi N., Musazadeh V., Hossein Faghfouri A. The Effect of Flaxseed Supplementation on Glycemic Control in Adults: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials // Journal of Functional Foods. 2023. Vol. 110. 105816. https://doi.org/10.1016/ j.jff.2023.105816.

32. Ahlin R., Sigvardsson I., Skokic V., Landberg R., Steineck G., Hedelin M. Development and Validation of a Mobile Phone Application Developed for Measuring Dietary Fiber Intake // Nutrients. 2021. Vol. *13*(7). 2133. https://doi.org/10.3390/nu13072133.

33. Stephen A.M., Champ M.M., Cloran S.J., Fleith M., van Lieshout L., Mejborn H., Burley V.J. Dietary fibre in Europe: Current state of knowledge on definitions, sources, recommendations, intakes and relationships to health // Nutrition research reviews. 2017. Vol. 30. Pp. 149–190. https://doi.org/10.1017/S095442241700004X .

34. EFSA Publication. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies (NDA); Scientific Opinion on Dietary Reference Values for carbohydrates and dietary fibre. European Food Safety Authority. // EFSA Journal. 2011. No. 1462. https://doi.org/10.2903/ j.efsa.2010.1462.

35. Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 22 июля 2021 г.). https://upp.alregn.ru/pharmaceutical-industry/docs/inaya-poleznaya-informatsiya/MP %202.3.1.0253-21.pdf. (дата обращения: 09.02.2026).

36. Guan Z.W., Yu E.Z., Feng Q. Soluble Dietary Fiber, One of the Most Important Nutrients for the Gut Microbiota // Molecules (Basel, Switzerland). 2021. Vol. 26(22). 6802. https://doi.org/ 10.3390/molecules26226802.

37. Singh R.P. Glycan utilisation system in Bacteroides and Bifidobacteria and their roles in gut stability and health // Applied microbiology and biotechnology. 2019. Vol. 103(18). Pp. 7287–7315. https://doi.org/10.1007/s00253-019-10012-z.

38. Tap J., Furet J.P., Bensaada M., Philippe C., Roth H., Rabot S., Lakhdari O., Lombard V., Henrissat B., Corthier G., et al. Gut microbiota richness promotes its stability upon increased dietary fibre intake in healthy adults // Environmental microbiology. 2015. Vol. 17. Pp. 4954–4964. https://doi.org/10.1111/1462-2920.13006.

39. Flint H.J., Scott K.P., Duncan S.H., Louis P., Forano E. Microbial degradation of complex carbohydrates in the gut // Gut Microbes. 2012. Vol. 3. Pp. 289–306. https://doi.org/10.4161/ gmic.19897.

40. Lai K.W., How Y.H., Ghazali H.M., Pui L.P. Preliminary evaluation of potential prebiotic capacity of selected legumes and seed mucilage on the probiotic strain Lactobacillus rhamnosus GG // Asia-Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology. 2021. Vol. 29(1). Pp. 60–72. https://doi.org/10.35118/apjmbb. 2021.029.1.07.

41. Giuntini E.B., Sardá F.A.H., de Menezes E.W. The Effects of Soluble Dietary Fibers on Glycemic Response: An Overview and Futures Perspectives // Foods (Basel, Switzerland). 2022. Vol. *11*(23). 3934. https://doi.org/10.3390/foods11233934.

42. Kawasaki N., Suzuki Y., Urashima M., Nakayoshi T., Tsuboi K., Tanishima Y., Hanyu N., Kashiwagi H. Effect of gelatinization on gastric emptying and absorption // Hepatogastroenterology. 2008. Vol. 55(86-87). Pp. 1843–1845.

43. Makki K., Deehan E.C., Walter J., Bäckhed F. The Impact of Dietary Fiber on Gut Microbiota in Host Health and Disease // Cell host & microbe. 2018. Vol. 23(6). Pp. 705–715. https://doi.org/10.1016/j.chom.2018.05.012.

44. Baye K., Guyot J.P., Mouquet-Rivier C. The unresolved role of dietary fibers on mineral absorption // Critical reviews in food science and nutrition. 2017. Vol. 57(5). Pp. 949–957. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.953030.

45. Bosscher D., Van Caillie-Bertrand M., Deelstra H. Effect of thickening agents, based on soluble dietary fiber, on the availability of calcium, iron, and zinc from infant formulas // Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.). 2001. Vol. 17(7-8). Pp. 614–618. https://doi.org/10.1016/s0899-9007(01)00541-x.

46. Тесто для производства хлебобулочных изделий: пат. 2634003. Рос. Федерация № 2016148014; заявл. 08.12.2016; опубл. 23.10.2017, Бюл. № 30. 9 с.

47. Benítez-Páez A., Kjølbæk L., Gómez Del Pulgar E.M., Brahe L.K., Astrup A., Matysik S., Schött H.F., Krautbauer S., Liebisch G., Boberska J., Claus S., Rampelli S., Brigidi P., Larsen L.H., Sanz Y. A Multi-omics Approach to Unraveling the Microbiome-Mediated Effects of Arabinoxylan Oligosaccharides in Overweight Humans // mSystems. 2019. Vol. 4(4). e00209-19. https://doi.org/10.1128/mSystems.00209-19.

48. Deehan E.C., Zhang Z., Riva A., Armet A.M., Perez-Muñoz M.E., Nguyen N.K., Krysa J.A., Seethaler B., Zhao Y.Y., Cole J., Li F., Hausmann B., Spittler A., Nazare J.A., Delzenne N.M., Curtis J.M., Wismer W.V., Proctor S.D., Bakal J.A., Bischoff S.C., Walter J. Elucidating the role of the gut microbiota in the physiological effects of dietary fiber // Microbiome. 2022. Vol. 10(1). 77. https://doi.org/10.1186/s40168-022-01248-5.

49. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific Opinion on the Substantiation of Health Claims Related to Arabinoxylan Produced from Wheat Endosperm and Reduction of Post-Prandial Glycaemic Responses (ID 830) Pursuant to Article 13(1) of Regulation (EC) No 1924/2006 // EFSA Journal. 2011. Vol. 9. 2205. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2205.

50. Исследование биологических свойств растворимых полисахаридов семян льна в составе продукта из аффинированного желтого сахара / И.М. Жаркова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2022. № 1. С. 89–95. https://doi.org/10.26297/0579-3009.2022.1.13.

51. Seth D., Mishra H.N., Deka S.C. Effect of hydrocolloids on the physico-chemical and rheological properties of reconstituted sweetened yoghurt powder // Journal of the science of food and agriculture. 2018. Vol. 98(5). Pp. 1696–1702. https://doi.org/10.1002/jsfa.8641.

52. Salehi F. Effect of common and new gums on the quality, physical, and textural properties of bakery products: A review // Journal of texture studies. 2020. Vol. 51(2). Pp. 361–370. https://doi.org/10.1111/jtxs.12482 .

53. Rai S., Kaur A., Chopra C.S. Gluten-Free Products for Celiac Susceptible People // Frontiers in nutrition. 2018. Vol. 5. 116. https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00116.

54. Andrade F.J.E.T., Albuquerque P.B.S., Moraes G.M.D., Farias M.D.P., Teixeira-Sá D.M.A., Vicente A.A., Carneiro-da-Cunha M.G. Influence of hydrocolloids (galactomannan and xanthan gum) on the physicochemical and sensory characteristics of gluten-free cakes based on fava beans (Phaseolus lunatus) // Food & function. 2018. Vol. 9(12). Pp. 6369–6379. https://doi.org/10.1039/c8fo01448e.

55. Kohajdová Z., Karovičová J. Application of hydrocolloids as baking improvers // Chemical Papers. 2009. Vol. 63(1). Pp. 26–38. https://doi.org/10.2478/s11696-008-0085-0.

56. Zheng M., Lin Y., Wu H., Zeng S., Zheng B., Zhang Y., Zeng H. Water migration depicts the effect of hydrocolloids on the structural and textural properties of lotus seed starch // Food chemistry. 2020. Vol. 315. 126240. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126240.

57. Maity T., Saxena A., Raju P.S. Use of hydrocolloids as cryoprotectant for frozen foods // Critical reviews in food science and nutrition. 2018. Vol. 58(3). Pp. 420–435. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1182892.

58. Ping-Ping W., Wen-Duo W., Chun C., Xiong F., Rui-Hai L. Effect of Fructus Mori. bioactive polysaccharide conjugation on improving functional and antioxidant activity of whey protein // International journal of biological macromolecules. 2020. Vol. 148. Pp. 761–767. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.195.

59. Sempio R., Segura Godoy C., Nyhan L., Sahin A.W., Zannini E., Walter J., Arendt E.K. Closing the Fibre Gap-The Impact of Combination of Soluble and Insoluble Dietary Fibre on Bread Quality and Health Benefits // Foods (Basel, Switzerland). 2024. Vol. *13*(13). 1980. https://doi.org/10.3390/foods13131980.

60. Меренкова С.П., Девяткин Д.И. Перспективы применения компонентов семян масличных культур в технологии хлеба // Ползуновский вестник. 2024. № 2. С. 46–52. https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.006.

61. Huang H., Huang G. Extraction, separation, modification, structural characterization, and antioxidant activity of plant polysaccharides // Chemical biology & drug design. 2020. Vol. 96(5). Pp. 1209–1222. https://doi.org/10.1111/cbdd.13794.

62. Manzoor M., Singh J., Bandral J.D., Gani A., Shams R. Food hydrocolloids: Functional, nutraceutical and novel applications for delivery of bioactive compounds // International journal of biological macromolecules. 2020. Vol. 165(PtA). Pp. 554–567. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.182.

63. Миневич И.Э., Осипова Л.Л. Гидроколлоиды семян льна: характеристика и перспективы использования в пищевых технологиях // Научный журнал НИУИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2017. № 3. С. 16–25. https://doi.org/10.17586/2310-1164-2017-10-3-16-25.

64. Миневич И.Э. Функциональная значимость семян льна и практика их использования в пищевых технологиях // Health, Food & Biotechnology. 2019. 1(2). С. 97–120. https://doi.org/10.36107/hfb.2019.i2.s224.

65. Jiang Y., Reddy C. K., Huang K., Chen L., Xu B. Hydrocolloidal properties of flaxseed gum/konjac glucomannan compound gel // International journal of biological macromolecules. 2019. Vol. 133. Pp. 1156–1163. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.187.

66. Nikbakht Nasrabadi M., Goli S.A.H., Sedaghat Doost A., Dewettinck K., Van der Meeren P. Bioparticles of flaxseed protein and mucilage enhance the physical and oxidative stability of flaxseed oil emulsions as a potential natural alternative for synthetic surfactants // Colloids and surfaces. B, Biointerfaces. 2019. Vol. 184. 110489. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110489.

67. Brahe L.K., Le Chatelier E., Prifti E., Pons N., Kennedy S., Blædel T., Håkansson J., Dalsgaard T.K., Hansen T., Pedersen O., Astrup A., Ehrlich S.D., Larsen L.H. Dietary modulation of the gut microbiota - a randomised controlled trial in obese postmenopausal women // The British journal of nutrition. 2015. Vol. 114(3). Pp. 406–417. https://doi.org/10.1017/S0007114515001786.

68. Sun J., Bai H., Ma J., Zhang R., Xie H., Zhang Y., Guo M., Yao J. Effects of flaxseed supplementation on functional constipation and quality of life in a Chinese population: A randomized trial // Asia Pacific journal of clinical nutrition. 2020. Vol. 29(1). Pp. 61–67. https://doi.org/10.6133/apjcn.202003_29(1).0009.

69. Yang X., Feng M.Q., Sun J., Xu X.L., Zhou G.H. The influence of flaxseed gum on the retrogradation of maize starch // International Journal of Food Science & Technology. 2017. Vol. 52. Pp. 2654–2660. https://doi.org/10.1111/ijfs.13554.

70. Feng M., Yang X., Sun J., Xu X., Zhou G. Study on retrogradation of maize starch–flaxseed gum mixture under various storage temperatures // International Journal of Food Science & Technology. 2018. Vol. 53. Pp. 1287–1293. https://doi.org/10.1111/ijfs.13709.

71. Яковлева А.А., Ущаповский В.И., Миневич И.Э. Взаимодействие белка гороха с полисахаридами семян льна в эмульсиях «масло в воде» // Ползуновский вестник. 2024. № 4. С. 21–28. https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.003.

72. Льняное семя, его состав и свойства / В.А. Зубцов [и др.] // Российский химический журнал (ЖРХО им. Д.И. Менделеева). 2002. Т. XLVI. № 2. С. 14–16.

73. Biliaderis C. Composition and physicochemical properties of linseed (Linum usitatissimum L.) mucilage // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 1994. Vol. 42(2). Pp. 240–247.

74. Oomah B.D., Kenaschuk E.O., Cui W., Mazza G. Variation in the composition of water-soluble polysaccharides in flaxseed // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 1995. Vol. 43. Pp. 1484–1488. http://dx.doi.org/10.1021/jf00054a013.

75. Muralikrishna G., Salimath P.V., Tharanathan R.N. Structural features of an arabinoxylan and a rhamno-galacturonan derived from linseed mucilage // Carbohydrate Research. 1987. Vol. 161. Pp. 265–271.

76. Petrova A.A., Kozlova L.V., Gaifullina I.Z., Ananchenko B.A., Martinson E.A., Mikshina P.V., Gorshkova T.A. AFM analysis reveals polymorphism of purified flax rhamnogalacturonans I of distinct functional types // Carbohydrate polymers. 2019. Vol. 216. Pp. 238–246. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.087.

77. Yapo B.M. Rhamnogalacturonan-I: a structurally puzzling and functionally versatile polysaccharide from plant cell walls and mucilages // Polymer Reviews. 2011. Vol. 51(4). Pp. 391–413. https://doi.org/10.1080/15583724.2011.615962.

78. Hunt K., Jones J.K. The structure of linseed mucilage: part II // Canadian Journal of Chemistry. 1962. Vol. 40(7). Pp. 1266–1279. https://doi.org/10.1139/v62-195.

79. Naran R., Chen G., Carpita N.C. Novel rhamnogalacturonan I and arabinoxylan polysaccharides of flax seed mucilage // Plant physiology. 2008. Vol. *148*(1). Pp. 132–141. https://doi.org/10.1104/pp.108.123513.

80. Способ производства хлебобулочных изделий с добавлением высушенной слизи семян льна: пат. 2794876. Рос. Федерация № 2022111746; заявл. 28.04.2022; опубл. 25.04.2023, Бюл. № 12. 38 с.

81. Elboutachfaiti R., Delattre C., Qu´ero A., Roulard R., Duchˆene J., Mesnard F., Petit E. Fractionation and structural characterization of six purified rhamnogalacturonans type I from flaxseed mucilage // Food Hydrocolloids. 2017. Vol. 62. Pp. 273–279. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.005.

82. Яковлева А.А., Ущаповский В.И., Миневич И.Э. Определение пространственной структуры полисахаридов семян льна // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2024. № 2(XLVI). С. 14–16. https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.4.4.

83. Meng Y., Lyu F., Xu X., Zhang L. Recent Advances in Chain Conformation and Bioactivities of Triple-Helix Polysaccharides // Biomacromolecules. 2020. Vol. 21(5). Pp. 1653–1677. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b01644.

84. Fabre J.F., Lacroux E., Valentin R., Mouloungui Z. Ultrasonication as a highly efficient method of flaxseed mucilage extraction // Industrial Crops and Products. 2015. Vol. 65. Pp. 354–360. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.015.

85. Способ получения полисахаридного комплекса из семян льна: пат. 2639770 Рос. Федерация № 2015139034; заявл. 14.19.2015; опубл. 17.03.2017, Бюл. № 8. 9 с.

86. Warrand J., Michaud P., Picton L., Muller G., Courtois B., Ralainirina R., Courtois J. Structural investigations of the neutral polysaccharide of Linum usitatissimum L. seeds mucilage // International journal of biological macromolecules. 2005. Vol. 35(3-4). Pp. 121–125. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2004.12.006.

87. Haseeb M.T., Muhammad G., Hussain M.A., Bukhari S.N.A., Sheikh F.A. Flaxseed (Linum usitatissimum) mucilage: A versatile stimuli-responsive functional biomaterial for pharmaceuticals and healthcare // International journal of biological macromolecules. 2024. Vol. 278 (Pt 4). 134817. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134817.

88. Puligundla P., Lim S. A Review of Extraction Techniques and Food Applications of Flaxseed Mucilage // Foods (Basel, Switzerland). 2022. Vol. 11(12). 1677. https://doi.org/10.3390/foods11121677.

89. Способ получения полисахаридов льна: пат. 2358983 Рос. Федерация № 2008100613/13; заявл. 09.01.2008; опубл. 20.06.2009, Бюл. № 17. 6 с.

90. Способ получения полисахаридов льна: пат. 2625583 Рос. Федерация № 2016134342; заявл. 22.08.2016; опубл. 17.07.2017, Бюл. № 20. 6 с.

91. Korus J., Witczak T., Ziobro R., Juszczak L. Linseed (Linum Usitatissimum L.) mucilage as a novel structure forming agent in gluten-free bread // LWT- Food Science and Technology. 2015. Vol. 62(1). https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.040.

92. Liu J., Shim Y.Y., Poth A.G., Reaney M. Conlinin in flaxseed (Linum usitatissimum L.) gum and its contribution to emulsification properties // Food Hydrocolloids. 2016. Vol. 52. Pp. 963–971. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.09.001.

93. Singer F.A.W., Taha F.S., Mohamed S.S., Gibriel A., El-Nawawy M. Preparation of mucilage/Protein products from flaxseed // American Journal of Food Technology. 2011. Vol. 6(4). Pp. 260–278. https://doi.org/10.3923/ajft.2011.260-278.

94. Qian K.Y., Cui S.W., Wu Y., Goff H.D. Flaxseed gum from flaxseed hulls: Extraction, fractionation, and characterization // Food Hydrocolloids. 2012. Vol. 28(2). Pp. 275–283. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.12.019.

95. Оптимизация безглютеновой диеты новыми продуктами / И.М. Жаркова [и др.] // Вопросы детской диетологии. 2017. Т. 15. № 6. С. 59–65. https://doi.org/10.20953/1727-5784-2017-6-59-65 .

96. Обзор разработок мучных изделий для безглютенового и геродиетического питания / И.М. Жаркова [и др.] // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 1. С. 213–217. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-213-217.

Информация об авторах

Д. П. Ефремов – директор ООО «АгроЛен», Алтайский край, Россия.

И. М. Жаркова – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств» Воронежского государственного университета инженерных технологий.

REFERENCES

1. Parikh, M., Maddaford, T.G., Austria, J.A., Aliani, M., Netticadan, T. & Pierce, G.N. (2019). Dietary Flaxseed as a Strategy for Improving Human Health. *Nutrients*, 11(5), 1171. https://doi.org/10.3390/nu11051171.

2. Kauser, S., Hussain, A., Ashraf, S., Fatima, G., Ambreen, Javaria, S., Abideen, Z.U., Kabir, K., Yaqub, S., Akram, S., Shehzad, A. & Korma, S.A. (2024). Flaxseed (Linum usitatissimum); Phytochemistry, Pharmacological Characteristics and Functional Food Applications. *Food Chemistry Advances*, 4, 100573. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100573.

3. Wu, S., Jia, W., He, H., Yin, J., Xu, H., He, C., Zhang, Q., Peng, Y. & Cheng, R. (2023). Can Enhance Satiety and Reduce Postprandial Blood Glucose in Healthy Adults: A Randomized Cross-Over Trial. *Nutrients*, *15*(21), 4569. https://doi.org/10.3390/nu15214569.

4. Kapoor, P., Parrey, Z.A., Mir, B.A., Wani, A.W., Kumari, R., Rakhra, G., Joshi, R., Rakhra, G., Khan, W.A., Abass, K.S., Rajab, B.S., Farid, A. & Alghamdi, S. (2025). Flaxseed in Diabetes Management: Nutritional and Therapeutic Insights. *Current nutrition reports*, 14(1), 109. https://doi.org/10.1007/s13668-025-00696-3.

5. López-Toledo, S., Pineda De la Cruz, M.C., Gutiérrez-Hurtado, I.A., Gijón-Soriano, A.L., Martínez-Martínez, E., Valencia-Santiago, C., Orellana-Centeno, J.E., Ramírez-García, S.A. & Pacheco-Cruz, R. (2025). Flaxseed Improves Glucose and Lipid Metabolism in Mexican Subjects with Type 2 Diabetes: A Parallel Randomized Clinical Trial. *Nutrients*, 17(4), 709. https://doi.org/10.3390/ nu17040709.

6. Stepień, A.E., Trojniak, J. & Tabarkiewicz, J. (2025). Anti-Oxidant and Anti-Cancer Properties of Flaxseed. *International journal of molecular sciences*, 26(3), 1226. https://doi.org/10.3390/ijms26031226.

7. Tian, Y., Zhou, Y., Liao, W., Xia, J., Hu, Q., Zhao, Q., Zhang, R., Sun, G., Yang, L. & Li, L. (2025). Flaxseed powder supplementation in non-alcoholic fatty liver disease: a randomized con-

trolled clinical trial. *Food & function*, 16(4), 1389–1406. https://doi.org/10.1039/d4fo05847j.

8. Zharkova, I.M., Grebenshchikov, A.V., Efremov, D.P., Maksimov, S.A., Eliashevich, S.O., Orekhova, A.V. & Kiselev, A.R. (2024). Combination of flaxseed and clarified tomato juice in bread: Delayed effect on metabolic disorders during long-term unbalanced diet in an in vivo experiment. *Nutrition and health*, 31(4), 1449-1463. https://doi.org/10.1177/02601060241298740.

9. Shrivastava, R., Bhattacharya, S., Verma, N., Mehdi, A.A., Pandey, A. & Ansari, J.A. (2025). Dietary Status and the Effect of Flaxseed Supplementation on the Severity of Perimenopausal Symptoms. *Cureus*, 17(2), e79725. https://doi.org/10.7759/ cureus.79725.

10. Musazadeh, V., Hamidi, N., Mahmoudinezhad, M., Jafari, A. & Shidfar, F. (2025). Can flaxseed supplementation alleviate blood pressure in patients with metabolic diseases? Evaluating the strength of evidence using a meta-analysis and GRADE approach. *Journal of diabetes and metabolic disorders*, 24(2), 149. https://doi.org/10.1007/s40200-025-01656-y.

11. Heidor, R., Yamamoto, R.C., da Silva, C.F.A., Ruff, J.R., Purgatto, E. & Moreno, F.S. (2026). Flaxseed Oil Inhibits Hepatic Preneoplastic Lesions, DNA Damage, and γ-H2AX Expression During Initial Phases of Hepatocarcinogenesis. *Nutrition and Cancer*, 78(1), 80-91. https://doi.org/10.1080/01635581.2025.2562639.

12. Caligiuri, S.P.B., Parikh, M., Stamenkovic, A., Pierce, G.N. & Aukema, H.M. (2017). Dietary modulation of oxylipins in cardiovascular disease and aging. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology*, 313(5), H903-H918. https://doi.org/10.1152/ajpheart.00201.2017.

13. Duarte, S., Shah, M.A. & Sanches Silva, A. (2025). Flaxseed in Diet: A Comprehensive Look at Pros and Cons. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 30(6), 1335. https://doi.org/10.3390/ molecules30061335.

14. Hirst, B.C., Dibrov, E., Hirst, S.D. & Pierce, G.N. (2023). Physiological and Pathological Considerations for the Use of Flaxseed as a Therapeutic Dietary Strategy. *Reviews in cardiovascular medicine*, 24(5), 149. https://doi.org/10.31083/j.rcm2405149.

15. Ganguly, R., Hasanally, D., Stamenkovic, A., Maddaford, T.G., Chaudhary, R., Pierce, G.N. & Ravandi, A. (2018). Alpha linolenic acid decreases apoptosis and oxidized phospholipids in cardiomyocytes during ischemia/reperfusion. *Molecular and cellular biochemistry*, 437(1-2), 163-175. https://doi.org/10.1007/s11010-017-3104-z.

16. Xie, N., Zhang, W., Li, J., Liang, H., Zhou, H., Duan, W., Xu, X., Yu, S., Zhang, H. & Yi, D. (2011). α-Linolenic acid intake attenuates myocardial ischemia/reperfusion injury through anti-inflammatory and anti-oxidative stress effects in diabetic but not normal rats. *Archives of medical research*, 42(3), 171-181. https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2011.04.008.

17. Zhu, L., Sha, L., Li, K., Wang, Z., Wang, T., Li, Y., Liu, P., Dong, X., Dong, Y., Zhang, X. & Wang, H. (2020). Dietary flaxseed oil rich in omega-3 suppresses severity of type 2 diabetes mellitus via anti-inflammation and modulating gut microbiota in rats. *Lipids in health and disease*, 19(1), 20. https://doi.org/10.1186/s12944-019-1167-4.

18. Mitrović, N., Zarić Kontić, M. & Grković, I. (2025). Neuroprotection by Flaxseed Oil in a Model of Hippocampal Injury Induced by Trimethyltin Involves Purinergic System Modulation. *International journal of molecular sciences*, 26(21), 10283. https://doi.org/ 10.3390/ijms262110283.

19. Mueed, A., Shibli, S., Korma, S.A., Madjirebaye, P., Esatbeyoglu, T. & Deng, Z. (2022). Flaxseed Bioactive Compounds: Chemical Composition, Functional Properties, Food Applications and Health Benefits-Related Gut Microbes. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(20), 3307. https://doi.org/10.3390/foods11203307.

20. Dzuvor, C.K.O., Taylor, J.T., Acquah, C., Pan, S. & Agyei, D. (2018). Bioprocessing of Functional Ingredients from Flaxseed. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 23(10), 2444. https://doi.org/10.3390/molecules23102444.

21. Noreen, S., Hashmi, B., Tufail, T., Ikram, A., Arshad, M.T. & Gnedeka, K.T. (2024). Synergistic Beneficial Effects of Flaxseed (Linum usitatissimum L.) Oil and Olive (Olea europaea L.) Oil Against Metabolic Dysfunction Associated Fatty Liver and Its Complications. *Food science & nutrition*, 13(1), e4638. https://doi.org/10.1002/fsn3.4638 .

22. Plaha, N.S., Awasthi, S., Sharma, A. & Kaushik, N. (2022). Distribution, biosynthesis and therapeutic potential of lignans. *3 Biotech*, 12(10), 255. https://doi.org/10.1007/s13205-022-03318-9.

23. Calado, A., Neves, P.M., Santos, T. & Ravasco, P. (2018). The Effect of Flaxseed in Breast Cancer: A Literature Review. *Frontiers in nutrition*, 5, 4. https://doi.org/10.3389/ fnut.2018.00004.

24. Parikh, M., Netticadan, T. & Pierce, G.N. (2018). Flaxseed: its bioactive components and their cardiovascular benefits. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology*, 314(2), H146-H159. https://doi.org/10.1152/ajpheart.00400.2017.

25. Elshenawy, E.A., Mohammed, H.A. & Mahmoud, Y.I. (2025). Flaxseed Lignans Alleviates Doxorubicin-Induced Premature Ovarian Insufficiency in Adult Female Mice. *Reproductive sciences (Thousand Oaks, Calif.)*, 32(11), 3676-3687. https://doi.org/10.1007/ s43032-025-01980-x .

26. Prasad, K. (2004). Antihypertensive Activity of Secoisolariciresinol Diglucoside (SDG) Isolated from Flaxseed: Role of Guanylate Cyclase. *International Journal of Angiology*, 13, 7–14 https://doi.org/10.1007/s00547-004-1060-4.

27. Wu, H., Liu, J., Zhang, X. H., Jin, S., Li, P., Liu, H., Zhao, L., Wang, J., Zhao, S., Tian, H.D., Lai, J.R., Hao, Y., Liu, G.R., Hou, K., Yan, M., Liu, S.L. & Pang, D. (2025). The combination of flaxseed lignans and PD-1/ PD-L1 inhibitor inhibits breast cancer growth via modulating gut microbiome and host immunity. *Drug resistance updates : reviews and commentaries in antimicrobial and anticancer chemotherapy*, 80, 101222. https://doi.org/10.1016/ j.drup.2025.101222.

28. Barre, D.E., Mizier-Barre, K.A. & Griscti, O. (2024). Various apolipoprotein E genotypes relate to responsiveness to flaxseed lignan complex in older persons with type 2 diabetes mellitus. *Endocrine regulations*, 58(1), 220-224. https://doi.org/10.2478/enr-2024-0026.

29. Duś-Ilnicka, I., Prescha, A., Mordal, A., Środa-Pomianek, K., Sobieszczańska, B., Bielecka, M., Czyżnikowska, Ż., Szperlik, J., Matkowski, A. & Radwan-Oczko, M. (2025). Flaxseed Extracts Impact the Cellular Structure of a Keratinocyte Model for Oral Lichen Planus-A Preliminary Study. *International journal of molecular sciences*, 26(12), 5462. https://doi.org/10.3390/ijms26125462.

30. Wang, S., Chen, J., Li, Y., & Wang, Y. (2025). Secoisolariciresinol diglucoside (SDG) from flaxseed meal alleviates hyperuricemia in mice by regulating uric acid metabolism and intestinal homeostasis. *Food research international (Ottawa, Ont.)*, 217, 116770. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116770 .

31. Kavyani, Z., Pourfarziani, P., Mohamad Jafari Kakhki, A., Sedgh Ahrabi, S., Hossein Moridpour, A., Mollaghasemi, N., Musazadeh, V. & Hossein Faghfouri, A. (2023). The Effect of Flaxseed Supplementation on Glycemic Control in Adults: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Journal of Functional Foods*, 110, 105816. https://doi.org/10.1016/ j.jff.2023.105816.

32. Ahlin, R., Sigvardsson, I., Skokic, V., Landberg, R., Steineck, G. & Hedelin, M. (2021). Development and Validation of a Mobile Phone Application Developed for Measuring Dietary Fiber Intake. *Nutrients*, *13*(7), 2133. https://doi.org/10.3390/nu13072133.

33. Stephen, A.M., Champ, M.M., Cloran, S.J., Fleith, M., van Lieshout, L., Mejborn, H. & Burley, V.J. (2017). Dietary fibre in Europe: Current state of knowledge on definitions, sources, recommendations, intakes and relationships to health, *Nutrition research reviews*, 30, 149-190. https://doi.org/10.1017/S095442241700004X.

34. EFSA Publication (2011). EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies (NDA); Scientific Opinion on Dietary Reference Values for carbohydrates and dietary fibre. European Food Safety Authority, *EFSA Journal,* 1462. https://doi.org/10.2903/ j.efsa.2010.1462.

35. Methodological recommendations MR 2.3.1.0253-21 "Standards of physiological needs for energy and nutrients for various population groups of the Russian Federation" (approved by the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing on July 22, 2021) https://upp.alregn.ru/pharmaceutical-industry/docs/inaya-poleznaya-informatsiya/MP %202.3.1.0253-21.pdf. (In Russ.).

36. Guan, Z.W., Yu, E.Z. & Feng, Q. (2021). Soluble Dietary Fiber, One of the Most Important Nutrients for the Gut Microbiota, *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(22), 6802. https://doi.org/10.3390/molecules26226802.

37. Singh, R.P. (2019). Glycan utilisation system in Bacteroides and Bifidobacteria and their roles in gut stability and health, *Applied microbiology and biotechnology*, 103(18), 7287-7315. https://doi.org/10.1007/s00253-019-10012-z.

38. Tap, J., Furet, J.P., Bensaada, M., Philippe, C., Roth, H., Rabot, S., Lakhdari, O., Lombard, V., Henrissat, B., Corthier, G., Fontaine, E., Doré, J. & Leclerc, M. (2015). Gut microbiota richness promotes its stability upon increased dietary fibre intake in healthy adults. *Environmental microbiology*, 17(12), 4954-4964. https://doi.org/10.1111/1462-2920.13006.

39. Flint, H.J., Scott, K.P., Duncan, S.H., Louis, P. & Forano, E. (2012). Microbial degradation of complex carbohydrates in the gut. *Gut microbes*, 3(4), 289-306. https://doi.org/10.4161/gmic.19897.

40. Lai, K.W., How, Y.H., Ghazali, H.M. & Pui, L.P. (2021). Preliminary evaluation of potential prebiotic capacity of selected legumes and seed mucilage on the probiotic strain Lactobacillus rhamnosus GG. *Asia-Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology*, 29(1), 60-72. https://doi.org/10.35118/apjmbb.2021.029.1.07.

41. Giuntini, E.B., Sardá, F.A.H. & de Menezes, E.W. (2022). The Effects of Soluble Dietary Fibers on Glycemic Response: An Overview and Futures Perspectives. *Foods (Basel, Switzerland)*, *11*(23), 3934. https://doi.org/10.3390/foods11233934.

42. Kawasaki, N., Suzuki, Y., Urashima, M., Nakayoshi, T., Tsuboi, K., Tanishima, Y., Hanyu, N. & Kashiwagi, H. (2008). Effect of gelatinization on gastric emptying and absorption. *Hepatogastroenterology*, 55(86-87), 1843-1845.

43. Makki, K., Deehan, E.C., Walter, J. & Bäckhed, F. (2018). The Impact of Dietary Fiber on Gut Microbiota in Host Health and Disease. *Cell host & microbe*, 23(6), 705-715. https://doi.org/10.1016/j.chom.2018.05.012.

44. Baye, K., Guyot, J.P. & Mouquet-Rivier, C. (2017). The unresolved role of dietary fibers on mineral absorption. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(5), 949-957. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.953030.

45. Bosscher, D., Van Caillie-Bertrand, M. & Deelstra, H. (2001). Effect of thickening agents, based on soluble dietary fiber, on the availability of calcium, iron, and zinc from infant formulas. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, 17(7-8), 614-618. https://doi.org/10.1016/s0899-9007(01)00541-x.

46. Bojtsova, T.M., Bannikova I.E., Nazarova O.M. (2017). Dough for manufacturing bakery products. *Pat. 2634003. Russian Federation, published on 23.10.2017.*Bull. No. 30. (In Russ.).

47. Benítez-Páez, A., Kjølbæk, L., Gómez Del Pulgar, E.M., Brahe, L.K., Astrup, A., Matysik, S., Schött, H.F., Krautbauer, S., Liebisch, G., Boberska, J., Claus, S., Rampelli, S., Brigidi, P., Larsen, L.H. & Sanz, Y. (2019). A Multi-omics Approach to Unraveling the Microbiome-Mediated Effects of Arabinoxylan Oligosaccharides in Overweight Humans. *mSystems*, 4(4), e00209-19. https://doi.org/10.1128/mSystems.00209-19.

48. Deehan, E.C., Zhang, Z., Riva, A., Armet, A.M., Perez-Muñoz, M.E., Nguyen, N.K., Krysa, J.A., Seethaler, B., Zhao, Y.Y., Cole, J., Li, F., Hausmann, B., Spittler, A., Nazare, J.A., Delzenne, N.M., Curtis, J.M., Wismer, W.V., Proctor, S.D., Bakal, J.A., Bischoff, S.C., … Walter, J. (2022). Elucidating the role of the gut microbiota in the physiological effects of dietary fiber. *Microbiome*, 10(1), 77. https://doi.org/10.1186/s40168-022-01248-5.

49. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific Opinion on the Substantiation of Health Claims Related to Arabinoxylan Produced from Wheat Endosperm and Reduction of Post-Prandial Glycaemic Responses (ID 830) Pursuant to Article 13(1) of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal*, 2011, 9, 2205. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2205.

50. Zharkova, I.M., Grebenshchikov, A.V., Kulneva, N.G., Efremov, D.P. & Safonova, YU.A. (2022). Study of the biological properties of soluble flax seed polysaccharides in an affinity yellow sugar product. *Izvestiya vuzov. Food technology*, 1, 89-95. (In Russ.). https://doi.org/10.26297/0579-3009.2022.1.13.

51. Seth, D., Mishra, H.N. & Deka, S.C. (2018). Effect of hydrocolloids on the physico-chemical and rheological properties of reconstituted sweetened yoghurt powder. *Journal of the science of food and agriculture*, 98(5), 1696-1702. https://doi.org/10.1002/jsfa.8641.

52. Salehi, F. (2020). Effect of common and new gums on the quality, physical, and textural properties of bakery products: A review. *Journal of texture studies*, 51(2), 361-370. https://doi.org/10.1111/jtxs.12482.

53. Rai, S., Kaur, A. & Chopra, C.S. (2018). Gluten-Free Products for Celiac Susceptible People. *Frontiers in nutrition*, 5, 116. https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00116.

54. Andrade, F.J.E.T., Albuquerque, P.B.S., Moraes, G.M.D., Farias, M.D.P., Teixeira-Sá, D.M.A., Vicente, A.A. & Carneiro-da-Cunha, M.G. (2018). Influence of hydrocolloids (galactomannan and xanthan gum) on the physicochemical and sensory characteristics of gluten-free cakes based on fava beans (Phaseolus lunatus). *Food & function*, 9(12), 6369-6379. https://doi.org/10.1039/c8fo01448e.

55. Kohajdová, Z. & Karovičová J. (2009). Application of hydrocolloids as baking improvers. *Chemical Papers*, 63(1), 26-38. https://doi.org/10.2478/s11696-008-0085-0.

56. Zheng, M., Lin, Y., Wu, H., Zeng, S., Zheng, B., Zhang, Y. & Zeng, H. (2020). Water migration depicts the effect of hydrocolloids on the structural and textural properties of lotus seed starch. *Food chemistry*, 315, 126240. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126240.

57. Maity, T., Saxena, A. & Raju, P.S. (2018). Use of hydrocolloids as cryoprotectant for frozen foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58(3), 420-435. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1182892.

58. Ping-Ping, W., Wen-Duo, W., Chun, C., Xiong, F. & Rui-Hai, L. (2020). Effect of Fructus Mori. bioactive polysaccharide conjugation on improving functional and antioxidant activity of whey protein. *International journal of biological macromolecules*, 148, 761-767. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.195.

59. Sempio, R., Segura Godoy, C., Nyhan, L., Sahin, A.W., Zannini, E., Walter, J. & Arendt, E.K. (2024). Closing the Fibre Gap-The Impact of Combination of Soluble and Insoluble Dietary Fibre on Bread Quality and Health Benefits. *Foods (Basel, Switzerland)*, *13*(13), 1980. https://doi.org/10.3390/foods13131980.

60. Merenkova, S.P. & Devyatkin, D.I. (2024). Prospects for the use of oilseed components in bread technology. *Polzunovskiy vestnik*, 2, 46-52. (In Russ.). https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.006.

61. Huang, H. & Huang, G. (2020). Extraction, separation, modification, structural characterization, and antioxidant activity of plant polysaccharides. *Chemical biology & drug design*, 96(5), 1209-1222. https://doi.org/10.1111/cbdd.13794.

62. Manzoor, M., Singh, J., Bandral, J.D., Gani, A. & Shams, R. (2020). Food hydrocolloids: Functional, nutraceutical and novel applications for delivery of bioactive compounds. *International journal of biological macromolecules*, 165(Pt A), 554-567. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.182.

63. Minevich, I.E. & Osipova, L.L. (2017). Flax seed hydrocolloids: their characteristics and prospects of use in food technology. *Processes and food production equipment*, 3, 16-25. (In Russ.). https://doi.org/10.17586/2310-1164-2017-10-3-16-25.

64. Minevich, I.E. (2019). Functional Significance of Flax Seeds and Practice of Their Use in Food Technologies. *Health, Food & Biotechnology*, 1(2), 97-120. (In Russ.). https://doi.org/10.36107/hfb.2019.i2.s224.

65. Jiang, Y., Reddy, C.K., Huang, K., Chen, L. & Xu, B. (2019). Hydrocolloidal properties of flaxseed gum/konjac glucomannan compound gel. *International journal of biological macromolecules*, 133, 1156-1163. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.187.

66. Nikbakht Nasrabadi, M., Goli, S.A.H., Sedaghat Doost, A., Dewettinck, K. & Van der Meeren, P. (2019). Bioparticles of flaxseed protein and mucilage enhance the physical and oxidative stability of flaxseed oil emulsions as a potential natural alternative for synthetic surfactants. *Colloids and surfaces. B, Biointerfaces*, 184, 110489. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110489.

67. Brahe, L.K., Le Chatelier, E., Prifti, E., Pons, N., Kennedy, S., Blædel, T., Håkansson, J., Dalsgaard, T.K., Hansen, T., Pedersen, O., Astrup, A., Ehrlich, S.D. & Larsen, L.H. (2015). Dietary modulation of the gut microbiota-a randomised controlled trial in obese postmenopausal women. The British journal of nutrition, 114(3), 406-417. https://doi.org/10.1017/S0007114515001786.

68. Sun, J., Bai, H., Ma, J., Zhang, R., Xie, H., Zhang, Y., Guo, M. & Yao, J. (2020). Effects of flaxseed supplementation on functional constipation and quality of life in a Chinese population: A randomized trial. *Asia Pacific journal of clinical nutrition*, 29(1), 61-67. https://doi.org/10.6133/apjcn.202003_29(1).0009.

69. Yang, X., Feng, M.Q., Sun, J., Xu, X.L. & Zhou, G.H. (2017). The influence of flaxseed gum on the retrogradation of maize starch. *International Journal of Food Science & Technology*, 52, 2654-2660. https://doi.org/10.1111/ijfs.13554.

70. Feng, M., Yang, X., Sun, J., Xu, X. & Zhou, G. (2018). Study on retrogradation of maize starch-flaxseed gum mixture under various storage temperatures. *International Journal of Food Science & Technology*, 53, 1287-1293. https://doi.org/10.1111/ijfs.13709.

71. Yakovleva, A.A., Ushchapovskiy, V.I. & Minevich, I.E. (2024). Pea protein and flaxseed polysaccharides interaction in "oil in water" emulsions. *Polzunovskiy vestnik*, 4, 21-28. (In Russ.). https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.003.

72. Zubtsov, V.A.., Osipova, L.L. & Lebedeva T.I. (2002). Flaxseed, its composition and properties. *Izvestiya vuzov. Rossijskij himicheskij zhurnal*, XLVI (2), 14-16. (In Russ.).

73. Biliaderis, C. (1994). Composition and physicochemical properties of linseed (Linum usitatissimum L.) mucilage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42(2), 240-247.

74. Oomah, B.D., Kenaschuk, E.O. & Cui, W., Mazza, G. (1995). Variation in the composition of water-soluble polysaccharides in flaxseed. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 43, 1484-1488, http://dx.doi.org/10.1021/jf00054a013.

75. Muralikrishna, G., Salimath, P.V. & Tharanathan, R.N. (1987). Structural features of an arabinoxylan and a rhamnogalacturonan derived from linseed mucilage. *Carbohydrate Research*, 161. 265-271.

76. Petrova, A.A., Kozlova, L.V., Gaifullina, I.Z., Ananchenko, B.A., Martinson, E.A., Mikshina, P.V. & Gorshkova, T.A. (2019). AFM analysis reveals polymorphism of purified flax rhamnogalacturonans I of distinct functional types. *Carbohydrate polymers*, 216, 238–246. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.087.

77. Yapo, B.M. (2011). Rhamnogalacturonan-I: a structurally puzzling and functionally versatile polysaccharide from plant cell walls and mucilages, *Polymer Reviews*, 51(4). 391-413. https://doi.org/10.1080/15583724.2011.615962.

78. Hunt, K. & Jones, J.K. (1962). The structure of linseed mucilage: part II. *Canadian Journal of Chemistry*, 40(7). 1266-1279, https://doi.org/10.1139/v62-195.

79. Naran, R., Chen, G. & Carpita, N.C. (2008). Novel rhamnogalacturonan I and arabinoxylan polysaccharides of flax seed mucilage. *Plant physiology*, *148*(1), 132-141. https://doi.org/10.1104/pp.108.123513.

80. Kharina, M.V., Sibgatullin T.A., Mikshina P.V., Iamashev T.A. (2023). Method for production of bakery products with addition of dried gum of flax seeds. *Pat. 2794876. Russian Federation, published on 25.04.2023.*Bull. No. 12. (In Russ.).

81. Elboutachfaiti, R., Delattre, C., Qu´ero, A., Roulard, R., Duchˆene, J., Mesnard, F. & Petit, E. (2017). Fractionation and structural characterization of six purified rhamnogalacturonans type I from flaxseed mucilage. *Food Hydrocolloids*, 62. 273-279. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.005.

82. Yakovleva, A.A., Ushchapovskiy, V.I. & Minevich, I.E. (2024). Determination of the spatial structure of polysaccharides in flax seeds. *Izvestiya vuzov. Food technology*, 4(397), 27-30. (In Russ.). https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.4.4.

83. Meng, Y., Lyu, F., Xu, X. & Zhang, L. (2020). Recent Advances in Chain Conformation and Bioactivities of Triple-Helix Polysaccharides. *Biomacromolecules*, 21(5), 1653-1677. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b01644.

84. Fabre, J.F., Lacroux, E., Valentin, R. & Mouloungui, Z. (2015). Ultrasonication as a highly efficient method of flaxseed mucilage extraction, *Industrial Crops and Products*, 65. 354-360, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.015.

85. Minevich, I.E., Zubtsov, V.A. &Osipova, L.L. (2017). Method for producing polysaccharide complex from flaxseed. *Pat. 2639770. Russian Federation, published on 17.03.2017.*Bull. No. 8. (In Russ.).

86. Warrand, J., Michaud, P., Picton, L., Muller, G., Courtois, B., Ralainirina, R. & Courtois, J. (2005). Structural investigations of the neutral polysaccharide of Linum usitatissimum L. seeds mucilage. *International journal of biological macromolecules*, 35(3-4), 121-125. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2004.12.006.

87. Haseeb, M.T., Muhammad, G., Hussain, M.A., Bukhari, S.N.A. & Sheikh, F.A. (2024). Flaxseed (Linum usitatissimum) mucilage: A versatile stimuli-responsive functional biomaterial for pharmaceuticals and healthcare. *International journal of biological macromolecules*, 278(Pt 4), 134817. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134817.

88. Puligundla, P. & Lim, S. (2022). A Review of Extraction Techniques and Food Applications of Flaxseed Mucilage. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(12), 1677. https://doi.org/10.3390/foods11121677.

89. Ozhimkova, E.V., Sul'man, M.G., Sidorov, A.I. (2009). Method of producing flax polysaccharides. *Pat. 2358983. Russian Federation, published on 20.06.2009.*Bull. No. 17. (In Russ.).

90. Ivanov, P.P., Pavlova, L.D., Ivanova, L.A. (2017). Method for obtaining flax polysaccharides. *Pat. 2625583. Russian Federation, published on 17.07.2017.*Bull. No. 20. (In Russ.).

91. Korus, J., Witczak, T., Ziobro, R. & Juszczak, L. (2015). Linseed (Linum Usitatissimum L.) mucilage as a novel structure forming agent in gluten-free bread. *LWT- Food Science and Technology*, 62(1), https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.040.

92. Liu, J., Shim, Y.Y., Poth, A.G. & Reaney, M. (2016). Conlinin in flaxseed (Linum usitatissimum L.) gum and its contribution to emulsification properties. *Food Hydrocolloids*, 52, 963-971. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.09.001.

93. Singer, F.A.W., Taha. F.S., Mohamed, S.S., Gibriel, A. & El-Nawawy, M. (2011). Preparation of mucilage/Protein products from flaxseed. *American Journal of Food Technology*, 6(4), 260-278. https://doi.org/10.3923/ajft.2011.260-278.

94. Qian, K.Y., Cui, S.W., Wu, Y. & Goff, H.D. (2012). Flaxseed gum from flaxseed hulls: Extraction, fractionation, and characterization. *Food Hydrocolloids*, 28(2), 275-283. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.12.019.

95. Zharkova, I.M., Zvyagin, A.A., Miroshnichenko, L.A.., Slepokurova, Yu.I., Roslyakov, Y.F., Koryachkina, S.Ya. & Gustinovich, V.G. (2017). Optimization of a gluten-free diet with new products. *Pediatric Nutrition,* 15(6), 59-65. (In Russ.). https://doi.org/10.20953/1727-5784-2017-6-59-65.

96. Zharkova, I.M., Samokhvalov, A.A., Gustinovich, V.G., Koryachkina, S.Ya. & Roslyakov, Y.F. (2019). Review of bakery products for gluten free and herodietetic nutrition. *Proceedings of VSUET*, 81(1), 213–217. (In Russ.). https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-213-217.

Information about the authors

D. P. Efremov - director of AgroLen LLC, Altai Krai, Russia.

I. M. Zharkova - Doctor of Engineering Sciences, professor of the Department of Bakery, Confectionery, Pasta, and Grain Processing Technologies at the Voronezh State University of Engineering Technologies.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 123–131.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 123–131.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.8.039.5
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.016 EDN: VBRBZA

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОНСЕРВИРОВАНИЯ СУШЕНЫХ СЛИВ И ТОМАТОВ В МАСЛЕ С ДОБАВЛЕНИЕМ ФИТОКОМПОЗИЦИИ

Валентина Федоровна Жукова [1], Татьяна Викторовна Карман [2], Карина Анатольевна Вакасова[3], Виктория Викторовна Коляденко [4]

[1, 2, 3, 4] Мелитопольский государственный университет, Мелитополь, Россия
[1] zhuzhuvf@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1963-659X
[2] t.karman@mgu-mlt.ru, https://orcid.org/0000-0002-9313-554X
[3] karina.vakasova@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0007-0257-9350
[4] V/V/Koliadenko@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-0949-1374

Аннотация. *Актуальность научной работы заключается в создании пищевых продуктов высокого качества и функциональной направленности из натурального растительного сырья для оптимизации пищевого рациона населения. Из перспективных методов консервирования выбран физико-химический, основанный на принципе ксероанабиоза. Обоснована целесообразность выбора плодов сливы и томата для производства консервов повышенной пищевой ценности. Описаны технологические аспекты консервирования сушеных слив и томатов в масле с добавлением фитокомпозиции из базилика, душицы, мяты, розмарина, тимьяна. Дополнительно в состав рецептур в различных пропорциях вводили молотые специи: кардамон, куркуму, перец красный острый, перец черный, чеснок гранулированный. Для улучшения вкусовых качеств, понижения уровня pH и повышения продолжительности хранения слив в масле вводили яблочный уксус 6 %. Проведен анализ физико-химических показателей плодов до и после высушивания с целью определения их потенциала для дальнейшей переработки. Установлено, что сушка приводит к значительному увеличению концентрации питательных веществ на единицу массы продукта. Исходя из полученных данных обоснованы ключевые технологические параметры производственного процесса, включая режимы сушки, подготовку фитокомпозиции и процесс консервирования в масле, с целью максимального сохранения полезных свойств исходных ингредиентов. Разработана научно обоснованная технология производства консервов, включающая оригинальную рецептуру. Опытные образцы готовых консервов прошли комплексную оценку, которая подтвердила их высокое качество по органолептическим и физико-химическим показателям. Разработанная технология консервированных сушеных плодов в масле с добавлением фитокомпозиции позволяет производить конкурентоспособную продукцию с повышенной пищевой ценностью.*

Ключевые слова: *технология, сушеные сливы и томаты, фитокомпозиция, производство, оценка качества.*

Благодарности: *Исследования выполнены в рамках государственного задания на проведение научно-исследовательской работы по теме «Инновации в пищевой индустрии и сфере услуг» (FRRS-2023-0010).*

Для цитирования: Жукова В. Ф., Карман Т. В., Вакасова К. А., Коляденко В. В. Инновационная технология консервирования сушеных томатов и слив в масле с добавлением фитокомпозиции // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 123–131. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.016. EDN: https://elibrary.ru/VBRBZA.

Original article

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF PRESERVING DRIED PLUMS AND TOMATOES IN OIL WITH ADDITION OF PHYTOCOMPOSITION

Valentina F. Zhukova [1], Tatiana V. Karman [2], Karina A. Vakasova [3], Viktoriia V. Koliadenko [4]

[1, 2, 3, 4] Melitopol State University, Zaporizhia region, Russia
[1] zhuzhuvf@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1963-659X
[2] t.karman@mgu-mlt.ru, https://orcid.org/0000-0002-9313-554X
[3] karina.vakasova@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0007-0257-9350
[4] V/V/Koliadenko@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-0949-1374

Abstract. *The relevance of the scientific work lies in the creation of high-quality and functional food products from natural plant raw materials to optimize the dietary intake of the population. The physicochemical method based on the principle of xeroanabiosis was chosen from the promising methods of canning. The expediency of choosing plum and tomato fruits for the production of canned food of increased nutritional value is substantiated. The technological aspects of preserving dried plums and tomatoes in oil with the addition of a phytocomposition of basil, oregano, mint, rosemary,*

© Жукова В. Ф., Карман Т. В., Вакасова К. А., Коляденко В. В., 2026

thyme are described. Additionally, ground spices were added to the formulations in various proportions: cardamom, turmeric, hot red pepper, black pepper, granulated garlic. To improve the taste, lower the pH level and increase the shelf life of plums, 6 % apple cider vinegar was introduced into the oil. The analysis of physico-chemical parameters of fruits before and after drying was carried out in order to determine their potential for further processing. It has been established that drying leads to a significant increase in the concentration of nutrients per unit mass of the product. Based on the data obtained, the key technological parameters of the production process are substantiated, including drying modes, preparation of the phytocomposition and the canning process in oil, in order to maximize the beneficial properties of the initial ingredients. A scientifically based technology for the production of canned food has been developed, including an original recipe. The prototypes of ready-made canned food underwent a comprehensive assessment, which confirmed their high quality in terms of organoleptic and physico-chemical parameters. The developed technology of canned dried fruits in oil with the addition of phytocomposition makes it possible to produce competitive products with increased nutritional value.

Keywords: *technology, dried plums and tomatoes, phytocomposition, production, quality assessment.*

Acknowledgements: *The research was carried out within the framework of the state assignment for conducting research work on the topic «Innovations in the food industry and the service sector» (FRRS-2023-0010).*

For citation: Zhukova, V. F., Karman, T. V., Vakasova, K. A. & Koliadenko, V. V. (2026). Technological aspects of preserving dried plums and tomatoes in oil with addition of phytocomposition. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 123-131. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.016. EDN: https: //elibrary.ru/VBRBZA.

ВВЕДЕНИЕ

Среди ключевых направлений государственной политики в области здорового питания – стимулирование производства инновационных, конкурентоспособных пищевых продуктов, в том числе функциональных, обогащённых ценными компонентами и отвечающих современным стандартам качества и безопасности, а также разработка и внедрение эффективных технологий переработки плодоовощного сырья [1]. Через целенаправленное развитие этих инициатив и обеспечение доступности высококачественных, функциональных продуктов формируется основа для оптимизации пищевого поведения граждан. Здоровье населения, как подтверждают многочисленные исследования [2, 3], критически зависит от качества и сбалансированности рациона питания, являющегося фундаментальным фактором в профилактике целого ряда хронических неинфекционных заболеваний – от сердечно-сосудистых патологий и диабета 2 типа до некоторых видов онкологических заболеваний. Более того, адекватное поступление в организм необходимых макро- и микронутриентов принципиально важно для поддержания оптимальной работоспособности, развития и сохранения когнитивных функций, а также общего жизненного тонуса, что в совокупности определяет ожидаемую продолжительность и высокое качество активной жизни [4].

Рекомендации ведущих мировых и отечественных диетологических организаций указывают на необходимость увеличения доли растительной пищи в ежедневном рационе. В контексте Доктрины продовольственной безопасности, целью которой является достижение самообеспеченности по основным видам продовольствия, развитие отечественного плодоовощеводства становится не просто экономически выгодным направлением, но стратегически важным. Плодоовощная продукция является незаменимым источником эссенциальных витаминов, минеральных веществ, пищевых волокон и широкого спектра биоактивных соединений, которые играют критическую роль в поддержании гомеостаза, укреплении иммунной системы и профилактике некоторых заболеваний [5].

Несмотря на наличие значительного агропромышленного потенциала, зависимость от импортных поставок по некоторым позициям плодоовощной группы остается существенной, что создает уязвимости для национальной продовольственной системы в условиях внешних экономических и геополитических факторов [6]. Колебания цен на мировых рынках, логистические риски и недобросовестная конкуренция могут негативно сказаться на доступности и ценовой стабильности этих жизненно важных продуктов для потребителей. Следовательно, наращивание объемов производства собственных фруктов и овощей напрямую способствует снижению импортной зависимости и укреплению продовольственного суверенитета.

На современном этапе развития отечественного агропромышленного комплекса совокупный объем специализированных хранилищ для плодовой продукции – в пределах 900 тыс. т, что позволяет обеспечить сохранение лишь 60 % от общего объема ежегодно производимого урожая [7]. Критический дефицит современных сооружений для внутрихозяйственного хранения становится причиной не только неоправданно крупных количественных и качественных потерь уже собранной продукции, но и вынуждает сельскохозяйственные предприятия реализовать плоды сразу после уборки урожая по заниженным из-за перенасыщения рынка ценам [8]. Это подрывает экономическую стабильность регионов и сдерживает развитие полного цикла производства в агросекторе.

В сегменте плодоовощной продукции отечественная перерабатывающая промышленность имеет ряд проблем, требующих научно обоснованного решения. Одной из главных является разработка и внедрение передовых технологий переработки, в том числе инновационных методов консервирования плодоовощной продукции.

Среди них особо выделяются физико-химические методы переработки, основанные на принципе ксероанабиоза. Обезвоженные продукты отличаются меньшей массой и объёмом, при этом они обладают более высокой энергетической ценностью по сравнению со свежими [9]. Это существенно упрощает их транспортировку и хранение. Однако процесс сушки при температуре выше 70 ºС сопровождается потерей части ароматических соединений, окислением витаминов, денатурацией белков, изменениями в клеточных мембранах и угнетением ферментативных реакций в сырье. В результате снижения влажности ниже 15 % продукт теряет пластичность, приобретет характерную «сухую» структуру [10]. Для получения гибкого, не крошащегося готового продукта повышенной пищевой ценности требуется подбор оптимальных режимов переработки. Целесообразно использовать сушку сырья, обеспечивающую снижение влажности до 15–30 % при умеренных щадящих температурных режимах ниже 70 ºС.

Наиболее популярный метод дегидратации –

конвективный при помощи потока нагретого воздуха [11, 12]. Процесс сушки при этом является сложным комплексом взаимосвязанных физико-химических процессов: нагрев растительного сырья за счёт теплопередачи от воздуха к материалу; испарение влаги с поверхности и диффузия влаги из продукта. Оптимальный режим обезвоживания достигается при равенстве скорости испарения влаги с поверхности и скорости её перемещения внутри продукта для предотвращения образования корки, замедляющей процесс. Повысить эффективность сушки можно путем увеличения площади испарения за счет измельчения или нарезки сырья.

Технологические особенности изготовления консервированных продуктов позволяют эффективно обогащать их функциональными ингредиентами [13, 14]. Важной задачей является разработка новых консервированных продуктов на основе натурального растительного сырья без применения синтетических химических консервантов. Улучшения их органолептических и функциональных свойств можно достичь путём добавления растительных компонентов с высоким уровнем биологически активных и пряно-ароматических веществ, которые способствуют повышению пищевой ценности и увеличению сроков сохранности консервированных продуктов [15–19]. Усовершенствование технологии консервированной продукции неразрывно связано с необходимостью решения таких вопросов, как отработка режимов сушки полуфабрикатов, а также создание новых продуктов, конкурентоспособных по пищевой ценности.

Цель исследования – разработка технологии производства консервов из сушеных плодов в масле с добавлением пряно-ароматической фитокомпозиции. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Обоснование выбора сырья для производства консервов повышенной пищевой ценности.

2. Исследование физико-химических характеристик растительного сырья.

3. Обоснование оптимальных технологических параметров производственного процесса.

4. Разработка научно обоснованной технологии консервов из сушеных плодов в масле с добавлением пряно-ароматической фитокомпозиции.

5. Оценка опытных образцов консервов по органолептическим и физико-химическим показателям.

Плодоовощное сырье представляет собой ключевой ресурс для создания натуральных, полезных и высококачественных продуктов, способствующих здоровому питанию.

Томат (*Solanum lycopersicum L.*) занимает одну из ведущих позиций среди овощных культур в аграрном секторе юга России [21]. Слива (Prunus domestica L.) также широко культивируется в южных регионах, однако среди плодово-ягодных насаждений она остается в нишевом сегменте [22]. Плоды данных культур отличаются диетическими и профилактическими свойствами, имеют низкую калорийность, богатый биохимический состав.

Основную роль в формировании вкусовых особенностей и технологических свойств томатов и слив играет соотношение химических соединений в плодах. Данные компоненты не только формируют органолептические показатели, но и влияют на качество плодов в процессе сбора, транспортировки, хранения и переработки.

Химический состав плодов подвергается колебаниям под воздействием климатических факторов и условий культивирования. Основу сухих веществ в плодах составляют углеводы, представленные моносахаридами, преимущественно глюкозой и фруктозой, а также полисахаридами: крахмалом, целлюлозой, гемицеллюлозой, пектиновыми веществами [23, 24].

Фруктоза и глюкоза доминируют в составе моносахаров томата, тогда как сахароза присутствует в очень малых объемах [25]. Глюкоза содержится в плодах как в свободном состоянии, так и в составе сложных углеводов. Среди сахароспиртов плодов сливы наиболее распространен сорбит. Его биохимическое превращение в сорбозу способствует увеличению сладости слив.

Сложные углеводы формируют прочность кожицы и мякоти плодов, являются важными показателями, характеризующими их пригодность к хранению и переработке [26]. Более плотные плоды демонстрируют повышенную устойчивость к механическим воздействиям, что способствует снижению процента брака. Пектиновые вещества представляют собой компонент клеточных стенок и межклеточных структур. Их уровень в сливах колеблется в пределах 0,5–1,8 %, в томатах – 1,0–1,8 % [24]. Преобладание протопектина положительно сказывается на прочности плодов, их способности к хранению и консервированию целиком. В процессе созревания плодов протопектин трансформируется в пектин, что приводит к размягчению тканей.

Вкусовые характеристики плодов сливы и томатов напрямую зависят от соотношения сахаров и кислот, что количественно отражается сахарокислотным индексом [27, 28]. Средние значения этого показателя в период полной зрелости слив варьируются в пределах 11,0–16,0; для томатов – 8,0–9,0. При значении сахарокислотного индекса выше 13,0–14,0 (сливы) и 10,0–12,0 (томаты) плоды имеют наиболее привлекательные вкусовые качества.

Антиоксиданты плодов представлены антоцианами, витамином С, каротиноидами, полифенолами, Р-активными соединениями, хлорогеновой кислотой [29]. Степень их накопления зависит от таких факторов, как сорт, степень зрелости и условия выращивания.

Витамин С играет ключевую роль в метаболизме и поддержании гомеостаза в растительных тканях, защищает клетки от окислительного повреждения, способствует сохранению их структуры и функций.

Р-активные компоненты, биофлавоноиды обеспечивают антиоксидантную защиту плодов. В сливах средняя концентрация этих компонентов колеблется от 75 до 180 мг/100 г, а в некоторых сортах достигает 900 мг/100 г, чего достаточно для коррекции гиповитаминоза [30]. В сливах преобладают лейкоантоцианы и катехины, по уровню накопления они значительно превосходят томаты.

Плоды этих культур также богаты фенольными соединениями, концентрация которых достигает пика при полной зрелости. Хлорогеновая кислота относится к классу фенольных соединений и является одним из наиболее мощных антиоксидантов в растительных тканях, особенно в темноокрашенных сортах сливы [31]. Уровень содержания хлорогеновой кислоты в плодах сливы варьируется от 8 до 132 мг/100 г. В томатах ее концентрация ниже и тесно зависит от сорта. Основные полифенолы томатов: хлорогеновая, кофейная, феруловая кислоты, рутин, флавоноиды [32].

При производстве слив приоритет отдается сортам с насыщенной темной окраской, обусловленной антоцианами и флавонолами, поскольку они маскируют незначительные повреждения, неизбежные при сборе и транспортировке. Содержание антоциа-

нов в кожице красных и синих плодов сливы может варьироваться в пределах 150–700 мг/кг, а в черносливе они отсутствуют. Флавонолы более выражены в плодах сливы с красной и фиолетовой кожицей, суммарное их содержание в мякоти варьируется в пределах 140–600 мг/кг сырого веса.

Насыщенный красный цвет томатов обусловлен ликопином – важнейшим жирорастворимым антиоксидантом. Содержание этого каротиноидного пигмента в плодах составляет в среднем 1,5–7,0 мг/100 г [33].

МЕТОДЫ

Научно-исследовательская работа проведена в 2024–2025 гг. на базе лаборатории кафедры «Гостиничная и ресторанная деятельность» Мелитопольского государственного университета. Объект исследования – консервы из сушеных слив (образец 1) и томатов (образец 2) в масле с добавлением пряно-ароматической фитокомпозиции, которая включала в себя пряно-ароматические травы: базилик, душицу, мяту, розмарин, тимьян. В работе исследовали сырье, качество которого соответствовало требованиям нормативной документации: слива свежая (ГОСТ 32286-2013); томаты свежие (ГОСТ 34298-2017); сахар (ГОСТ 33222-2015); соль пищевая (ГОСТ Р 51574-2018); базилик, душица, мята, тимьян (ГОСТ 32883-2014); розмарин (ГОСТ 31791-2012).

Отбор проб, а также оценку органолептических показателей качества осуществляли по ГОСТ 34130-2017. Содержание сухих веществ определяли термогравиметрически по ГОСТ 28561-90, витамина С – по ГОСТ 24556-89, титруемой кислотности – по ГОСТ ISO 750-2013, массовую долю общего сахара – по ГОСТ 8756.13-87, полифенолов – по ГОСТ 55488-2013, каротиноидов и хлорофиллов – спектрофотометрически [20].

Полученные данные обрабатывали стандартными методами статистического анализа. Все эксперименты проводились в трехкратной повторности.

В рамках исследования оценивалась пригодность для производства консервированных сушеных продуктов в масле: сливы – сорт Венгерка Донецкая, томата – сорт Рио Гранде.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для переработки был выбран отечественный сорт сливы «Венгерка Донецкая» позднего срока созревания. Ее плоды имеют овальную форму; тонкую, плотную кожицу темно-фиолетового цвета с интенсивным сизым восковым налетом. Мякоть – золотисто-желтая, плотная. Вкус – сладкий с легкой кислинкой. Благодаря ценным хозяйственно-биологическим признакам, а также легкому отделению косточки от мякоти сорт активно используется для переработки: приготовления черносливов, джемов, компотов, варенья и повидла.

Среди многообразия существующих сортов томатов для консервирования выбран сорт «Рио Гранде», предназначенный преимущественно для промышленной переработки. Его плоды плотные, мясистые, ярко-красного цвета, имеют характерную сливовидную форму массой 80–120 г. Утолщенные стенки плодов обуславливают мелкие семенные камеры, что важно для промышленного производства томатных консервов.

Для обогащения пряно-ароматического профиля консервов были выбраны пряно-ароматические травы, произрастающие в Запорожской области: базилик, душица, мята, розмарин, тимьян. Дополнительно в состав рецептур в различных пропорциях в зависимости от типа консервы вводили молотые специи: кардамон, куркуму, перец красный острый, перец черный, чеснок гранулированный. Для улучшения вкусовых качеств, понижения уровня pH и повышения продолжительности хранения слив в масле вводили яблочный уксус 6 %.

Технологический процесс консервирования плодов предусматривал выполнение следующих основных стадий: приемка сырья, мойка, сортировка, инспекция, калибровка, нарезка, сушка, расфасовка в подготовленную тару, заливка маслом с добавленной в нее пряно-ароматической композицией и приправами, укупорка, пастеризация, мойка, упаковка и последующее хранение (рис. 1).

На этапе первичной обработки томаты оценивали по критериям качества, размерам и степени зрелости. Плоды, не соответствующие стандарту, вялые, перезревшие, механически поврежденные или пораженные патогенной микрофлорой, отбраковывали. После мойки проводили калибровку, сортировку и инспекцию с целью отделения некондиционных, не соответствующих по размеру и качеству плодов, которые потом направляли на дальнейшую переработку или утилизацию. Далее осуществляли механическую обработку плодов – нарезку вдоль на 2 равные части по продольной оси. Далее у томатов удаляли семена, плаценту и опробковевшую часть рядом с плодоножкой, а у слив – косточки.

Подготовленные плоды сушили с конвекцией при температуре 65±2 ºС до влажности 23±2 %. На показатель продолжительности сушки влияют толщина продукта, первоначальный химический состав и массовая доля влаги в растительном сырье. Эффективность процесса сушки плодов и скорость удаления влаги напрямую коррелируют с толщиной нарезки и площадью поверхности, доступной для испарения. Удаление у томатов семян и плаценты способствует более равномерному удалению влаги и предотвращает образование градиентов влажности внутри продукта. Это, в свою очередь, обеспечивает более однородную текстуру сушеных томатов – они остаются мясистыми внутри, но с выраженной упругостью и плотностью.

Затем плоды расфасовывали в банки объемом 300 мл, заливали нагретым до 80±2 ºС растительным рафинированным маслом с добавлением пряно-ароматических трав, вкусовых добавок. pH сливовых консервов понижали путем введения яблочного уксуса, поскольку более кислые среды требуют более низкой температуры и меньшего времени пастеризации, соответственно, лучше сохраняются витамины.

После укупорки банок проводили термическую обработку. Оптимальной для данного вида консервов является пастеризация при t = 83±2 ºС в течение 15 мин, которая обеспечивает инактивацию патогенных микроорганизмов и ферментов, вызывающих порчу. Для сушеных слив и томатов в масле, учитывая их низкое содержание влаги 23±2 % и наличие масляной среды, являющейся барьером для аэробных микроорганизмов, пастеризация обеспечивает достаточный уровень термообработки. Стерилизация для сушеных плодов в масле может быть избыточной и привести к деградации текстуры, чрезмерного размягчения и потери структурной целостности. Кроме того, нагрев до 100 ºС и выше приводит к разрушению некоторых биологически активных веществ, потерям характерного пряного вкуса и аромата. Благодаря более мягкому тепловому режиму пастеризации лучше сохраняется органолептический профиль сушеных плодов, минимизируются потери летучих ароматических соединений и деградация вкусовых компонентов. После маркировки продукт хранили 12 месяцев при температуре от 0 до 20 ºС.

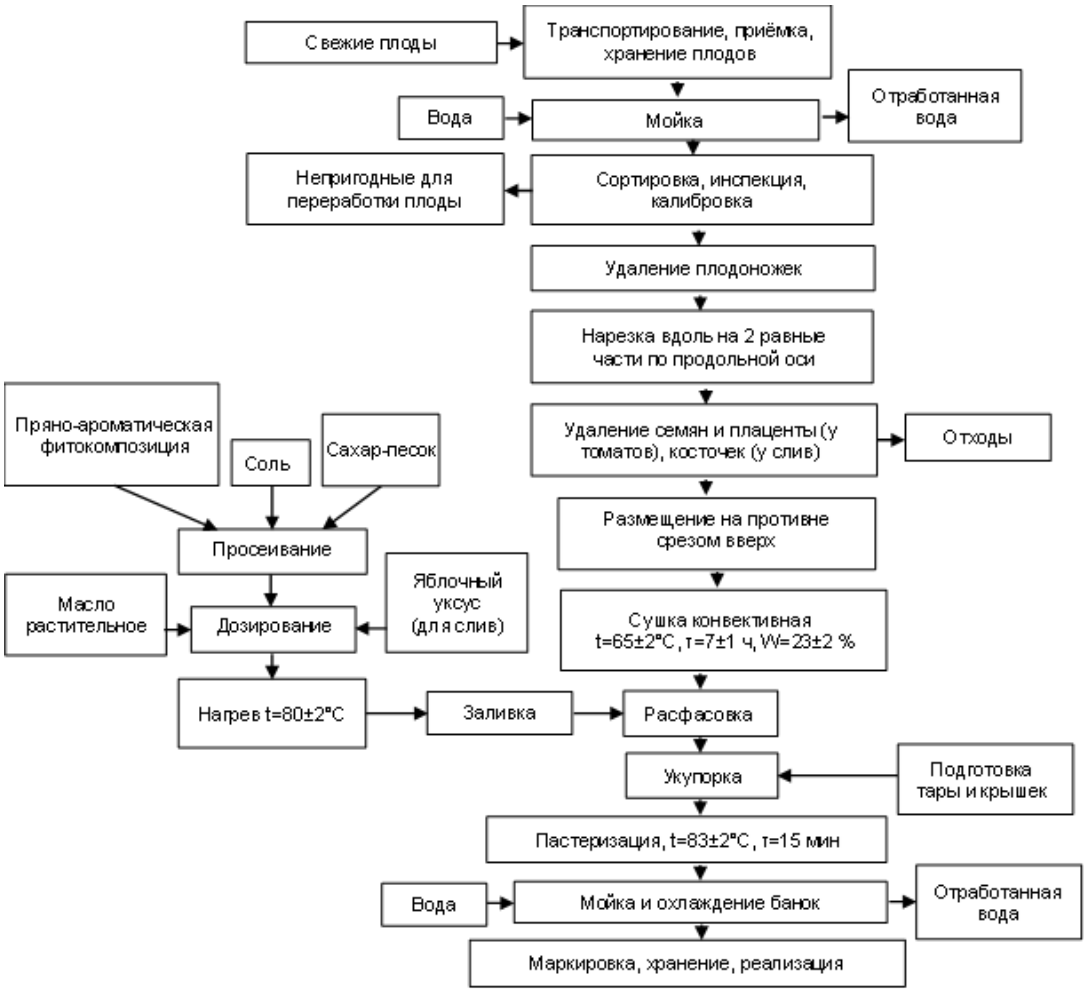


Рисунок 1 – Технологическая схема производства консервов из сушеных плодов в масле с добавлением пряно-ароматической фитокомпозиции

Figure 1 – Technological scheme for the production of canned dried fruits in oil with the addition of a spicy-aromatic phytocomposition

Таблица 1 – Расход сырья для производства консервов из сушеных слив (образец 1) и томатов (образец 2)

Table 1 – Consumption of raw materials for the production of canned dried plums (sample 1) and tomatoes (sample 2)

Наименование сырья	Образец 1			Образец 2		
	Расход на 1000 кг консервов (г)	Расход на 1000 учетных физ. банок 350 мл (кг)	Расход на 1000 условных банок 353,4 мл (кг)	Расход на 1000 кг консервов (г)	Расход на 1000 учетных физ. банок 350 мл (кг)	Расход на 1000 условных банок 353,4 мл (кг)
Слива	2252,25	1000,0	1178,00	–	–	–
Томат	–	–	–	2475,25	1178,00	1166,70
Соль пищевая	8,38	3,72	4,38	8,91	4,24	4,20
Сахар-песок	94,59	42,00	49,48	99,01	47,12	46,67
Масло растительное рафинированное	283,78	126,00	148,43	309,41	147,3	145,8
Базилик сушеный	0,56	0,25	0,29	0,62	0,30	0,29
Душица сушеная	0,56	0,25	0,29	0,50	0,24	0,23
Мята сушеная	0,09	0,04	0,05			
Розмарин сушеный	0,23	0,10	0,12	0,17	0,08	0,08
Тимьян сушеный	0,18	0,08	0,09	0,20	0,09	0,09
Чеснок сушеный гранулированный	0,45	0,20	0,24	0,45	0,21	0,21
Кардамон	0,18	0,08	0,09	0,20	0,09	0,09
Куркума	0,32	0,14	0,16	0,15	0,07	0,07
Перец красный острый	0,14	0,06	0,07	0,04	0,02	0,02
Перец черный	0,90	0,40	0,47	0,50	0,24	0,23
Яблочный уксус 6 %	7,88	3,50	4,12	–	–	–
Выход готового продукта, г	1000,00	444,00	523,03	1000,00	475,91	471,35

Таблица 2 – Физико-химические показатели плодов до и после сушки

Table 2 – Physico-chemical parameters of fruits before and after drying

№	Наименование показателя	Плоды свежие		Плоды сушеные	
		Слива	Томат	Слива	Томат
1	Массовая доля сухих веществ, %	16,6	7,4	77,0	77,0
2	Титруемая кислотность, г ЯК / 100 г	0,8	0,6	3,1	2,2
3	Общее содержание сахаров, %	11,5	3,8	58,9	22,6
4	Аскорбиновая кислота, мг/100 г	8,3	17,9	6,4	12,8
5	Фенольные вещества, мг ГКЭ/100 г	122,4	48,9	587,6	299,7
6	Каротиноиды, мг/100 г	0,2	3,1	1,7	16,5
7	Хлорофиллы, мг/100 г	0,06	0,05	0,04	0,02

В процессе создания рецептуры (табл. 1) компоненты подбирали согласно принципам безопасности, гармоничного вкусового сочетания, высокой пищевой ценности, соответствия физиологическим нормам потребления, технологичности и научной обоснованности.

Сравнение показателей химического состава свежих и сушеных плодов является важным для понимания влияния технологического процесса сушки на пищевую ценность продуктов. Сушка приводит к значительному увеличению концентрации питательных веществ на единицу массы. В ходе исследований определяли изменение физико-химических показателей качества в плодах сливы и томата (табл. 2).

Анализ результатов исследования показал, что плодовое сырье содержит высокий уровень влаги: 83,4 % (сливы) и 92,6 % (томаты). Наличие свободной воды в плодах создает оптимальные условия для пролиферации широкого спектра микроорганизмов, интенсификации метаболических процессов в клетках и тканях, ускорения биохимических превращений и быстрой деградации качественного состава.

Концентрирование сухих веществ в плодах до 77,0 % ведет к увеличению уровня большинства нелетучих компонентов на единицу массы. Общий баланс питательных веществ растет, что делает сушеные плоды ценным источником энергии, минералов и антиоксидантов. В ходе исследований установлено, что в изучаемых образцах увеличился показатель титруемой кислотности в среднем в 3,7 раза. Общее содержание сахаров возросло в 5,1 и 5,9 раза для слив и томатов соответственно.

Также наблюдается рост уровня антиоксидантов: полифенолов – в 4,8 (сливы) и 6,1 (томаты) раза, каротиноидов – в 8,5 (сливы) и 5,3 (томаты) раза. Однако некоторые водорастворимые и термолабильные соединения (аскорбиновая кислота и хлорофиллы) частично деградируют в процессе сушки – установлено снижение их уровня в среднем на 25,7 и 46,5 % соответственно.

Органолептическая оценка является критически важным этапом в контроле качества продуктов, позволяющим комплексно охарактеризовать их сенсорные свойства. При проведении исследований были проанализированы дегустационные характеристики готовых продуктов, результаты приведены в таблице 3.

Результаты анализа показали, что повышение сухих веществ в плодах привело к значительным качественным изменениям в структуре их тканей, что повлияло на сенсорные свойства продукта. Удаление влаги придало продуктам плотную, упругую консистенцию. Концентрирование вкусовых и ароматических компонентов привело к интенсификации вкуса и запаха сушеных продуктов с продолжительным послевкусием.

Таблица 3 – Результаты оценки показателей качества консервов из сушеных слив (образец 1) и томатов (образец 2) в масле с добавлением пряно-ароматической фитокомпозиции

Table 3 – The results of the evaluation of quality indicators of canned dried plums (sample 1) and tomatoes (sample 2) in oil with the addition of a spicy-aromatic phytocomposition

Показатели	Образец 1	Образец 2
Внешний вид	Половинки сушеных слив имеют правильную или слегка деформированную форму. Масло прозрачное с темным оттенком, с наличием мелких зеленовато-коричневых взвесей фитокомпозиции	Половинки сушеных томатов имеют правильную или слегка деформированную форму. Масло прозрачное, с легким желтоватым оттенком, с наличием мелких зеленовато-коричневых взвесей фитокомпозиции
Вкус	Вкус выраженный, насыщенный, сладкий с характерной сливовой кислинкой, слегка острыми, пикантными нотами. Отсутствует доминирование одной специи, сочетание компонентов фитокомпозиции гармонично сбалансированно. Послевкусие продолжительное, с выраженными пряными оттенками	Вкус выраженный, насыщенный, сладковатый с умеренной кислотностью, слегка острыми, пикантными нотами. Отсутствует доминирование одной специи, сочетание компонентов фитокомпозиции гармонично сбалансировано. Послевкусие продолжительное, с выраженными пряными оттенками
Цвет	Глубокий, темный цвет, характерный для сушеных слив: цвет кожицы от темно-коричневого до черного, с легким блеском; цвет мякоти от темно-кремового до темно-коричневого	Насыщенный, характерный для сушеных томатов, от красного до бордового
Консистенция	Мягкая, упругая, сочная. Масло хорошо распределено по всему продукту	
Запах	Сложный, сладкий аромат сушеных слив, с выраженными пряными нотами фитокомпозиции	Интенсивный, многогранный сладковатый аромат сушеных томатов с легкой кислинкой, с выраженными пряными нотами фитокомпозиции
Массовая доля плодов (по закладке), %	72,0	70,00
Минеральные примеси	отсутствуют	
Посторонние примеси	отсутствуют	

Заключение

Разработана технология производства консервов из сушеных слив и томатов в масле с добавлением пряно-ароматической фитокомпозиции. Обоснован выбор плодоовощного и пряно-ароматического сырья для производства консервов повышенной пищевой ценности. Проведены исследования физико-химических характеристик слив и томатов до и после высушивания. Показано, что повышение уровня сухих веществ в плодах при сушке до 77 % является не просто технологическим приемом, а научно обоснованной стратегией, направленной на существенное увеличение концентрации большинства макро- и микронутриентов, а также формирование уникальных органолептических характеристик продукта. Обоснованы оптимальные технологические параметры производственного процесса, разработана технологическая схема. По результатам оценки опытных образцов консервов можно сделать вывод о перспективности производства сушеных плодов в масле с фитокомпозицией для расширения ассортимента консервированной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоркина Н.А., Четаева К.Г., Шпеко А.Д. Роль государства в продвижении программ здорового питания: мировой опыт // Вопросы государственного и муниципального управления. 2024. № 2. С. 183–210. doi: 10.17323/19995431-2024-0-2-183-210.

2. Сухова А.В., Лапко И.В., Преображенская Е.А. Гигиенические основы здорового питания трудоспособного населения (обзор литературы) // Гигиена и санитария. 2024. № 103(12). С. 1521–1527. doi: 10.47470/0016-9900-2024-103-12-1521-1527.

3. Кузьмин С.В., Русаков В.Н., Сетко А.Г. Оценка состояния фактического питания населения Российской Федерации // Гигиена и санитария. 2024. № 103(1). С. 58–66. doi: 10.47470/0016-9900-2024-103-1-58-66.

4. Стародубова А.В. Можно ли считать здоровое питание инструментом здоровьесбережения? // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 2. С. 162–170. doi: 10.31857/s0869587322020098.

5. Жукова В.Ф., Сергеева Л.В. Новые направления фортификации продуктов для профилактики дефицита нутриентов в рационе // Научно-практический журнал «Российские регионы: взгляд в будущее». 2023. № 3–4. С. 23–32.

6. Закшевский В.Г., Отинова М.Е., Сальникова Е.В. Векторы и ориентиры развития рынка плодов Центрального федерального округа // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2023. № 10. С. 89–96.

7. Сайфетдинов А.Р., Лягоскина Н.Р. Современное состояние и направления развития отечественного плодоводства в условиях реализации программы импортозамещения // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. № 1(385). С. 79–84. doi: 10.55186/25876740_2022_65_1_79.

8. Леонова Н.В. Организационно-экономические аспекты развития Российского садоводства // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 1(56). С. 213–220. doi: 10.17238/issn2071-2243.2018.1.213.

9. Поперечный А.Н., Корнийчук В.Г., Владимиров С.В., Антонова В.А. Кинетика процесса сушки замороженных абрикосов в сушилке с инфракрасным нагревом // Научно-теоретический журнал «Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания». 2024. № 3. С. 211–216. doi: 10.24412/2311-6447-2024-3-211-216.

10. Иванова Э.С., Родионов Ю.В., Зорина О.А., Никитин Д.В. Инновационные конструкции и технологии сушки плодоовощной продукции // Наука в центральной России. 2021. № 1(49). С. 43–53. doi: 10.35887/2305-2538-2021-1-43-53.

11. Вакасова К.А., Жукова В.Ф. Влияние способов сушки на качество плодов абрикоса // Международная научно-практическая конференция «Роль аграрной науки в обеспечении продовольственной безопасности», Мелитополь, 21 июня 2024 г. Мелитополь: МелГУ, 2024. С. 21–25.

12. Жукова В.Ф., Вакасова К.А. Обзор технологий производства томатных продуктов с использованием принципа ксероанабиоза // Международная научно-практическая интернет-конференция преподавателей и молодых ученых «Пищевые добавки: рынок, инновации и перспективы», Донецк, 27 ноября 2024 г. Донецк : «ДонНУЭТ имени Михаила Туган-Барановского», 2024. С. 235–237.

13. Пушмина И.Н., Первышина Г.Г., Захарова Л.М., Пушмина В.В. Ресурсосберегающая схема производства сахаристых кондитерских изделий, обогащенных функциональными растительными ингредиентами // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 40(1). С. 51–60.

14. Жукова В.Ф., Карман Т.В., Рудакова А.А. Разработка технологии и оценка качества новых фруктовых соусов // Пищевая промышленность. 2024. № 10. С. 81–85. doi: 10.52653/PPI.2024.10.10.016.

15. Redondo-Cuevas L., Castellano G., Raikos V. Natural antioxidants from herbs and spices improve the oxidative stability and frying performance of vegetable oils // International Journal of Food Science and Technology. 2017. № 52(11). С. 2422–2428. doi: 10.1111/ijfs.13526.

16. Мндлян П.А., Губанова В.М. Пряно-ароматические растения, их свойства и область применения // Достижения молодежной науки для агропромышленного комплекса : сборник материалов LVI научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 14–18 марта 2022 года. Т. Часть 2. Тюмень : Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2022. С. 35–41.

17. Рахмонов К.С., Баракаев Н.Р. Влияние пряно-ароматических растений на микробиологическую стабильность хлеба при хранении // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2025. 5(134). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20114. (дата обращения: 21.07.2025).

18. Базарнова Ю.Г. Фитоэкстракты – природные ингибиторы порчи пищевых продуктов (обзор) // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2010. № 2. С. 32–42.

19. Орынбасарова Б.А., Тасыбаева Ш.Б., Оралбекова Ж., Баимбетова Ж., Бекетова А. Использование пряно-ароматических растений Южного Казахстана в производстве соусов-приправ // World science. 2018. № 2(30). С. 73–78.

20. Minocha R., Martinez G., Lyons B., Long S. Development of a standardized methodology for quantifying total chlorophyll and carotenoids from foliage of hardwood and conifer tree species // Canadian journal of forest research. 2009. № 39(4). С. 849–861.

21. Чернова Т.В., Огнев В.В., Корсунов Е.И. Томаты на юге России // Картофель и овощи. 2019. № 11. С. 20–23. doi: 10.25630/PAV.2019.26.87.005.

22. Заремук Р.Ш., Кочубей А.А. Интродукция новых сортов сливы в условиях юга России. [Электронный ресурс] // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2021. № 67(1). С. 28–43. URL: http://journalkubansad.ru/pdf/21/01/03.pdf. doi: 10.30679/2219-5335-2021-1-67-28-43.

23. Дубровская О.Ю. Биохимический состав плодов сортов и форм сливы и выделение лучших генотипов для селекционного использования и переработки: дис. ... канд. с.-х. наук / Дубровская О.Ю. Мичуринск, 2015. 130 с.

24. Гаджиева А.М., Резникова Ю.В., Мусаев М.М. Особенности химического состава томатопродуктов // Совершенствование технологических процессов в пище-

вой промышленности : сборник научных трудов преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов технологического факультета ДГТУ / отв. ред. И.А. Гаджибекова. Т. Вып. V. Махачкала : ИП Овчинников М.А. (Типография Алеф), 2016. С. 30–37.

25. Пикалева А.С. Температурная динамика показателей качества свежего томата в процессе хранения // Овощи России. 2018. № 2. С. 88–92. DOI: 10.18619/2072-9146-2018-2-88-92.

26. Попова О.Ю. Оценка потребительских свойств и биохимического состава сортов сливы коллекции ВНИИГиСПР им. И.В. Мичурина // Плодоводство и ягодоводство России. 2014. Т. 39. С. 181–184.

27. Грушин А.А., Сиднин А.С. Биохимический состав плодов сливы домашней в условиях Нижнего Поволжья // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2017. № 178(2). С. 48–55. doi: 10.30901/2227-8834-2017-2-48-55.

28. Мачулкина В.А., Санникова Т.А., Гулин А.В., Антипенко Н.И. Использование сахарно-кислотного индекса для оценки качества плодов томатов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2020. №5 (158). С.168–172.

29. Макаркина М.А., Ветрова О.А., Гуляева А.А., Куракова Т.П. Оценка сортов и гибридных форм сливы как источника биологически активных веществ // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 5. С. 69–74.

30. Заремук Р.Ш., Кочубей А.А. Оценка качества плодов гибридов сливы домашней // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2023. № 82(4). С. 28–38. doi: 10.30679/2219-5335-2023-4-82-28-38.

31. Николаева М.А., Карташова Л.В. Сравнительная товароведная характеристика косточковых плодов // Товаровед продовольственных товаров. 2023. № 10. С. 584–594.

32. Чунихина О.А., Разгонова М.П., Захаренко А.М., Голохваст К.С. Исследование плодов образцов томата Solanum lycopersicum L., происходящих из разных климато-географических зон, и идентификация метаболитов методом тандемной масс-спектрометрии. Овощи России. 2021. № (4). С. 99–104. doi: 10.18619/2072-9146-2021-4-99-104.

33. Аширов Р.Р., Фролов Д.И. Определение содержания ликопина в продуктах питания и перспективы его использования в хлебобулочных изделиях // Инновационная техника и технология. 2024. Т. 11. № 3. С. 7–12.

Информация об авторах

В. Ф. Жукова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры гостиничной и ресторанной деятельности Мелитопольского государственного университета.

Т. В. Карман – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой гостиничной и ресторанной деятельности Мелитопольского государственного университета.

К. А. Вакасова – ассистент кафедры гостиничной и ресторанной деятельности Мелитопольского государственного университета.

В. В. Коляденко – старший преподаватель кафедры гостиничной и ресторанной деятельности Мелитопольского государственного университета.

REFERENCES

1. Horkina, N.A., Chetaeva, K.G. & Shpeko, A.D. (2024). Public policy of healthy eating: Evidence from the world experience. *Public Administration*, (2), 183-210. (In Russ.). doi: 10.17323/1999-5431-2024-0-2-183-210.

2. Suhova, A.V. & Lapko, I.V., Preobrazhenskaya, E.A. (2024). Hygienic principles of healthy nutrition in the able-bodied population (literature review). *Hygiene and Sanitation*, (103(12)), 1521-1527. (In Russ.). doi: org/10.47470/0016-9900-2024-103-12-1521-1527.

3. Kuz'min, S.V., Rusakov, V.N. & Setko, A.G. (2024). Assessment of the actual nutritional status in the population of the Russian Federation. *Hygiene and Sanitation*, (103(1)), 58-66. (In Russ.). doi.org/10.47470/0016-9900-2023-103-1-58-66.

4. Starodubova, A.V. (2022). Can healthy eating be considered a health-saving tool? *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, (92(2)), 162-170. (In Russ.). doi: 10.31857/s0869587322020098.

5. Zhukova, V.F. & Sergeeva, L.V. (2023). New directions of food fortification for the prevention of nutrient deficiency in the diet. *Russian Regions: a look into the future, (*3-4), 23-32. (In Russ.).

6. Zakshevskij, V.G., Otinova, M.E. & Sal'nikova, E.V. (2023). Vectors and guidelines for the development of the fruit market of the central federal district. *Economics, labor, management in agriculture*, (10), 89-96. (In Russ.).

7. Sajfetdinov, A.R. & Lyagoskina, N.R. (2022). The current state and directions of development of domestic fruit growing in the context of the implementation of the import substitution program. *International Agricultural Journal*, (1(385)), 79-84. (In Russ.). doi: 10.55186/25876740_2022_65_1_79.

8. Leonova, N.V. (2018). Organizational and economic issues of the russian horticultural industry development. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*, (1(56)), 213-220. (In Russ.). doi: 10.17238/issn2071-2243.2018.1.213.

9. Poperechnyj, A.N., Kornijchuk, V.G., Vladimirov, S.V. & Antonova, V.A. (2024). Kinetics of the drying process of frozen apricots in a dryer with infrared heating. *Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex-healthy food products*, (3), 211-216. (In Russ.). doi: 10.24412/2311-6447-2024-3-211-216.

10. Ivanova, E.S., Rodionov, Yu.V., Zorina, O.A. & Nikitin, D.V. (2021). Innovative designs and technologies for drying fruit and vegetable products. *Science in central Russia*, 1(49), 43-53. (In Russ.). doi: 10.35887/2305-2538-2021-1-43-53.

11. Vakasova, K.A. & Zhukova, V.F. (2024). The effect of drying methods on the quality of apricot fruits. *International Scientific and Practical Conference «The role of agricultural science in ensuring food securityMelitopol»*. Melitopol: MelSU, 21-25. (In Russ.).

12. Zhukova, V.F. & Vakasova, K.A. (2024). Review of tomato products production technologies using the principle of xeroanabiosis. *International Scientific and Practical Internet Conference of teachers and Young Scientists «Food Additives: Market, innovations and prospects», Donetsk National University OF Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky*, 235-237. (In Russ.).

13. Pushmina, I.N., Pervyshina, G.G., Zaharova, L.M. & Pushmina, V.V. (2016). Resource-saving scheme for the production of sugary confectionery products enriched with functional vegetable ingredients. *Machinery and technology of food production*, (40(1)), 51-60. (In Russ.).

14. Zhukova, V.F., Karman, T.V. & Rudakova, A.A. (2024). Development of technology and quality assessment of new fruit sauces. *Food industry*, (10), 81-85. (In Russ.). doi: 10.52653/PPI.2024.10.10.016.

15. Redondo-Cuevas, L., Castellano, G. & Raikos, V. (2017). Natural antioxidants from herbs and spices improve the oxidative stability and frying performance of vegetable oils. *International Journal of Food Science and Technology,* (52(11)), 2422-2428. doi.org/10.1111/ijfs.13526.

16. Mndlyan, P.A. & Gubanova, V.M. (2022). Spicy-aromatic plants, their properties and field of application. *Proceedings of the LVI scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists.* Tyumen: State Agrarian University of the Northern Urals, 35-41. (In Russ.).

17. Rahmonov, K.S. & Barakaev, N.R. (2025). The effect of aromatic plants on the microbiological stability of bread during storage. *Universum: technical sciences : electron. scientific journal,* 5(134). Retrieved from https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20114. (In Russ.).

18. Bazarnova, Yu.G. (2010). Phytoextracts - natural food spoilage inhibitors (review). *Scientific Journal of the National Research University of ITMO*, (2), 32-42. (In Russ.).

19. Orynbasarova, B.A., Tasybaeva, Sh.B., Oralbekova, Zh., Baimbetova, Zh. & Beketova, A. (2018). The use of spicy and aromatic plants of South Kazakhstan in the production of sauces and condiments. *World science,* (2(30)), 73-78. (In Russ.).

20. Minocha, R., Martinez, G., Lyons, B. & Long, S. (2009). Development of a standardized methodology for quantifying total chlorophyll and carotenoids from foliage of hardwood and conifer tree species. *Canadian journal of forest research*, (39(4)), 849-861.

21. Chernova, T.V. Ognev, V.V. & Korsunov, E.I. (2019). Tomatoes in southern Russia. *Potatoes and vegetables, 11*, 20-23. (In Russ.). doi: 10.25630/PAV.2019. 26.87.005.

22. Zaremuk, R.Sh. & Kochubej, A.A. (2021). Introduction of new plum varieties in the conditions of Southern Russia. *Fruit growing and viticulture of Southern Russia,* 67(1), 28-43. (In Russ.). doi: 10.30679/2219-5335-2021-1-67-28-43.

23. Dubrovskaya, O.Yu. (2015). Biochemical composition of fruits of plum varieties and forms and selection of the best genotypes for breeding use and processing. Extended abstract of candidate's thesis. Michurinsk. (In Russ.).

24. Gadzhieva, A.M., Reznikova, Yu.V. & Musaev, M.M. (2016). Features of the chemical composition of tomato products. *Collection of scientific papers of teachers, staff, postgraduates and students of the Faculty of Technology of DSTU «Improvement of technological processes in the food industry»*. I.A. Gadzhibekov (Ed.), 30-37. (In Russ.).

25. Pikaleva, A.S. (2018). Temperature dynamics of fresh tomato quality indicators during storage. *Vegetable crops of Russia,* (2), 88-92. (In Russ.). doi: 10.18619/2072-9146- 2018-2-88-92.

26. Popova, O.Yu. (2014). Assessment of consumer properties and biochemical composition of plum varieties from the Collection of the I.V. Michurin All-Russian Research Institute of Genetics and Breeding of Fruit Crops. *Fruit and berry growing in Russia*. T. 39. C. 181-184. (In Russ.).

27. Grushin, A.A. & Sidnin, A.S. (2017). The study of biochemical composition of fruitsof plum in conditions of the Lower Volga Region. *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*, (178(2)), 48-55. (In Russ.). doi: 10.30901/2227-8834-2017-2-48-55.

28. Machulkina, V.A., Sannikova, T.A., Gulin, A.V. & Antipenko, N.I. (2020). The use of the sugar-acid index for assessing the quality of tomato fruits. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*, (5(158)), 168-172. (In Russ.).

29. Makarkina, M.A., Vetrova, O.A., Gulyaeva, A.A. & Kurakova, T.P. (2019). Evaluation of plum varieties and hybrids as a source of biologically active substances. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*, (5), 69-74. (In Russ.).

30. Zaremuk, R.Sh. & Kochubej, A.A. (2023). Evaluation of the fruit quality of plum hybrids // *Fruit growing and viticulture of Southern Russia*, (82(4)), 28-38. (In Russ.). doi: 10.30679/2219-5335-2023-4-82-28-38.

31. Nikolaeva, M.A. & Kartashova, L.V. (2023). Comparative commodity characteristics of stone fruits. *Commodity specialist of food products*, (10), 584-594. (In Russ.).

32. Chunihina, O.A., Razgonova, M.P., Zaharenko, A.M. & Golohvast, K.S. (2021). Research of tomatoes Solanum lycopersicum L. originating from different climatic-geographical regions and identification of metabolites by tandem mass spectrometry. *Vegetable crops of Russia,* (4), 99-104. (In Russ.). https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-4-99-104.

33. Ashirov, R.R. & Frolov, D.I. (2024). Determination of lycopene content in food products and prospects for its use in bakery products. *Innovative Machinery and Technology,* (11(3)), 7-12. (In Russ.).

Information about the authors

V.F. Zhukova - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Hotel and Restaurant Activities of Melitopol State University.

T.V. Karman - Candidate of Economics, Associate Professor, Head of the Department of Hotel and Restaurant Activities of Melitopol State University.

K.A. Vakasova - Assistant of the Department of Hotel and Restaurant Activities of Melitopol State University university.

V.V. Koliadenko - Senior lecturer at the Department of Hotel and Restaurant Activities of Melitopol State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 132–138.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 132–138.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.784.86
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.017 EDN: WFMYCP

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНА КУКУРУЗЫ НА КАЧЕСТВО ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Елена Петровна Каменская [1], Вероника Валерьевна Денисова [2]

[1, 2] Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

[1] ekam2007@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3760-6914
[2] nikulya.d@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4930-3475

Аннотация. *Одним из перспективных направлений расширения ассортимента и обогащения хлебобулочных изделий является целенаправленное изменение химического состава мучного компонента рецептурных смесей путем замены некоторого количества муки пшеничной продуктами переработки других зерновых культур, в частности, кукурузы. Целью настоящего исследования являлось изучение влияния продуктов переработки зерна кукурузы: кукурузной муки и экструдированной кукурузы на качество хлебобулочных изделий. Экструзионную обработку зерен кукурузы проводили в одношнековом пресс-экструдере КМЗ-2У, соблюдая следующие параметры: температура – 150 °С, скорость вращения шнека – 160 об/мин, диаметр матрицы – 5 мм, давление в предматричной зоне экструдера – 6,2 Мпа, продолжительность процесса – 40 с. Экструдат имел светло-желтый цвет, равномерную пористую структуру, без включений невзорванных частиц; влажность –11,5 %; кислотность – 3,6 град; число падения – 61 с. При разработке рецептур нового хлебобулочного изделия «Батон кукурузный» производилась частичная замена пшеничной муки высшего сорта кукурузной мукой (15 % и 25 %) и экструдированной кукурузой (15 % и 25 %). Оценка качества образцов готовых изделий показала эффективность применения экструдированной кукурузы при соотношении муки пшеничной высшего сорта и экструдата кукурузы 85:15, что позволило получить изделие с улучшенными качественными показателями. Внесение экструдированной кукурузы придает готовому изделию приятный запах и вкус, формируется однородная пористая структура продукта, мякиш приобретает приятный желтый оттенок, корка становится глянцевой, золотистого цвета, что обусловлено наличием в кукурузе различных пигментов каротиноидной группы.*

Ключевые слова: *зерно кукурузы, хлебобулочные изделия, кукурузная мука, экструдированная кукуруза, батон, пшеничная мука.*

Для цитирования: Каменская Е. П., Денисова В. В. Исследование влияния продуктов переработки зерна кукурузы на качество хлебобулочных изделий // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 132–138. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.017. EDN: https://elibrary.ru/WFMYCP.

Original article

A STUDY OF INFLUENCE OF CORN GRAIN PROCESSING PRODUCTS ON QUALITY OF BAKERY PRODUCTS

Elena Petrovna Kamenskaya [1], Veronica Valerievna Denisova [2]

[1, 2] Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

[1] ekam2007@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3760-6914
[2] nikulya.d@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4930-3475

Abstract. *One of the promising areas for expanding the range and enriching bakery products is a targeted change in the chemical composition of the flour component of recipe mixtures by replacing some amount of wheat flour with processed products of other grain crops, in particular, corn. The aim of this study was to investigate the effect of processed corn grain products: corn flour and extruded corn on the quality of bakery products. Extrusion processing of corn grains was carried out in a single-screw press extruder KMZ-2U, observing the following parameters: temperature - 150 °C, screw speed -160 rpm, die diameter - 5 mm, pressure in the pre-die zone of the extruder - 6,2 MPa, process duration - 40 s. The extrudate had a light-yellow color, a uniform porous structure, without inclusions of unexploded particles; humidity - 11,5 %; acidity - 3,6 degrees; falling number - 61 s. When developing the recipe for the new "Corn Loaf" bakery product, premium wheat flour was partially replaced with corn flour (15 % and 25 %) and extruded corn (15 % and 25 %). Quality assessment of finished product samples demonstrated the effectiveness of extruded corn at an 85:15 ratio of premium wheat flour to corn extrudate, resulting in a product with improved quality. The addition of extruded corn imparts a pleasant aroma and flavor to the finished product, creates a uniform porous structure, the crumb acquires a pleasant yellow hue, and the crust becomes glossy and golden, due to the presence of various carotenoid pigments in corn.*

Keywords: *corn grain, bakery products, corn flour, extruded corn, loaf, wheat flour.*

© Каменская Е. П., Денисова В. В., 2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНА КУКУРУЗЫ НА КАЧЕСТВО ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

For citation: Kamenskaya, E. P. & Denisova, V. V. (2026). A study of influence of corn grain processing products on quality of bakery products. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 132-138. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.017. EDN: https: //elibrary.ru/WFMYCP.

ВВЕДЕНИЕ

Хлебобулочные продукты входят в ежедневный пищевой рацион подавляющего большинства потребителей, поэтому существенное значение имеют исследования в области расширения ассортимента хлебобулочных изделий за счет введения в рецептуру компонентов, способствующих улучшению их потребительских свойств, модифицирующих их состав и обогащенных физиологически функциональными ингредиентами. Введение в рецептуры компонентов, придающих функциональные свойства и оказывающих положительное влияние на качественный и количественный состав рациона питания человека, позволяет эффективно решать проблемы профилактики и лечения различных заболеваний, связанных с дефицитом тех или иных пищевых веществ [1].

Одним из перспективных направлений повышения пищевой и биологической ценности хлебобулочных изделий является целенаправленное изменение химического состава мучного компонента рецептурных смесей путем замены некоторого количества муки пшеничной продуктами переработки других зерновых культур. По пищевой и потребительской ценности композиционные смеси из пшеничной муки и зерновых культур имеют преимущество перед традиционными сортами муки, вырабатываемыми из одной культуры, следовательно, позволяют создать новые изделия на основе эффекта взаимного обогащения компонентов. Хлебопекарные свойства композиционных смесей обусловлены их белково-протеиназным и углеводно-амилазным комплексами, а также водопоглотительной способностью. Эти показатели в определенной мере зависят от агротехнических условий выращивания культуры, технологии изготовления, параметров, наличия стадий гидротермической обработки зерна, которая обусловливает частичную денатурацию белков, клейстеризацию крахмала, снижение активности ферментов [2–4].

Для обогащения хлебобулочных изделий технологически целесообразно использовать продукты переработки зерновых культур, которые богаты содержанием ценных природных компонентов, например кукурузы. Значимость кукурузы как компонента питания в Европе отметили внесением ее в реестр хлебных продуктов наряду с пшеницей и рисом. В зерне кукурузы содержится 60–68 % углеводов, 7–20 % белка, 4–8 % жира, 2,5–4,3 % клетчатки и 1,5–2 % минеральных веществ [5, 6].

Кукурузная мука – порошковый продукт, состоящий из измельченных частиц эндосперма кукурузы белого и желтого цвета с примесью алейронового слоя, оболочек и зародыша. Кукурузную муку выгодно отличают высокие вкусовые качества, состав витаминов (β-каротин, A, B1, B2, PP) и богатый минеральный состав (P, Zn, Fe, K, Na, Mg, Mn, Cu, Ca и др.), а по содержанию клетчатки (0,7 г на 100 г продукта) она опережает другие злаковые культуры. Продукты переработки зерна кукурузы рекомендованы для детского и диетического питания благодаря высокой питательности, способности к активизации метаболических процессов, очищающему воздействию на организм, положительному эффекту на функции центральной нервной и женской репродуктивной систем, мочегонным свойствам и коррекции мышечной массы в сторону ее наращивания естественным путем в детском и пожилом возрасте [7, 8].

В связи с необходимостью повышения безопасности, качества, стабильности продукции, а также расширения возможностей использования растительного сырья в пищевой промышленности актуальным является применение эффективного технологического процесса – экструдирования. Экструдирование (экструзия) – это процесс получения продуктов (экструдатов) путем образования из исходного сырья под действием высокой температуры и давления вязкого расплава и его последующего продавливания шнеком через формующее отверстие или фильеру [9–11].

При экструдировании растительного сырья происходят комплекс физических, химических и биохимических процессов, которые существенно изменяют структуру и свойства исходного материала, что обусловлено воздействием высоких температур, давления и механической деформации. Эти изменения позволяют не только улучшить свойства продукта, но и сделать его более усвояемым и привлекательным. Экструдированные продукты имеют меньшую влажность и более низкую активность воды, что способствует длительному хранению без потери качества. Получаемый продукт сохраняет все витамины и физиологические активные вещества, при этом микроорганизмы уничтожаются, обеспечивая биологическую безопасность и снижая необходимость использования консервантов [12–14].

В процессе экструдирования зерна кукурузы происходят следующие изменения в структуре и свойствах питательных веществ: крахмал желатинизируется, и повышается его усвояемость; повышается переваримость белков и доступность аминокислот вследствие разрушения вторичных связей в молекулах белка; благодаря кратковременности процесса в большей степени сохраняются биологически активные вещества сырья; повышается энергетическая ценность вследствие разрыва стенок жировых клеток, возрастает стабильность жиров; повышается переваримость клетчатки вследствие истирания и дробления ее в процессе экструзии; улучшаются вкусовые качества готового продукта; формируется однородная пористая структура продукта. Экструдат кукурузы имеет высокое содержание общей энергии и низкое содержание клетчатки, является хорошим источником метионина и незаменимых жирных кислот. В 1 кг экструдата из кукурузы содержится 1,41 кормовых единиц, 42 г сырого протеина, 42 г сырого жира, 2,7 г лизина. В связи с этим продукты, приготовленные на основе экструдированного зерна кукурузы, приобретают свойства функционального назначения для питания человека [9, 10, 12, 15].

Цель настоящего исследования – изучение влияния продуктов переработки зерна кукурузы на качество хлебобулочных изделий.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на базе производственных лабораторий предприятий ТОО «Инновационные агропродукты», ТОО «Защитинский элеватор» и ТОО «Хлебозавод Каравай» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан).

Для проведения исследований использовалось следующее сырье: мука пшеничная хлебопекарная

высшего сорта; мука кукурузная; экструдированная кукуруза; дрожжи хлебопекарные прессованные; сахар-песок; соль поваренная пищевая; молоко пастеризованное, 2,5 % жирности; вода питьевая.

Для выполнения задач исследования в муке были определены показатели: органолептические свойства муки – по ГОСТ 27558-2022 «Мука и отруби. Методы исследования цвета, запаха, вкуса и хруста»; массовая доля влаги – стандартным методом с помощью высушивания в сушильном шкафу СЭШ-3М в течение 40 мин при температуре 130 ºС по ГОСТ 9404-88 «Мука и отруби. Метод определения влажности»; титруемая кислотность – по болтушке согласно ГОСТ 27493-87; зольность – по ГОСТ 27494-2016: белизна – с помощью лабораторного белизномера «Блик-РЗ», предназначенного для измерения направленного зонального коэффициента отражения света в условных единицах прибора – по ГОСТ 26361-2013; число падения – по ГОСТ 27676-88 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения числа падения»; массовую долю (%) и качество (ед. прибора ИДК-5М) сырой клейковины в муке пшеничной – по ГОСТ 27839-2013.

Экструдат кукурузы анализировали по показателям: органолептические показатели – по ГОСТ 27558-2022; влажность экструдата – по методу, представленному в ГОСТ 9404-88; кислотность – по ГОСТ 5670-96.

В готовых хлебобулочных изделиях при оценке качества показатели анализировались не ранее, чем через 4 часа и не позднее, чем через 24 часа после выпечки, с применением следующих стандартных методов: отбор образцов, определение органолептических показателей и массы хлеба – по ГОСТ 5667-2022 «Хлеб и хлебобулочные изделия. Правила приемки, методы отбора образцов, методы определения органолептических показателей и массы изделий»; определение массовой доли влаги (%) в изделиях – по ГОСТ 21094-2022 «Хлеб и хлебобулочные изделия. Метод определения влажности»; кислотность мякиша хлеба – арбитражным методом по ГОСТ 5670-96 «Хлебобулочные изделия. Метод определения кислотности»; пористость мякиша – по ГОСТ 5669-96 «Хлебобулочные изделия. Метод определения пористости» – с помощью прибора Журавлева.

Органолептическую оценку готовых образцов хлебобулочных изделий проводили с учетом следующих показателей: внешний вид (форма, поверхность, цвет), состояние мякиша, вкус, запах. Внешний вид хлеба определялся путем его осмотра. Для оценки состояния корки обращали внимание на её поверхность (ровная, неровная, гладкая, бугристая, с подрывами, с трещинами, со вздутиями), а также на правильность формы (плоская, вогнутая, выпуклая). При анализе состояния мякиша описывали его цвет (белый, серый или темный) и оттенки (сероватый, желтоватый, желтый и т.д.), а также пористость, эластичность, промес, пропеченность мякиша, равномерность его окраски. Оценивая аромат изделия, обращали внимание на наличие или отсутствие у хлеба несвойственных, посторонних и неприятных запахов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве продуктов переработки зерна кукурузы в работе использовалась кукурузная мука и экструдированная кукуруза. Экструдат был получен из нешелушенного зерна кукурузы в соответствии с технологической схемой, приведенной на рисунке 1.

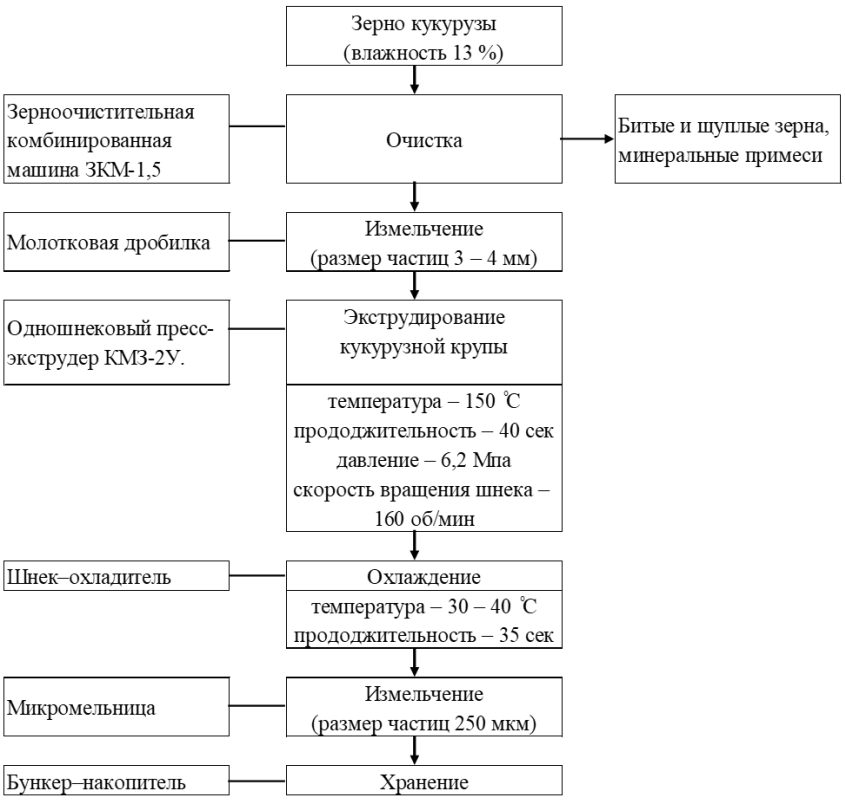


Рисунок 1 – Технологическая схема получения экструдированной кукурузы

Figure 1 – Flow chart for producing extruded corn

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНА КУКУРУЗЫ НА КАЧЕСТВО ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Исходное сырье – нешелушенное зерно кукурузы подвергали очистке на зерноочистительной комбинированной машине ЗКМ-1,5. Из зерновой массы выделялись битые и щуплые зерна, минеральные примеси, поверхность зерна очищалась от пыли. Нешелушенное зерно с массовой долей влаги 13 % подавалось в молотковую мельницу, где оно дробилось до частиц размером 3–4 мм.

Для получения продукта экструдирования использовался одношнековый пресс-экструдер КМЗ-2У. Раздробленный продукт из приемного бункера дозатором подавался в шнековую часть пресс-экструдера с диаметром выходного отверстия матрицы 8 мм. Захваченный шнеком продукт перемещался вдоль корпуса, проходил зоны сжатия, разогрева, гомогенизации, зону непосредственной экструзии и разгрузки. Продолжительность обработки составляла 40 с при температуре150 ºС; скорость вращения шнека – 160 об/мин; диаметр матрицы – 5 мм; давление в предматричной зоне экструдера – 6,2 Мпа.

После прохождения зоны формирования и разгрузки происходил мгновенный переход продукта из области высоких давлений в условия атмосферного взрыва, что сопровождалось декомпрессионным взрывом: вода, находящаяся в зерне, переходила в парообразное состояние с выделением значительного количества энергии, это приводило к деструкции клеточных структур и вспучиванию продукта. Взорванный продукт поступал в шнек-охладитель, где он одновременно гранулировался и охлаждался до температуры 30–40 ºС в течение 35 с, затем самотеком подавался в микромельницу на измельчение до размера частиц не более 250 мкм. Далее продукт экструдирования проходил через магнитную колонку и пневмотранспортом подавался в циклон бункера-накопителя.

Полученный экструдат имел светло-желтый цвет, равномерную пористую структуру, без включений невзорванных частиц крупы.

Приготовление теста, а также выпечка хлебобулочного изделия «Батон кукурузный» осуществлялись в производственных условиях ТОО «Хлебозавод Каравай». В работе использовалась мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта производства ТОО «Аском» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), мука кукурузная торговой марки «Кудесница» (АО «Петербургский мельничный комбинат», г. Санкт-Петербург).

Перед формированием мучных смесей были определены качественные показатели муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта в соответствии с ГОСТ 26574-2017, муки кукурузной – в соответствии с ГОСТ 14176-2022 и экструдата кукурузы. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели качества муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта, муки кукурузной и экструдата кукурузы
Table 1 – Quality indicators of premium wheat flour, corn flour and corn extrudate

Наименование показателя, ед. изм	Характеристика		
	Мука пшеничная высшего сорта	Мука кукурузная	Экструдат кукурузы
Цвет	Белый с кремовым оттенком	Светло-желтый	Светло-желтый
Запах	Свойственный пшеничной муке, без посторонних запахов, не затхлый, не плесневый	Свойственный кукурузной муке, без посторонних запахов, не затхлый, не плесневый	
Вкус	Свойственный пшеничной, без посторонних привкусов, не кислый, не горький	Свойственный кукурузной муке, без посторонних привкусов, не кислый, не горький	
Наличие минеральной примеси	При разжевывании хруст не ощущается		
Влажность, %	15,2	12,0	11,5
Белизна, усл. ед. РЗ-БПЛ	61,0	45,0	–
Количество клейковины, %	27,6	–	–
Качество клейковины, ед. ИДК	65,0	–	–
Число падения, с	359,0	436,0	61,0
Кислотность, град.	2,8	5,0	3,6

По основным показателям муки пшеничной высшего сорта можно сделать вывод, что она пригодна к применению при выпечке хлеба. Также оптимальные показатели количества, качества клейковины и числа падения позволяют проводить эксперименты с добавлением продуктов переработки кукурузы, не содержащих клейковины, тем самым понижающих данные качественные показатели. Кукурузная мука имела наивысший среди всех образцов показатель числа падения – 436,0 с, это свидетельствует о повышенной активности фермента α-амилазы, которая участвует в процессе брожения и влияет на хлебопекарные свойства. Оптимальное же значение кислотности – 3,6 град., не оказывающее негативного влияния на процесс хлебопечения, наблюдалось у экструдата кукурузы и превышало показатель пшеничной муки всего на 0,8 градуса.

Приготовление теста осуществлялось безопарным способом. Компоненты мучных смесей подвергались точному дозированию и смешиванию. Тесто замешивалось на двухскоростной тестомесильной машине, в соответствии с расчетными значениями компонентов по рецептуре, указанной в таблице 2. Часть пшеничной муки высшего сорта была заменена кукурузной мукой и экструдированной кукурузой. Так как замена 5 % пшеничной муки не оказывала существенного влияния на органолептические и физико-химические показатели смеси, для проведения исследований были приняты следующие образцы в процентных соотношениях:

Образец 1 – Соотношение муки пшеничной высшего сорта и кукурузной муки 85:15;

Образец 2 – Соотношение муки пшеничной высшего сорта и кукурузной муки 75:25;

Образец 3 – Соотношение муки пшеничной высшего сорта и экструдата кукурузы 85:15;

Образец 4 – Соотношение муки пшеничной высшего сорта и экструдата кукурузы 75:25.

Таблица 2 – Рецептура приготовления хлебобулочного изделия «Батон кукурузный»

Table 2 – Recipe for making a corn loaf of bread

Наименование сырья	Расход сырья, кг			
	Добавление кукурузной муки		Добавление экструдированной кукурузы	
	Образец 1 15 %	Образец 2 25 %	Образец 3 15 %	Образец 4 25 %
Мука пшеничная высшего сорта	15,47	13,65	15,47	13,65
Мука кукурузная	2,73	4,55	–	–
Экструдат кукурузы	–	–	2,73	4,55
Сахар	0,413	0,413	0,413	0,413
Соль пищевая	0,143	0,143	0,143	0,143
Дрожжи хлебопекарные прессованные	0,550	0,550	0,550	0,550
Молоко пастеризованное, 2,5 % жирности	5,69	5,69	5,69	5,69
Вода	5,69	5,69	5,69	5,69

Руководствуясь данной рецептурой, были выпечены образцы хлебобулочного изделия «Батон кукурузный» с различным содержанием продуктов переработки кукурузы.

Все компоненты рецептуры смешивались до получения теста однородной консистенции. Брожение осуществлялось при температуре 30 ºС в течение 40 минут. Конечная кислотность теста составляла не более 4,6 град. Выброженное тесто делили на заготовки массой 0,300 кг, придавали форму батона и укладывали на листы.

Продолжительность расстойки тестовых заготовок при температуре 37–38 ºС и относительной влажности воздуха 75–80 % составляла 50–60 мин. Выпечка изделий осуществлялась в увлажненной пекарной камере в течение 25–30 мин при температуре 230–240 ºС. Вес готового изделия составил 0,250 кг.

Органолептические и физико-химические показатели качества полученных образцов хлебобулочных изделий представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика качественных показателей образцов хлебобулочных изделий

Table 3 – Comparative characteristics of quality indicators of bakery product samples

Показатель	Образец			
	Образец 1 (15 %кукурузной муки)	Образец 2 (25 %кукурузной муки)	Образец 3 (15 % экструдата кукурузы)	Образец 4 (25 %экструдата кукурузы)
Органолептические показатели				
Внешний вид:				
Форма	Продолговато-овальная, соответствующая данному виду изделий			
Поверхность	Мучнистая, с косыми надрезами, наблюдаются трещины и подрывы		Мучнистая, с косыми надрезами, без трещин и подрывов	Мучнистая, шероховатая с косыми надрезами, без трещин и подрывов
Цвет	Кремово-желтый белёсый		Желто-коричневый	
Состояние мякиша:				
Пропеченность	Пропеченный, не влажный на ощупь. Эластичный	Пропеченный, не влажный на ощупь. Не эластичный	Пропеченный, не влажный на ощупь. Эластичный	Пропеченный, не влажный на ощупь. Не эластичный
Промес	Без комочков и следов непромеса			
Пористость	Развитая, равномерная, без пустот и уплотнений	Неравномерная, плотная, с пустотами	Развитая, равномерная, без пустот и уплотнений	Неравномерная, рыхлая, с пустотами, отходит от корки
Вкус	Свойственный данному виду изделия, с легким привкусом кукурузы			
Запах	Свойственный данному виду изделия, с легким ароматом кукурузы		Свойственный данному виду изделия, с выраженным ароматом кукурузы	
Физико-химические показатели				
Влажность мякиша, %	42,4	41,6	42,0	41,6
Кислотность мякиша, град	2,8	3,0	2,6	2,8
Пористость мякиша, %	75,0	71,0	73,0	68,0

При анализе органолептических и физико-химических показателей установлено, что во все образцы соответствовали требованиям ГОСТ 31805-2018. Результаты, представленные в таблице 3, выявили влияние дозировок продуктов переработки кукурузы, вносимых в мучную смесь на органолептические и физико-химические показатели качества хлебобулочных изделий. Так, образец 3, содержащий в составе 15 % экструдированной кукурузы, имел более привлекательный, золотистый цвет корки, в отличие от образцов 1 и 2 с кукурузной мукой, отличающихся бледной окраской корки с элементами белёсости и разрывами на поверхности, что является следствием повышенной кислотности кукурузной муки. Увеличение содержания количества экструдата в образце 4 до 25 % негативно влияло на качество изделия, понижая влажность теста и повышая автолитическую активность, что закономерно приводит к потемнению и разрывам корки, а также к уменьшению объема.

Среди всех образцов лучшими показателями качества мякиша обладали образцы 1 и 3 с 15 %-м содержанием вносимых продуктов переработки кукурузы. Образец 3 имел более развитую, равномерную, без пустот и уплотнений пористость и светло-желтый цвет мякиша. В образцах 2 и 4 мякиш был плотный, неравномерный, отстающий от корки хлеба.

Следует отметить, что при дозировке 25 % кукурузной муки или экструдированной кукурузы наблюдалось потемнение мякиша хлеба, изделия имели непривлекательный вид (низкий объем хлеба, неразвитую пористость и неровную поверхность). Данный эффект, вероятно, вызван уменьшением массовой доли клейковины в тесте за счет замены части пшеничной муки кукурузной, не содержащей в своем составе клейковинных белков. Вследствие этого снижалась формоудерживающая способность теста, повышалась массовая доля свободной влаги и, как следствие, готовые изделия получались плотными. В целом, при использовании экструдированной кукурузы (в 15 %-й дозировке) отмечалось улучшение показателей качества готовых хлебобулочных изделий, а именно наблюдалось увеличение объема изделия, его пористости, отмечался более выраженный вкус кукурузы за счет большего размера частиц по сравнению с кукурузной мукой.

При анализе физико-химических показателей выявлено, что все образцы имели близкие значения по влажности и кислотности в отличие от показателя пористости мякиша, который обладал большей вариативностью. Максимальное значение пористости (75 %) было отмечено в образце 1, а минимальное (68 %) – в образце 4.

Кроме того, употребление 100 г хлебобулочного изделия с добавлением 15 % экструдата кукурузы (образец 3) позволяет удовлетворить суточную физиологическую потребность для взрослых в минеральных веществах, таких как железо и цинк в среднем на 35 % и 27 % соответственно.

ВЫВОДЫ

Исследования показали целесообразность проведения экструзионной обработки нешелушенного зерна кукурузы в одношнековом пресс-экструдере при соблюдении следующих параметров: температура – 150 ºС, влажность зерна – 13 %, скорость вращения шнека – 160 об/мин, диаметр матрицы – 5 мм, давление в предматричной зоне экструдера – 6,2 Мпа, продолжительность процесса – 40 с. Полученный экструдат зерна имел влажность 11,5 %, кислотность 3,6 град, светло-желтый цвет, равномерную пористую структуру, без включений не взорванных частиц крупы.

Установлено, что соотношение муки пшеничной высшего сорта и экструдата кукурузы 85:15 позволяет получить изделие с улучшенными органолептическими показателями. Внесение экструдированной кукурузы придает готовому изделию приятный запах и вкус, формируется однородная пористая структура продукта, более доступная для воздействия ферментов в пищеварительной системе. Мякиш изделия приобретает приятный желтый оттенок, корка становится глянцевой, золотистого цвета, что обусловлено наличием в кукурузе различных пигментов каротиноидной группы, наибольшую часть из которых занимает пигмент ксантофилл, устойчивый к действию тепловой обработки и изменениям реакции среды. Данный факт исключает необходимость использования искусственных красителей.

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили эффективность применения экструдированной кукурузы с оптимальной дозировкой в хлебопечении, позволили разработать новую рецептуру хлебобулочного изделия «Батон кукурузный» с улучшенными качественными показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пащенко Л.П., Жаркова И.М. Технология хлебобулочных изделий. М. : КолосС, 2006. 389 с.

2. Боряев В.Е. [и др.] ; под редакцией В.И. Теплова. Функциональные продукты питания. Белгород : Кооперативное образование, 2005. 415 с.

3. Зверев С.В., Зверева Н.С. Функциональные зернопродукты. М. : ДеЛи принт, 2006. 119 с.

4. Усембаева Ж.К., Даутканова Д.Р., Мусаева С.Д. [и др.]. Использование кукурузной муки в производстве пшеничного хлеба // Хранение и переработка зерна. 2004. № 11(65). С. 37–38.

5. Айрумян В.Ю., Сокол Н.В., Ольховатов Е.А. Химический состав продуктов переработки зерна риса и кукурузы для повышения пищевой и биологической ценности хлебобулочных изделий // Ползуновский вестник. 2020. № 3. С. 3–10.

6. Денисова В.В., Каменская Е.П. Использование кукурузной муки и экструдированной кукурузы при производстве хлебобулочных изделий // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Бийск : Изд-во АлтГТУ, 2024. С. 394–397.

7. Зеленская Г.А., Храпко О.П. Использование белозерной кукурузы в технологии производства хлеба // В сборнике : Инновационные технологии в АПК ; материалы Международной научно-практической конференции ; общ. ред. В.А. Бабушкин. 2018. С. 305−307.

8. Шаззо А.А., Бутина Е.А., Герасименко Е.О. Существующие и перспективные направления комплексной переработки зерна кукурузы // Новые технологии. 2011. № 2. С. 54–58.

9. Пахомов В.И., Рудой Д.В., Тупольских Т.И. [и др.]. Технологии и оборудование для экструдирования растительного сырья : учеб. пособие / Донской гос. техн. ун-т. Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2018. 108 с.

10. Сушкова В.И., Воробьева Г.И. Безотходная конверсия растительного сырья и биологически активные вещества. М. : ДеЛи принт, 2008. 216 с.

11. Остриков А.Н., Абрамов О.В., Рудометкин А.С. Экструзия в пищевой технологии. СПб. : ГИОРД, 2004. 288 с.

12. Мартиросян В.В. Научные и практические аспекты применения экструдатов зернового сырья в техно-

логии профилактических пищевых продуктов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2013. 50 с.

13. Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview / W. Leonard, P. Zhang, D. Ying [et al.] // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2020. Vol. 19, № 1. P. 218–246.

14. Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review / M.S. Alam, J. Kaur, H. Khaira [et al.] // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2016. Vol. 56, № 3. P. 445–473.

15. Денисова В.В., Каменская Е.П. Способ приготовления экструдированной кукурузы // Приднепровский научный вестник. 2025. № 2. С. 100–103.

Информация об авторах

Е. П. Каменская – кандидат биологических наук, доцент кафедры «Технология хранения и переработки зерна», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

В. В. Денисова – магистрант кафедры «Технология хранения и переработки зерна», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

REFERENCES

1. Pashchenko, L.P. & Zharkova, I.M. (2006). Technology of Bakery Products. Moscow : KolosS. (In Russ.).

2. Boryaev, V.E. [et al.]; edited by V.I. Teplov. (2005). Functional Food Products. Belgorod : Kooperativnoe obrazovanie. (In Russ.).

3. Zverev, S.V. & Zvereva, N.S. (2006). Functional Grain Products. Moscow : DeLi Print. (In Russ.).

4. Usembaeva, Zh.K., Dautkanova, D.R., Musaeva, S.D. [et al.]. (2004). Use of Corn Flour in the Production of Wheat Bread. *Storage and Processing of Grain*, 11(65), 37-38. (In Russ.).

5. Airumyan, V.Yu., Sokol, N.V. & Olkhovatov, E.A. (2020). Chemical composition of processed rice and corn grain products to increase the nutritional and biological value of bakery products. *Polzunovsky Vestnik*, (3), 3-10. (In Russ.).

6. Denisova, V.V. & Kamenskaya, E.P. (2024). Use of corn flour and extruded corn in the production of bakery products. *Technologies and equipment for the chemical, biotechnological and food industries: proceedings of the XVII All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation*. Biysk: Publishing house of Altai State Technical University, 394-397. (In Russ.).

7. Zelenskaya, G.A. & Khrapko, O.P. (2018). Use of white-grained corn in bread production technology. *In the collection: Innovative technologies in the agro-industrial complex; Proceedings of the International scientific and practical conference*, 305-307. (In Russ.).

8. Shazzo, A.A., Butina, E.A. & Gerasimenko, E.O. (2011). Existing and promising areas of complex processing of corn grain. *New technologies*, (2), 54-58. (In Russ.).

9. Pakhomov, V.I., Rudoy, D.V., Tupolskikh, T.I. [et al.]. (2018). Technologies and equipment for extrusion of plant raw materials : textbook / Don State Technical University. Rostov-on-Don: DSTU. (In Russ.).

10. Sushkova, V.I. & Vorobyeva, G.I. (2008). Waste-free conversion of plant raw materials and biologically active substances. Moscow : DeLi print. (In Russ.).

11. Ostrikov, A.N., Abramov, O.V. & Rudometkin, A.S. (2004). Extrusion in food technology. St. Petersburg : GIORD. (In Russ.).

12. Martirosyan, V.V. (2013). Scientific and practical aspects of the use of grain raw material extrudates in the technology of preventive food products: Abstract of a PhD thesis. Moscow. (In Russ.).

13. Leonard, W., Zhang, P., Ying, D. & Fang, Z. (2020). Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,* 19(1), 218-246.

14. Alam, M.S., Kaur, J., Khaira, H. & Gupta**,** K. (2016). Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 445-473.

15. Denisova, V.V. & Kamenskaya, E.P. (2025). Method for preparing extruded corn. *Pridneprovsky Scientific Bulletin,* (2), 100-103. (In Russ.).

Information about the authors

E.P. Kamenskaya - Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Department of Grain Storage and Processing Technology, Polzunov Altai State Technical University.

V.V. Denisova - Master's Student of the Department of Grain Storage and Processing Technology, Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 139–142.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 139–142.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.022.3021.465
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.018 EDN: RPSFNM

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ С ДОБАВЛЕНИЕМ МУКИ ИЗ СЕМЯН ТЫКВЫ

Марина Александровна Вайтанис

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия
Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
gazenauer@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5012-6304

Аннотация. *Овощные блюда составляют незаменимую часть рациона питания каждого человека. Целью работы является исследование качества пищевой системы на основе овощей, состоящей из картофеля и капусты белокочанной с мукой из семян тыквы. Объектом исследования являются опытные образцы пищевой системы на основе овощей с добавлением муки из семян тыквы. Предмет исследования – органолептические и функционально-технологические показатели: влагоудерживающая, влагосвязывающая и эмульгирующая способности, pH, адгезия пищевой системы и показатели микробиологической безопасности овощных изделий (котлет). Наилучшие органолептические показатели отмечаются у образцов с заменой овощной части на муку из семян тыквы в количестве 10 % и 15 %. Установлено, что замена овощной части на муку из семян тыквы в диапазоне от 5 % до 30 % способствует увеличению влагоудерживающей, влагосвязывающей и эмульгирующей способности пищевой системы на 22,0 %, 21,8 % и 10,0 % соответственно. Кроме того, замена овощной части на муку из семян тыквы способствует снижению адгезионных свойств пищевой системы на 22,5 Па в сравнении с контрольным образцом (с содержанием муки пшеничной). Проведена оценка показателей микробиологической безопасности овощных изделий с мукой из семян тыквы в количестве 10 % и 15 % после приготовления их разными способами тепловой обработки.*

Ключевые слова: *пищевая система, овощи, тыквенная мука, картофель, капуста белокочанная, овощные изделия, органолептические, функционально-технологические показатели.*

Для цитирования: Вайтанис М. А. Исследование качества пищевых систем с добавлением муки из семян тыквы // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 139–142. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.018. EDN: https://elibrary.ru/RPSFNM.

Original article

RESEARCH ON QUALITY OF FOOD SYSTEMS WITH PUMPKIN SEED FLOUR ADDED

Marina A. Vaytanis

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia
Altai State University, Barnaul, Russia
gazenauer@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5012-6304

Abstract. *Vegetable dishes are an indispensable part of every person's diet. The purpose of this work is to study the quality of a vegetable-based food system consisting of potatoes and white cabbage with pumpkin seed flour. The object of this study is the experimental samples of a vegetable-based food system with the addition of pumpkin seed flour. The subject of the study is the organoleptic and functional-technological indicators: moisture-retaining, moisture-binding, and emulsifying abilities, pH, adhesion of the food system, and microbiological safety indicators of vegetable products (cutlets). The best organoleptic indicators were observed in samples with 10 % and 15 % replacement of the vegetable part with pumpkin seed flour. It has been established that replacing the vegetable part with pumpkin seed flour in the range of 5 % to 30 % increases the moisture-retaining, moisture-binding, and emulsifying properties of the food system by 22.0 %, 21.8 %, and 10.0 %, respectively. Additionally, replacing the vegetable part with pumpkin seed flour reduces the adhesive properties of the food system by 22.5 Pa compared to the control sample (containing wheat flour). The microbiological safety of vegetable products with pumpkin seed flour in amounts of 10 % and 15 % was evaluated after cooking using different methods of heat treatment.*

Keywords: *food system, vegetables, pumpkin flour, potatoes, white cabbage, vegetable products, organoleptic and functional-technological indicators.*

For citation: Vaytanis, M. A. (2026). Research on quality of food systems with pumpkin seed flour added. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 139-142. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.018. EDN: https: //elibrary.ru/RPSFNM.

© Вайтанис М. А., 2026

ВВЕДЕНИЕ

Значение овощей в питании человека многогранно и обусловлено генетическими особенностями организма, для которого требуются растительный белок, пищевые волокна и другие важные элементы.

Целебные свойства овощей известны издревле и широко используются в народной и клинической медицине для лечения и профилактики различных заболеваний человека: сердечно-сосудистых, нервных, кожных, желудочно-кишечных и других [1, 2, 3].

Овощи улучшают процесс пищеварения, поддерживают кислотно-щелочной баланс и жидкостный обмен в организме. Являясь одним из основных источников витаминов, они также богаты углеводами, минеральными и ароматическими веществами [2–5].

Полезные свойства овощей и плодов обусловлены их химическим составом. Так, картофель содержит необходимые организму человека вещества: витамины С, РР, группы В, каротин, а также является источником углеводов (крахмала) и клетчатки [6].

Капустные овощи богаты сахарами, минеральными веществами (калий, кремний, магний, фосфор, железо, марганец, молибден и цинк), пищевыми волокнами. Они содержат витамины: B_1, B_2, B_9, РР, С [6].

Мука из семян тыквы стала популярна среди потребителей и производителей пищевой продукции. Так, тыквенную муку используют при производстве хлебобулочных, кондитерских и макаронных изделий, а также в пюреобразных супах и мясных изделиях. Об этом свидетельствует анализ публикаций по данной тематике [1, 4–10].

Польза переработанных семян тыквы во многом схожа с пользой самой тыквы. Мука имеет уникальный состав, обогащенный множеством витаминов, минералов и аминокислот. В ней содержатся витамины С, РР, группы В, растительные белки, пищевые волокна, минеральные соединения цинка, кальция, фосфора, калия, магния, биофлавоноиды и аминокислоты (аргинин, лизин, изолейцин и фенилаланин). Мука из тыквенных семечек положительно влияет на работу имунной системы [3–6, 8–10].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка пищевой системы на основе овощных ингредиентов в сочетании с тыквенной мукой для дальнейшего производства из них овощных полуфабрикатов и изделий.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ:

- составить опытные образцы пищевой системы на основе овощей с частичной заменой овощной части на тыквенную муку;
- определить показатели качества опытных образцов пищевой системы на основе овощей с тыквенной мукой в сравнении с контрольным образцом;
- определить микробиологические показатели изделий из овощей в сочетании с тыквенной мукой, приготовленных разными способами тепловой обработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При составлении опытных образцов пищевой системы использовали следующее сырье: картофель свежий продовольственный, капусту белокочанную свежую, муку из тыквенных семечек (фирма С. Пудовъ) и другие ингредиенты, входящие в рецептуру. Все сырье для приготовления пищевой системы по качеству отвечало требованиям нормативно-технической документации [10].

Показатели качества опытных образцов пищевой системы и овощных изделий определяли по общепринятым методикам [12–14].

РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью разработки рецептуры овощных полуфабрикатов и изделий на основе картофеля и белокочанной капусты были составлены опытные образцы. Составление образцов осуществлялось исходя из внесения различного количества тыквенной муки (от 5 % до 30 %) взамен овощных ингредиентов. В ходе проведения исследования составленных опытных образцов осуществляли сравнение с контрольным образцом (с добавлением муки пшеничной). Результаты органолептической оценки пищевой системы на основе картофеля и белокочанной капусты с мукой из семян тыквы приведены на рисунке 1.

Рисунок 1 – Органолептическая оценка пищевой системы

Figure 1 – Organoleptic evaluation of the food system

Согласно полученным результатам (рисунок 1), установлено, что образцы с заменой овощной части на муку из семян тыквы в количестве 10 % и 15 % получили максимальное количество баллов в сравнении с контрольным образцом. Внесение муки из семян тыквы позволяет добиться наиболее оптимальных цвето-ароматических и вкусовых результатов, а также придать необходимую консистенцию пищевой системе. В целом пищевая система на основе овощей по внешнему виду представляет собой хорошо перемешенную массу с равномерно распределенными в ней ингредиентами, входящими по рецептуре и сохраняющую форму. Консистенция пищевой системы представляет собой пластичную массу. Запах и вкус пищевой системы, свойственный компонентам, входящих в состав, без посторонних запахов и привкусов. Привкус муки из семян тыквы усиливается при замене овощной части в количестве от 25 % до 30 %. Цвет – свойственный ингредиентам, входящих в состав пищевой системы. Замена овощной части на муку из семян тыквы в количестве от 20 % до 30 % придает образцам зеленоватый оттенок с дальнейшим усилением оттенка соответственно.

В ходе исследования были определены функционально-технологические показатели пищевой системы, результаты которых представлены на рисунках 2–3.

На рисунке 2 видно, что замена овощной части на муку из семян тыквы оказывает незначительно изменение pH среды, увеличение составляет на 0,6 ед.

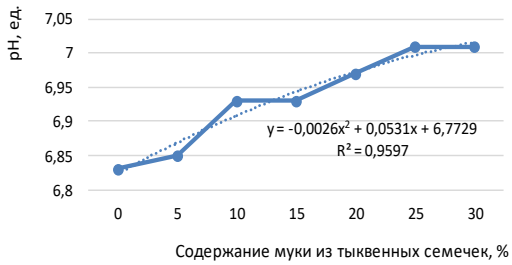


Рисунок 2 – Изменение pH пищевой системы от количества внесения муки из семян тыквы

Figure 2 – Change in pH of the food system depending on the amount of pumpkin seed flour added

Замена овощной части на тыквенную муку способствует увеличению влагоудерживающей способности пищевой системы. Влагоудерживающая способность возрастает на 22 % в сравнении с контрольным образцом. Возрастание влагоудерживающей способности исследуемых образцов отмечается при замене овощной части на 5 % и более. При замене овощной части на 25 % муки из семян тыквы отмечается высокое значение влагоудерживающей способности пищевой системы.

Замена овощной части на муку из семян тыквы приводит к возрастанию влагосвязывающей способности пищевой системы, и увеличение составляет на 21,8 % в сравнении с контрольным образцом. Максимальное значение влагосвязывающей способности отмечается при 30 % замене овощной части (86,2 %) в сравнении с контролем (64,4 %).

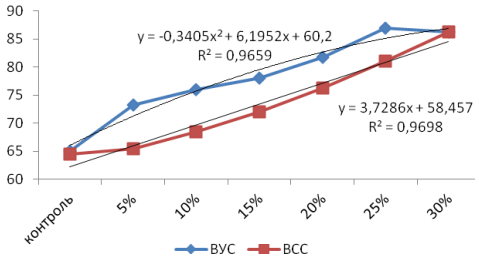


Рисунок 3 – Зависимость влагоудерживающей, влагосвязывающей способности пищевой системы из овощей от содержания муки из семян тыквы

Figure 3 – Dependence of the moisture-retaining and moisture-binding capacity of a food system made from vegetables on the content of pumpkin seed flour

С целью снижения потерь на этапе производства овощных полуфабрикатов и доведения их до готовности были исследованы адгезионные свойства пищевой системы, результаты представлены на рисунке 4.

Установлено, что замена овощной части на муку из семян из тыквы способствует снижению адгезионных свойств, что является благоприятным производственным фактором. Адгезия снизилась на 22,5 Па в сравнении с контрольным образцом.

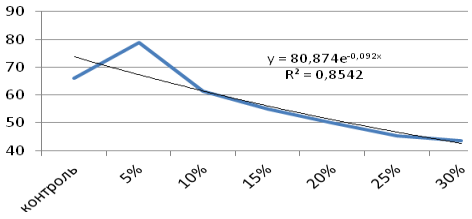


Рисунок 4 – Зависимость адгезии пищевой системы из овощей от содержания муки из семян тыквы

Figure 4 – Dependence of adhesion of a food system from vegetables on the content of pumpkin seed flour

При замене овощной части на муку из семян тыквы в количестве 5 % отмечается высокое значение адгезии (79 Па) в сравнении с контрольным образцом (66 Па), что объясняется небольшим количеством внесенной муки из семян тыквы в пищевую систему.

Замена овощной части на муку из семян тыквы (30 %) способствует изменению консистенции пищевой системы, делая ее менее липкой и плохо формующейся. В целом замена овощной части на муку из семян тыквы (10–30 %) приводит к снижению адгезионных свойств пищевой системы относительно контрольного образца с пшеничной мукой.

Зависимость эмульгирующей способности от доли внесения муки из семян тыквы представлено на рисунке 5.

Согласно полученным данным (рисунок 5), вносимая мука из семян тыквы хорошо эмульгирует жир и удерживает растительное масло в сравнении с контрольным образцом, который содержит муку пшеничную.

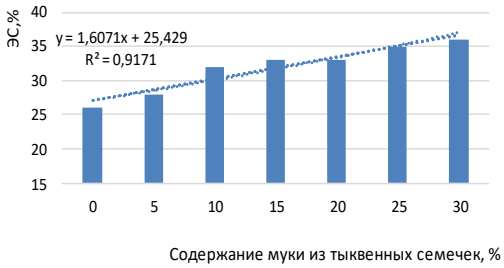


Рисунок 5 – Изменение эмульгирующей способности пищевой системы от количества муки из семян тыквы

Figure 5 – Change in the emulsifying capacity of the food system depending on the amount of pumpkin seed flour

В результате проведенных органолептических и функционально-технологических показателей выбрали наилучшие образцы пищевой системы, из которых были выработаны котлеты с использованием различных способов тепловой обработки и исследованы показатели микробиологической безопасности.

Результаты микробиологической безопасности приведены в таблице 1.

Согласно данным, представленным в таблице 1, овощные котлеты с заменой овощной части на муку из семян тыквы в количестве 10 % и 15 % по показателям микробиологической безопасности соответствуют требованиям ТР ТС 021/2011 [11].

Таблица 1 – Показатели микробиологической безопасности овощных изделий с мукой из семян тыквы
Table 1 – Microbiological safety indicators for vegetable products with pumpkin seed flour

Наименование показателей	ПДК по ТР ТС 021/2011	Результаты исследования
Котлеты овощные жареные с добавлением 10 % тыквенной муки		
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	5×10^2	$0,4\times10^2$
БГКП (колиформы), не допускаются в массе продукта, г ($см^3$)	1,0	Не обнаружено
Дрожжи, КОЕ/г, не более	50	6
Котлеты овощные жареные с добавлением 15 % тыквенной муки		
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	5×10^2	$0,2\times10^2$
БГКП (колиформы), не допускаются в массе продукта, г ($см^3$)	1,0	Не обнаружено
Дрожжи, КОЕ/г, не более	50	13
Котлеты овощные, приготовленные на пару с добавлением 10 % тыквенной муки		
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	5×10^2	$0,4\times10^2$
БГКП (колиформы), не допускаются в массе продукта, г ($см^3$)	1,0	Не обнаружено
Дрожжи, КОЕ/г, не более	50	6
Котлеты овощные, приготовленные на пару с добавлением 15 % тыквенной муки		
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	5×10^2	$0,2\times10^2$
БГКП (колиформы), не допускаются в массе продукта, г ($см^3$)	1,0	Не обнаружено
Дрожжи, КОЕ/г, не более	50	12

ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности замены овощной части, состоящей из картофеля и капусты белокочанной на муку из семян тыквы. Это способствует улучшению органолептических и функционально-технологических показателей овощных полуфабрикатов и изделий. Замена овощной части на тыквенную муку способствует увеличению влагоудерживающей, влагосвязывающей и эмульгирующей способностей на 22,0 %, 21,8 % и 10,0 % соответственно. Также установлено, что адгезионные свойства пищевой системы на основе овощей с мукой из семян тыквы снижаются на 22,5 %, что является благоприятным производственным фактором.

При выработке овощных котлет можно проводить замену овощной части на 10 % и 15 % муки из семян тыквы. Исследование показателей микробиологической безопасности пищевой системы подтвердила о соответствии ее требованиям ТР ТС 021/2011 [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников А.Н. Использование муки из мякоти и семян тыквы в рецептурах мучных изделий / А.Н. Сапожников, А.В. Копылова, Е.Э. Габрельян // Вестник КрасГАУ. 2022. № 3. С. 199–209. DOI: 10.36718/ 1819-4036-2022-3-199-209.
2. Вайтанис М.А. Перспективы расширения ассортимента взбитых овощных блюд / М.А. Вайтанис, З.Р. Ходырева // Ползуновский вестник. 2024. № 2, С. 89–95. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.011. EDN: https://elibrary.ru/INMXQZ.
3. Вайтанис М.А. Исследование реологических свойств пищевой системы для суфле на основе тыквы / М.А. Вайтанис, З.Р. Ходырева // Ползуновский вестник. 2023. № 4, С. 154–126. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.020.
4. Рушиц А.А. Использование тыквенной муки в производстве бисквитного полуфабриката // Вестник ЮУрГУ. Пищевые и биотехнологии. 2015. Т. 3, № 4. С. 23–29.
5. Karanja J.K. Nutritional Composition of the Pumpkin (Cucurbita spp.) / J.K. Karanja, B.J. Mugendi, F.M. Khamis, A.N. Muchugi // LWT Food Sci. Technol. 2013. № 4. P. 17–22.
6. Тутельян В.А. Химический состав и калорийность Российских пищевых продуктов питания : справочник. М. : Дели плюс, 2012. 284 с.
7. Егорова Е.Ю. Потребительские свойства хлебобулочных изделий с добавлением муки из семян тыквы / Е.Ю. Егорова, С.С. Кузьмина // Ползуновский вестник. 2017. № 3, С. 32–36.
8. Enhancing bioactive compound and antioxidant activity of cake by using pumpkin powder / S. Akter [et al.] // Current Nutrition & Food Science. 2020. Vol. 16, iss. 9. P. 1431–1438.
9. Effect of the addition of pumpkin powder on the physicochemical qualities and rheological properties of wheat flour / L. Apostol, C. Moşoiu, C.S. Iorga, S.A. Martínez // Romanian Biotechnological Letters. 2020. Vol. 25, V. 3. P. 1594–1600.
10. Каримова Ш.М. Изучение состава муки из тыквенных семечек // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2025. 5 (134).
11. О безопасности пищевой продукции: технический регламент таможенного союза № 021/2011: [принят решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 880]. Москва : Изд-во стандартов, 2011. 242 с.
12. ГОСТ 31986-2012. Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания [Текст] : введен 2015-01-01. Москва : Изд-во стандартов, 2012. 12 с.
13. ГОСТ Р 54607.9-2016. Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции общественного питания. Часть 9. Микробиологические испытания [Текст] : введен 2017-01-01. Москва : Изд-во стандартов, 2016. 11 с.
14. Методы исследования мяса и мясных продуктов / Л.В. Антипова, И.А. Глотова, И.А. Рогов. М. : Колос, 2001. 376 с.

Информация об авторах

М. А. Вайтанис – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии продуктов питания» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова; доцент кафедры «Рекреационной географии, сервиса, туризма и гостеприимства» Алтайского государственного университета.

Information about the authors

M.A. Vaytanis - Candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department "Technology of food products" Altai state technical University; associate Professor of the Department "Recreational geography, service, tourism and hospitality" of the Altai state University.

Автор заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The author declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 143–148.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 143–148.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.951
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.019 EDN: AWNSJG

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЕВОГО МОЛОКА В ТЕХНОЛОГИИ РЫБОРАСТИТЕЛЬНЫХ КОНСЕРВОВ

Екатерина Александровна Речкина [1], Жанна Александровна Кох [2], Галина Александровна Губаненко [3], Дарья Андреевна Черемных [4]

[1] ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», г. Красноярск, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск, Россия
[3, 4] ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия
[1] rechkina.e@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-8045-9529
[2] jannetta-83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4016-7596
[3] gubanenko@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-3049-0835
[4] darya.cheremnykh.94@mail.ru,https://orcid.org/0000-0001-5421-8791

Аннотация. *В связи с динамичным ростом населения, расширением городов и повышением уровня жизни во всем мире возникает необходимость в более эффективном использовании имеющихся белковых ресурсов, а также в создании инновационных и экологически безопасных методов производства продуктов питания. Благодаря высокому содержанию белка соя представляет собой превосходный источник полноценного белка, включающего в себя значительное количество незаменимых аминокислот, которые не вырабатываются человеческим организмом самостоятельно. В настоящее время на рынке представлен широкий ассортимент соевых продуктов. Некоторые из них изготавливаются с применением передовых технологий на крупных предприятиях пищевой промышленности. Соевые бобы могут быть переработаны таким образом, чтобы имитировать текстуру и внешний вид различных продуктов, включая мясные и рыбные изделия. В результате исследования по отработанной технологии получили соевое молоко из сорта сои СИБНИИК с высокими физико-химическими показателями качества содержания белка 3,57 %, жиров 2,57 %, углеводов 0,46 % и минеральных веществ: кальция – 80,69 мг/кг, железа – 6,03 мг/кг. Соевое молоко не содержит лактозы и глютена, что делает его подходящей заменой коровьего молока во многих случаях, в том числе при производстве рыбных и растительных консервов. При разработке рецептуры рыборастительного рийета в образцах была сделана замена сливочного масла на соевое молоко. Оптимальное количество отварной тыквы в рецептуре определили, заменяя основное рыбное сырье на растительное в дозировке 10 %, 20 %, 30 %. Рийет с заменой рыбного сырья на отварную тыкву в количестве 20 % по показателям качества превосходил контрольный, № 1 и № 3 образцы. Его уникальная рецептура и сбалансированный компонентный состав делают рийет идеальным для тех, кто заботится о своём здоровье и хочет разнообразить свой рацион.*

Ключевые слова: *соя, соевые бобы, соевое молоко, биохимический состав, рыборастительные консервы, рийет, рецептура, показатели качества.*

Для цитирования: Возможность использования соевого молока в технологии рыборастительных консервов / Е. А. Речкина [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 143–148. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.019. EDN: https://elibrary.ru/AWNSJG.

Original article

POSSIBILITY OF USING SOY MILK IN TECHNOLOGY CANNED FISH

Ekaterina A. Rechkina [1], Zhanna A. Koch [2], Galina A. Gubanenko [3], Daria A. Cheremnykh [4]

[1] Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia
[2] Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia
[3, 4] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
[1] rechkina.e@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-8045-9529
[2] jannetta-83@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4016-7596
[3] gubanenko@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-3049-0835
[4] darya.cheremnykh.94@mail.ru,https://orcid.org/0000-0001-5421-8791

© Речкина Е. А., Кох Ж. А., Губаненко Г. А., Черемных Д. А., 2026

Abstract. *With the population growing rapidly, cities expanding and living standards rising worldwide, there is a need to use available protein resources more efficiently and to create innovative and environmentally friendly methods of food production. Due to its high protein content, soybeans are an excellent source of complete protein, which includes a significant amount of essential amino acids that are not produced by the human body on its own. Currently, there is a wide range of soy products on the market. Some of them are manufactured using advanced technologies at large food industry enterprises. Soybeans can be processed in such a way as to imitate the texture and appearance of various products, including meat and fish products. As a result of research using proven technology, soy milk was obtained from the SIBNIIK soybean variety, with high physicochemical quality indicators: protein content of 3.57 %, fat 2.57 %, carbohydrates 0.46 % and minerals: calcium - 80.69 mg / kg, iron - 6.03 mg / kg. Soy milk does not contain lactose and gluten, which makes it a suitable substitute for cow's milk in many cases, including the production of canned fish and vegetable products. When developing the recipe for fish-vegetable rillettes, butter was replaced with soy milk in the samples. The optimal amount of boiled pumpkin in the recipe was determined by replacing the main fish raw material with vegetable raw material in a dosage of 10 %, 20 %, 30 %. Rillettes with 20 % of the fish raw material replaced with boiled pumpkin, in terms of quality indicators, surpassed the control, No. 1 and 3 samples. Its unique recipe and balanced component composition make rillettes ideal for those who care about their health and want to diversify their diet.*

Key words: *soybean, soybean milk, biochemical composition, canned fish and vegetable products, riyette, recipe, quality indicators.*

For citation: Rechkina, E. A., Koch, Z. A., Gubanenko, G. A. & Cheremnykh, D. A. (2026). Possibility of using soy milk in technology canned fish. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 143-148. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.019. EDN: https: //elibrary.ru/AWNSJG.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрый рост, урбанизация и повышение благосостояния населения планеты требуют улучшения использования существующих источников белка наряду с разработкой новых и устойчивых видов производства продуктов питания. Ожидается, что глобальный спрос на белок удвоится к 2050 году. Это связано не только с ростом населения, но и с растущим признанием важной роли белка в здоровом питании в целом и, особенно для детей и пожилого населения [1]. Рыба и мясные продукты являются важными источниками белка в рационе человека и содержат незаменимые аминокислоты, минералы и витамины. При промышленной переработке рыбы и мяса основной целью является переработка основных продуктов, таких как филе, отбивные и фарш.

Соевые бобы богаты белком и маслом, содержание которого составляет около 60 % от веса сухих соевых бобов, остальная часть состоит из 35 % углеводов и около 5 % золы. В соевых бобах также содержится множество ценных витаминов, флавоноидов и полисахаридов. Высокое содержание соевого белка делает соевые бобы отличным источником полноценного белка, содержащего значительное количество незаменимых аминокислот, которые не могут быть синтезированы человеческим организмом.

Ключевые продукты питания из сои получают: масло, молоко, муку (как цельную, так и обезжиренную), крупу, хлопья и кисломолочные изделия из сои.

Соевое молоко заслуженно пользуется репутацией полезного напитка и служит важным источником высококачественного протеина в рационе питания многих людей на протяжении длительного времени. В его составе преобладает высокое содержание железа, ненасыщенных жирных кислот, в то время как содержание жиров, углеводов и кальция относительно невелико, особенно по сравнению с коровьим молоком. Соевое молоко выделяется повышенной концентрацией фосфатидилхолина, витаминов группы В (B_2, B_3, B_5, B_{12}) и изофлавонов, известных своими мощными антиоксидантными свойствами.

Правильно обработанное соевое молоко и его производные обладают множеством нутрицевтических и оздоровительных преимуществ. Уникальный биохимический состав соевого молока делает этот продукт полезным. Согласно результатам многочисленных исследований, регулярное включение соевых продуктов в рацион может играть роль в предотвращении сердечно-сосудистых патологий, остеопороза, болезней почек, нарушений работы нервной системы, а также способствовать нормализации артериального давления и коррекции анемии [1, 2, 3–6].

Сегодня в мире существует множество вариантов соевых продуктов. Некоторые из них производятся с помощью современных технологий переработки на крупных пищевых предприятиях, в то время как другие производятся более традиционными способами.

Соевые бобы необходимо варить, чтобы разрушить антипитательные вещества и фитиновую кислоту, которые могут снижать усвоение питательных веществ организмом.

Соевые продукты классифицируются на две основные группы: продукты, не прошедшие ферментацию, и продукты, подвергшиеся ферментации. В первую группу входят такие продукты, как соевое молоко, соевые проростки, зелёные соевые бобы, дегидрированные соевые бобы, соевая мука и производные, тофу, окара и юба. Вторая группа включает в себя соевые соусы, мисо, натто и ферментированный тофу.

Соевые бобы можно перерабатывать, чтобы получить текстуру и внешний вид, схожие со многими другими продуктами питания, такими как мясо- и рыбопродукты. В целях достижения эквивалентности животному белку по показателям пищевой ценности многие производители прибегают к обогащению соевых продуктов комплексом эссенциальных нутриентов, включая кальций, витамины и минеральные вещества.

Основное направление внедрения соевого молока в пищевую промышленность отражено в производстве напитков, исследования представлены в работах ученых [3, 4, 5, 6].

В рамках настоящего исследования была поставлена цель – изучение биохимического состава соевого молока для возможности использования в технологии рийета из рыбы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – соевое молоко, полученное из скороспелого сорта сои СИБНИИК, включенный в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию в России.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЕВОГО МОЛОКА В ТЕХНОЛОГИИ РЫБОРАСТИТЕЛЬНЫХ КОНСЕРВОВ

Сбор данного зерна сои осуществлялся на территории Красноярского края в хозяйстве ООО «ОПХ Солянское». В процессе исследований применялись следующие методы: биохимический состав соевого молока на содержание сырого протеина, сырого жира, клетчатки, влаги, сырой золы определяли методом ИК-спектроскопии по ГОСТ 32040-2012, ГОСТ 32041-2012, ГОСТ 31675-2012. Все данные представлены как средние арифметические значения и их стандартные отклонения из 3 независимых измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Соевое молоко получали по отработанной технологии, позволяющей получить продукт с высокими физико-химическими показателями качества и максимальным выходом (рис. 1).

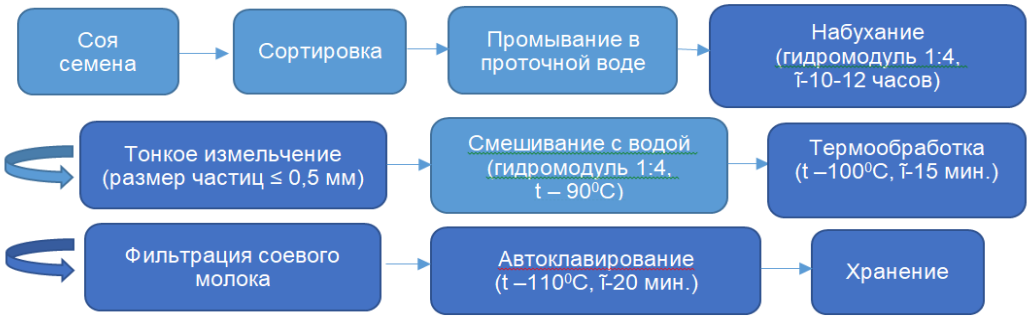


Рисунок 1 – Технологическая схема получения соевого молока
Figure 1 – Technological scheme of soy milk production

В состав сои входит различное количество белка (38–40 %), углеводов (30 %) и жиров (18 %). Среди соевых белков наиболее важными являются глицинин и β-конглицинин, в комбинации они составляют более 70 % от общего количества соевых белков. В сое и ее производных содержатся ненасыщенные жирные кислоты [1].

Соевое молоко, полученное из сорта сои СИБНИИК, представляет собой водный экстракт цельных соевых бобов, оно по внешнему виду очень схоже с коровьим молоком, имеет стабильную белковую эмульсию светло-кремового цвета сладковатого вкуса (рис. 2). Биохимический анализ полученного соевого молока из скороспелого сорта сои СИБНИИК представлен в таблице 1.

Рисунок 2 – Соевое молоко сорта сои СИБНИИК
Figure 2 – Soy milk of soybean variety SIBNIIC

Таблица 1 – Биохимический состав соевого молока (средние значения)
Table 1 – Biochemical composition of soy milk (average values)

Содержание, %				Содержание, мг/кг						
Белки	Жиры	Углеводы	Сухие вещества	Натрий	Калий	Магний	Кальций	Железо	Цинк	Фосфор
3,57±0,2	2,57±0,1	0,46±0,1	7,75±0,2	21,92±0,2	1021,7±0,3	294,5±0,2	80,69±0,2	6,03±0,3	4,88±0,3	59,73±0,1

Проведенный анализ таблицы 1 позволяет сделать вывод о том, что полученное соевое молоко содержит достаточное количество белка 3,57 %, жиров – 2,57 %, углеводов – 0,46 % и минеральных веществ кальция – 80,69 мг/кг, железа – 6,03 мг/кг. Благодаря полноценному биохимическому составу соевое молоко можно применять в качестве обогатителя при производстве пищевой продукции.

Рыба традиционно рассматривается как ключевая часть здорового сбалансированного питания. Рыбные продукты являются важными компонентами рациона человека и являются существенным источником белков, полиненасыщенных жирных кислот и микроэлементов. Рыба и рыбные продукты широко потребляются людьми во многих частях мира, поскольку они имеют высокое содержание белка, низкое содержание насыщенных жиров, а также содержат омега-жирные кислоты, которые, как известно, поддерживают хорошее здоровье. При покупке рыбы особое предпочтение потребители отдают минтаю, горбуше, сельди, скумбрии, терпугу и щуке.

Щука является одной из промысловых рыб в Сибири. Мясо щуки отличается высоким содержанием белка (18,4 г) и малым содержанием жира (1,1 г); в нём также содержится богатый состав минеральных веществ: натрий (42,1 мг/г), калий (262,1 мг/г), фосфор (196 мг/г), кальций (51,5 мг/г), магний (32,1 мг/г), железо (0,73 мг/г) [7].

Сегодня существуют отработанные технологии производства рыборастительных консервов, в которых в качестве сырья используют рыбное филе, печень, икру, молоки разных видов рыб, сочетая их с овощами, злаками или фруктами.

В настоящее время известны технологии рыбоовощных консервов, которые вырабатывают из тушек, печени, икры, молок различных рыб, комбинируя с овощами, крупами, бобовыми и злаковыми [8–10].

По результатам исследований минерального состава соевого молока из сорта сои СИБНИИК можно

отметить очень высокое содержание таких элементов, как кальций, фосфор и железа, что значительно отличается по содержанию минеральных веществ в коровьем молоке. Соевое молоко в своем составе не содержит лактозы и глютена, поэтому им можно заменить коровье молоко во многих процессах, в том числе в производстве рыборастительных консервов. В ходе проведенного анализа существующих и проведенных исследований отсутствует информация о возможности использования соевого молока в технологии производства рыбоовощных консервов из рыбного сырья пониженной пищевой ценности.

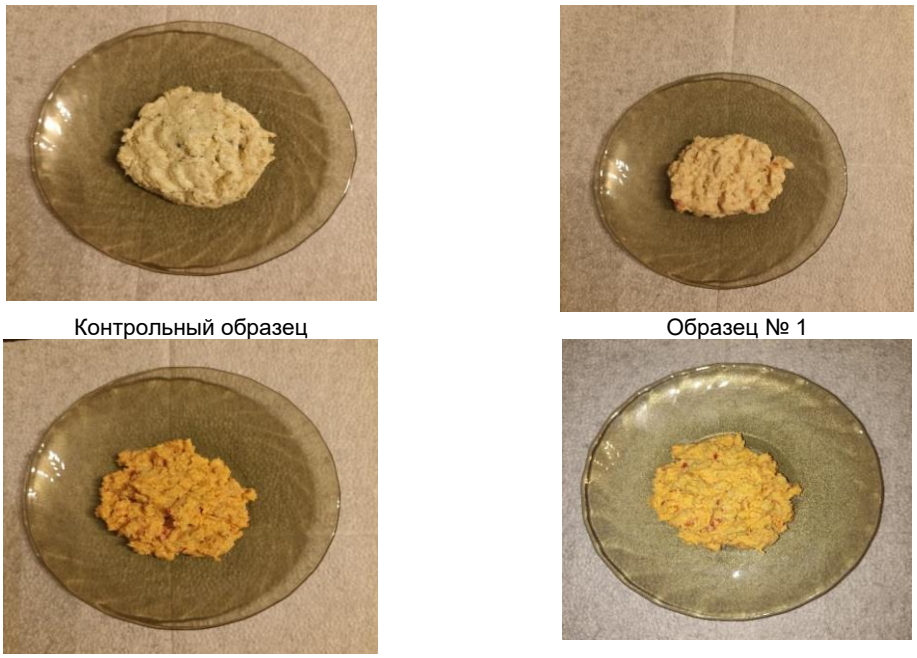
При разработке рецептуры рыборастительного рийета были использованы рыбы: щука и скумбрия свежемороженые. Дополнительно к рецептуре вводили растительные ингредиенты: соевое молоко из сорта сои СИБНИИК и отварную тыкву.

В опытных образцах была сделана замена сливочного масла на соевое молоко. Оптимальное количество отварной тыквы в рецептуре определили, заменяя основное рыбное сырье на растительное. Технология производства и рецептура контрольного образца – на основе рийета из минтая [11]. В таблице 2 приведен состав рецептур рыборастительных рийетов.

Таблица 2 – Рецептуры рыборастительных рийетов
Table 2 – Recipes of fish and vegetable ryets

Наименование ингредиента	Контрольный образец	Опытные образцы		
		№ 1 содержание тыквы 10 %	№ 2 содержание тыквы 20 %	№ 3 содержание тыквы 30 %
Минтай (филе)	54	–	–	–
Щука (филе)	–	52	46	41
Скумбрия(филе)	–	13	12	10
Тыква отварная	–	7	14	21
Лук репчатый	6	6	6	6
Морковь сушёная	3	3	3	3
Перец сладкий красный сушёный	3	3	3	3
Вода для гидратации овощей	18	–	–	–
Соль	1	1	1	1
Микс для рыбы	1	1	1	1
Сливочное масло	14	–	–	–
Соевое молоко	–	14	14	14
ИТОГО	100	100	100	100

Технологический процесс производства рийета из щуки осуществлялся по стандартной технологии рыбных паштетов. На рисунке 3 представлены опытные образцы рыборастительных рийетов. Результаты дегустационной оценки рийетов из щуки изображены на рисунке 4.



Контрольный образец | Образец № 1

Образец № 2 | Образец № 3

Рисунок 3 – Опытные образцы рыборастительных рийетов
Figure 3 – Experimental samples of fish-borne riyets

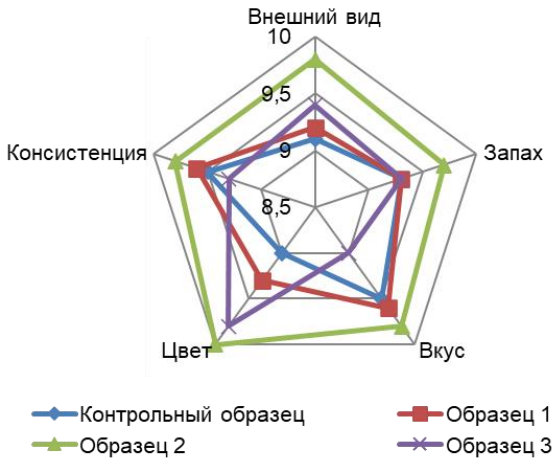


Рисунок 4 – Дегустационная оценка рийетов из щуки
Figure 4 – Tasting evaluation of pike rillettes

Анализ результатов дегустационной оценки рийетов из щуки, представленных на рисунке 4, демонстрирует, что образец № 2, в котором 20 % рыбного сырья было заменено на тыкву, получил самую высокую оценку. В образце № 1 вкус оказался недостаточно насыщенным, наблюдались незначительные изменения в цвете, однако консистенция осталась однородной. В образце № 3 дегустаторы отметили выраженную сладость, несвойственную рийету текстуру и оттенок тыквенного пюре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рийет из щуки с тыквой и соевым молоком не только приятно удивляет своим вкусом, но и является ценным продуктом, подходящим для диетического питания. Уникальная рецептура и сбалансированный компонентный состав делают его идеальным выбором для тех, кто заботится о своём здоровье и хочет разнообразить свой рацион.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егорова Е.Ю. «Немолочное молоко»: обзор сырья и технологий // Ползуновский вестник. 2018. № 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nemolochnoe-moloko-obzor-syrya-i-tehnologiy.

2. Альшевский Д.Л. Разработка рецептуры имитационного шпика на основе жиросодержащих компонентов утки для использования в технологии рийетов / Д.Л. Альшевский, М.Н. Альшевская // Известия КГТУ. 2024. № 74. С. 51–63. DOI: 10.46845/1997-3071-2024-74-51-63.

3. Федько Е.А. Сравнительный анализ соевого молока и молока животного происхождения / Е.А. Федько, В.В. Быченкова // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 34. С. 504–514.

4. Воробьева Н.Ю. Технология производства соевого молока, обеспечивающая снижение антипитательных веществ / Н.Ю. Воробьева // Актуальные проблемы современных технологий производства, хранения и переработки : сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции ; Курск, 23 ноября 2022 года / Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова. Курск : Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова, 2022. С. 22–24.

5. Кубанцева А.И. Разработка технологии получения сухого соевого молока с добавлением кокосового порошка / А.И. Кубанцева, В.А. Грибкова // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: материалы Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 80-летию Ульяновского государственного аграрного университета имени П.А. Столыпина, Ульяновск, 15 декабря 2022 года. Ульяновск : Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2022. С. 2804–2810.

6. Жебо А.В. Технология и характеристика заменителей молока на растительной основе / А.В. Жебо, А.В. Алешков, Т.К. Каленик // Вестник ВСГУТУ. 2019. № 4 (75). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-i-harakteristika-zameniteley-moloka-na-rastitelnoy-osnove.

7. Иринина О.И. Функционально-технологическая характеристика рецептурных компонентов комбинированных формованных продуктов из маложирных рыб / О.И. Иринина, М.Н. Куткина С.А. Елисеева // МНИЖ. 2017. № 1–4 (55). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/funktsionalno-tehnologicheskaya-harakteristika-retsepturnyh-komponentov-kombinirovannyh-formovannyh-produktov-iz-malozhirnyh-ryb.

8. Касьянов Г.И. Использование антиоксидантных свойств иридоидов при конструировании рецептур рыборастительных паштетов / Г.И. Касьянов, И.А. Деренкова, О.В. Косенко [и др.] // Modern Science. 2021. № 9–2. С. 199–205.

9. Яковлев О.В. Применение натуральных структурообразователей при производстве консервов-паштетов / О.В. Яковлев // Морские технологии: проблемы и решения – 2020 : Сборник трудов по материалам II Национальной научно-практической конференции преподавателей и аспирантов «Морские технологии: проблемы и решения – 2020», Керчь, 15–29 апреля 2020 года / под общ. ред. Масюткина Е.П. Керчь : ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2020. С. 130–132.

10. Дементьева Н.В. Технология производства многокомпонентных дисперсных продуктов из водных биологических ресурсов / Н.В. Дементьева // Индустрия питания / Food Industry. 2024. № 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-proizvodstva-mnogokomponentnyh-dispersnyh-produktov-iz-vodnyh-biologicheskih-resursov.

11. Воробьева А.В. Разработка рецептур рыбных рийетов с облепихой / А.В. Воробьева // Студенческая наука – взгляд в будущее : Материалы XIX Всероссийской студенческой научной конференциии, Красноярск, 27–29 февраля 2024 года. Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2024. С. 11–13.

Информация об авторах

Е. А. Речкина – к.т.н., доцент кафедры технология консервирования и пищевая биотехнология

ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет».

Ж. А. Кох – к.т.н., доцент кафедры промышленной экологии, процессы и аппараты химических производств, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева».

Г. А. Губаненко – д.т.н., профессор, заведующая кафедры технологии и организации общественного питания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Д. А. Черемных – ассистент кафедры технологии и организации общественного питания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

REFERENCES

1. Egorova, E.Yu. (2018). "Nemolochnoe moloko": obzor syr'ya i tekhnologiy ["Non-dairy milk": A review of raw materials and technologies]. *Polzunovskiy vestnik*, (3). Retrieved May 15, 2026, from https://cyberleninka.ru/article/n/nemolochnoe-moloko-obzor-syrya-i-tehnologiy.

2. Al'shevskiy, D.L. & Al'shevskaya, M.N. (2024). Razrabotka retseptury imitatsionnogo shpika na osnove zhirosoderzhashchikh komponentov utki dlya ispol'zovaniya v tekhnologii riyetov [Development of a formulation for imitation lardon based on duck fat-containing components for use in rillettes technology]. *Izvestiya KGTU*, (74), 51-63. https://doi.org/10.46845/1997-3071-2024-74-51-63.

3. Fed'ko, E.A. & Bychenkova, V.V. (2021). Sravnitel'nyy analiz soevogo moloka i moloka zhivotnogo proiskhozhdeniya [Comparative analysis of soy milk and milk of animal origin]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, (34), 504-514.

4. Vorob'eva, N.Yu. (2022). Tekhnologiya proizvodstva soevogo moloka, obespechivayushchaya snizhenie antipitatel'nykh veshchestv [Production technology of soy milk, which reduces antinutrients]. In *Aktual'nye problemy sovremennykh tekhnologiy proizvodstva, khraneniya i pererabotki: sbornik nauchnykh statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current problems of modern technologies of production, storage and processing: Collection of scientific articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference] (pp. 22-24). Kursk : Kursk State Agricultural Academy named after I.I. Ivanov.

5. Kubantseva, A.I. & Gribkova, V.A. (2022). Razrabotka tekhnologii polucheniya sukhogo soevogo moloka s dobavleniem kokosovogo poroshka [Development of technology for obtaining dry soy milk with the addition of coconut powder]. In *Nauka v sovremennykh usloviyakh: ot idei do vnedreniya: materialy Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science in modern conditions: from idea to implementation: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference] (pp. 2804-2810). Ul'yanovsk : Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin.

6. Zhebo, A.V., Aleshkov, A.V. & Kalenik, T.K. (2019). Tekhnologiya i kharakteristika zameniteley moloka na rastitel'noy osnove [Technology and characteristics of plant-based milk substitutes]. *Vestnik VSGUTU*, (4(75)). Retrieved May 15, 2026, from https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-i-harakteristika-zameniteley-moloka-na-rastitelnoy-osnove.

7. Irinina, O.I., Kutkina, M.N. & Eliseeva, S.A. (2017). Funktsional'no-tekhnologicheskaya kharakteristika retsepturnykh komponentov kombinirovannykh formovannykh produktov iz malozhirnykh ryb [Functional and technological characteristics of recipe components of combined molded products from low-fat fish]. *MNIZh*, (1-4(55)). Retrieved May 15, 2026, from https://cyberleninka.ru/article/n/funktsionalno-tehnologicheskaya-harakteristika-retsepturnyh-komponentov-kombinirovannyh-formovannyh-produktov-iz-malozhirnyh-ryb.

8. Kas'yanov, G.I., Derenkova, I.A., Kosenko, O.V. [et al.]. (2021). Ispol'zovanie antioksidantnykh svoystv iridoidov pri konstruirovanii retseptur ryborastitel'nykh pashtetov [The use of antioxidant properties of iridoids in the design of formulations of fish and vegetable pâtés]. *Modern Science*, (9-2), 199-205.

9. Yakovlev, O.V. (2020). Primenenie natural'nykh strukturoobrazovateley pri proizvodstve konservov-pashtetov [The use of natural structuring agents in the production of canned pâtés]. In *Morskie tekhnologii: problemy i resheniya - 2020 : Sbornik trudov po materialam II Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Marine technologies: problems and solutions - 2020: Proceedings of the II National Scientific and Practical Conference] (pp. 130-132). Kerch' : Kerch State Marine Technological University.

10. Dement'eva, N.V. (2024). Tekhnologiya proizvodstva mnogokomponentnykh dispersnykh produktov iz vodnykh biologicheskikh resursov [Production technology of multicomponent dispersed products from aquatic biological resources]. *Industriya pitaniya / Food Industry*, (3). Retrieved May 15, 2026, from https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-proizvodstva-mnogokomponentnyh-dispersnyh-produktov-iz-vodnyh-biologicheskih-resursov.

11. Vorob'eva, A.V. (2024). Razrabotka retseptur rybnykh riyetov s oblepikhoy [Development of fish rillettes recipes with sea buckthorn]. In *Studencheskaya nauka - vzglyad v budushchee : Materialy XIX Vserossiyskoy studencheskoy nauchnoy konferentsii* [Student science - a look into the future: Proceedings of the XIX All-Russian Student Scientific Conference] (pp. 11-13). Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University.

Information about the authors

E.A. Rechkina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Canning Technology and Food Biotechnology FSBEIU VO "Krasnoyarsk State Agrarian University".

Zh.A. Kokh - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department t of Industrial Ecology, Processes and Apparatus of Chemical Productions, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology.

G.A. Gubanenko - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Public Catering of FGAOU HE "Siberian Federal University".

D.A. Cheremnykh - Assistant at the Department of Technology and Organization of Public Catering*, Federal State Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University".*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 149–155.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 149–155.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.641.4:637.524
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.020 EDN: BHIUXA

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕМПУРНОЙ МУКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОЛБАСНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Надежда Павловна Шевченко [1],Марина Васильевна Каледина [2], Виктория Петровна Витковская [3], Дарья Александровна Шемякина [4]

[1, 2, 3, 4] Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, Белгород, Россия
[1] shevchenko_np@belgau.ru
[2] kaledina_mv@belgau.ru
[3] popenko_vp@belgau.ru
[4] litovkina_da@belgau.ru

Аннотация. *В работе проведено изучение возможности использования темпурной муки в рецептурах колбасных изделий из мяса птицы мехобвалки. Предварительные исследования функционально-технологических свойств и состава темпурной муки позволили спрогнозировать двухфакторый эксперимент ее влияния на основные технологические показатели фаршевых модельных систем до и после термообработки. В результате был установлен оптимальный уровень введения темпурной муки и воды сверх рецептуры, который для вареных колбас составил 15 % и 30 % соответственно. Далее был произведён подбор рецептур колбасных изделий из мяса птицы мехобвалки, в состав которых была включена темпурная мука. Оценка физико-химических и органолептических показателей позволяет сделать вывод о возможности использования темпурной муки как более дешёвого аналога других растительных компонентов без ухудшения качества и выхода продукции. Однако в связи с уменьшением доли пигментов мяса требуется цветокорректировка колбасных изделий красителями. В результате проведённых исследований разработаны рецептуры вареной и полукопченой колбас с использованием темпурной муки и красителя кармина.*

Ключевые слова: *темпурная мука, модельные фаршевые системы, мясо птицы мехобвалки, вареные колбасы, растительные ингредиенты.*

Для цитирования: Шевченко Н. П., Каледина М. В., Витковская В. П., Шемякина Д. А. Использование темпурной муки при производстве колбасных изделий // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 149–155. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.020. EDN: https://elibrary.ru/BHIUXA.

Original article

USING TEMPURA FLOUR IN PRODUCTION OF SAUSAGES

Nadezhda P. Shevchenko [1], Marina V. Kaledina [2], Victoria P. Vitkovskaya [3], Darya A. Shemyakina [4]

[1, 2, 3, 4] Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, Belgorod, Russia
[1] shevchenko_np@belgau.ru
[2] kaledina_mv@belgau.ru
[3] popenko_vp@belgau.ru
[4] litovkina_da@belgau.ru

Abstract. *The paper studies the possibility of using tempura flour in recipes for sausage products from mechanically deboned poultry. Preliminary studies of the functional and technological properties and composition of tempura flour made it possible to predict a two-factor experiment of its effect on the main technological parameters of minced model systems before and after heat treatment. As a result, the optimal level of introducing tempura flour and water in excess of the recipe was established, which for cooked sausages was 15 % and 30 %, respectively. Then, recipes for sausage products from mechanically deboned poultry were selected, which included tempura flour. Evaluation of the physicochemical and organoleptic indicators allows us to conclude that tempura flour can be used as a cheaper analogue of other plant components without deteriorating the quality and yield of products. However, due to a decrease in the proportion of meat pigments, color correction of sausages with dyes is required. As a result of the studies, recipes for cooked and semi-smoked sausages using tempura flour and carmine dye were developed.*

Keywords: *tempura flour, model minced meat systems, poultry meat, meat-rollers, cooked sausages, plant ingredients.*

For citation: Shevchenko, N. P., Kaledina, M. V., Vitkovskaya, V. P. & Shemyakina, D. A. (2026). Using tempura flour in production of sausages. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 149-155. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.018. EDN: https: //elibrary.ru/BHIUXA.

© Шевченко Н. П, Каледина М. В., Витковская В. П., Шемякина Д. А., 2026

ВВЕДЕНИЕ

Современные направления в развитии комбинированных мясных изделий демонстрируют использование обширного ассортимента пищевых добавок в процессе их изготовления. Постоянный рост стоимости мясного сырья, а также желание многих компаний оптимизировать процессы в мясоперерабатывающей сфере способствовали активному прогрессу в области мясозаменителей. Эти компоненты в основном применяются для создания бюджетных колбас или как дополнительные ароматизаторы, предусмотренные в рецептуре. В наши дни высокие стандарты качества продукции становятся ключевым фактором конкурентоспособности на рынке. При этом доступны ингредиенты различного происхождения, цены, функциональных характеристик и питательной ценности. Главной особенностью растущего рынка мясозаменителей является непрерывное улучшение этих веществ с учетом требований производителей разнообразных мясных товаров [1].

При изготовлении колбас рекомендуется вводить муку из чечевицы или ее белковый изолят, нутовую муку, муку из зерновых, крупы (пшено, рис, перловку, ячмень и прочие), крахмал и аналогичные компоненты [3–5].

Растительная мука, получаемая из пшеницы, риса, овса, бобовых (таких как нут или чечевица) и псевдозлаков (например, киноа, амарант), обладает широким спектром функционально-технологических характеристик, что делает ее универсальным элементом в формулах колбасных продуктов. Она выполняет роль многоцелевой добавки, прежде всего как связующий агент, стабилизатор и наполнитель, одновременно влияя на текстуру, удержание жидкости и эмульсию жиров. К примеру, пшеничная мука с высоким содержанием глютена усиливает структурную прочность и упругость эмульгированных колбас, обеспечивая равномерность текстуры и удобство нарезки, в то время как рисовая мука без глютена создает мягкую консистенцию и подходит для безаллергенных изделий. Мука из бобовых, такая как нутовая или гороховая, предлагает повышенное количество белка (20–25 %) и способность связывать воду, что минимизирует потери в производстве и повышает сочность, тогда как овсяная мука с β-глюканом увеличивает вязкость и стабилизирует жиры в рецептах с пониженным содержанием мяса [1].

Технологическая возможность использования растительной муки расширяется из-за ее роли в снижении затрат, поскольку она частично заменяет дорогостоящие мясные белки без ущерба для органолептических свойств. Кроме того, некоторые виды растительной муки содержат пищевые волокна (например, 10–15 % в овсяной муке), что соответствует тенденциям в области здорового питания и снижению калорийности продукции. Способность пищевых волокон растительного сырья выступать в качестве носителей для обогащения, например, железа из амаранта или антиоксидантов из киноа, еще больше расширяет сферу применения в функциональных мясных продуктах. Растёт внедрение гибридных рецептур, объединяющих несколько растительных видов муки (например, смеси риса и нута), где используются синергетические эффекты, балансирующие текстуру, вкус и улучшение питательных свойств.

Есть и некоторые задачи, требующие решений, которые включают оптимизацию размера частиц и методов предварительной обработки (например, тепловую модификацию, ферментативный гидролиз) для смягчения нежелательных привкусов или зернистости, особенно в муке на основе бобовых. В ферментированных колбасах выбранная растительная мука взаимодействует с микробными культурами, влияя на динамику pH и кинетику ферментации, в то время как в вареных сортах она стабилизирует эмульсионные системы во время термической обработки.

В целом растительная мука представляет собой универсальный, экономически выгодный и универсальный с точки зрения питания компонент в производстве колбас.

Одним из возможных к применению в колбасном производстве растительным ингредиентом является темпурная мука. Мука темпурная состоит из пшеничной, рисовой, кукурузной муки и картофельного крахмала. На данный момент темпурная мука в производстве колбасных изделий не используется. Состав и свойства компонентов муки даёт возможность предположить о перспективе ее использования и проявления синергетического эффекта компонентов в производстве колбасных изделий.

Целью настоящей работы является разработка технологии колбасных изделий, содержащих белково-углеводную добавку (БУД) – темпурная мука, на основе научного обоснования и проектирования их состава с использованием методов математического моделирования.

МЕТОДЫ

В качестве объектов были выбраны мука темпурная (Kaneshiro, Россия), модельные фаршевые системы из мяса птицы механической обвалки (МПМО), комбинированные колбасы.

По органолептическим показателям темпурная мука соответствовала следующим требованиям: порошок белого цвета, вкус практически отсутствует, приятный, но очень слабо выраженный запах.

Химический состав и энергетическая ценность темпурной муки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав и энергетическая ценность темпурной муки

Table 1 – Chemical composition and energy value of tempura flour

Наименование	Количество г в 100 г
Белки	10,3
Жиры	1,1
Углеводы	68,9
Сухие вещества	86,0

При выполнении работы были использованы современные стандартные и модифицированные методы исследования:

- водопоглощающая и жиропоглощающая способности оценивались методом погружения сетчатого стаканчика с навеской в воду или растительное масло;
- эмульгирующая способность оценивалась через определения объема жира, который связывается 1 г белка (эмульгирующий объем);
- активную кислотность определяли в растворе потенциометрическим методом на pH-метре (ООО Сибагропартнер);
- определение влагосвязывающей способности мясного фарша осуществляли методом прессования (метод Грау-Хамма в модификации Воловинской–Кельман);
- химический состав образцов определяли на ИК-анализаторе Food Check Plus компании Bruin;

- пластичность определяли пресс-методом по площади внутреннего пятна, образованного прессованным образцом (метод Грау-Хамма);

- усилия резания определяли на анализаторе текстуры EZ-SX;

- метод определения влаги осуществляли путем высушивания проб модельных фаршей и колбасных изделий в сушильном шкафу при температуре 103±2 ºС.

Исследование фаршевых систем и готового продукта проводили по плану полного двухфакторного эксперимента. В качестве добавки, с помощью которой производилась частичная замена мясного сырья, использовалась темпурная мука, вода вносилась сверх рецептуры в различных соотношениях. Схема приготовления модельных фаршевых систем представлена на рисунке 1.

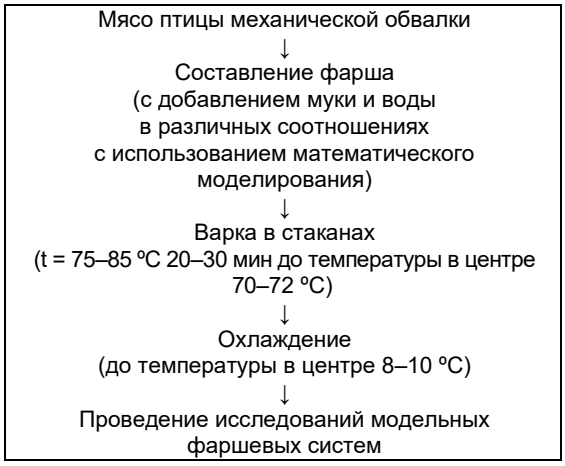


Рисунок 1 – Схема приготовления модельных фаршевых систем

Figure 1 – Scheme of preparation of model minced meat systems

Для повышения эффективности процесса и снижения временных и финансовых издержек вопросы оптимизации решались посредством методик планирования экспериментов и статистической обработки полученных данных. Начальные исследования в сочетании с практическими советами позволили выявить приемлемые интервалы для входных переменных. Информация, требуемая для создания регрессионной модели, была получена в рамках предварительного разведочного эксперимента, за которым последовал двухфакторный эксперимент на основе персонализированного плана. Оптимизация модели осуществлялась с использованием Excel и специализированной программы «Регрессия», что привело к формированию математической формулы в форме уравнения регрессии. Изучение этого уравнения дало возможность выявить корреляции между выходными показателями и изменяемыми факторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные функционально-технологические свойства темпурной муки представлены в таблице 2. Мука имеет высокую влаго- и жиропоглощающую способности, хорошо набухает и удерживает влагу, проявляет выраженные эмульгирующие свойства.

Таблица 2 – Функционально-технологические свойства темпурной муки

Table 2 – Functional and technological properties of tempura flour

Показатель	Значение
ВПС, %	123±0,5
ЖПС, %	112±1,0
Степень набухаемости, %	124,5±1,5
Эмульгирующая способность на 1 г белка, г жира	900

Темпурная мука предлагает богатую крахмалом матрицу, которая может улучшить влагоудержание и текстуру колбас за счет использования ее водосвязывающей способности и желатинизации крахмала в процессе термической обработки, что потенциально может снизить потери при варке и улучшить сочность. Ее включение также может служить частичной заменой традиционных связующих, таких как пшеничная мука, хлеб или сухари, особенно в мясных продуктах, где ингредиенты на основе крахмала являются критическими для стабильности эмульсии и структурной целостности.

Для установления оптимального количества совместного добавления темпурной муки и воды сверх предусмотренной рецептуры в колбасные изделия были выполнены оптимизационные задачи, направленные на выявление взаимосвязи между входными переменными (уровень добавления) и выходными характеристиками: pH, массовая доля влаги, водосвязывающая способность, пластичность. На основе собственных предварительных исследований и практических рекомендаций по применению удалось определить границы варьирования входных параметров (таблица 3).

Таблица 3 – Матрица планирования двухфакторного эксперимента при введении темпурной муки и воды в модельные фаршевые системы из мяса птицы мехобвалки

Table 3 – Matrix for planning a two-factor experiment with the introduction of tempura flour and water into model minced systems from mechanically deboned poultry meat

Образцы	X_1	X_2	Темпурная мука, % (X_1)	Вода, % (X_2)	Общая масса образца, г	Мясо птицы, г
	в безразмерном виде		в натуральном выражении			
1	–1	–1	4,390	8,79	100	95,61
2	–1	1	4,390	51,22	100	95,61
3	1	–1	25,610	8,79	100	74,39
4	1	1	25,610	51,22	100	74,39
5	–1,414	0	0	30	100	100
6	1,414	0	30	0	100	70
7	0	–1,414	15	30	100	85
8	0	1,414	15	60	100	85
9	0	0	15	30	100	85

Результаты исследований модельных фаршевых систем и уравнения регрессии, описывающие зависимость факторов представлены в таблицах 4–6.

В качестве примера визуализации взаимосвязи входных параметров на рисунке 2 приведены поверхности отклика водосвязывающей способности модельных фаршевых систем и их водоудерживающая способность после тепловой обработки построенных по полученным уравнениям регрессии.

Таблица 4 – Результаты исследований функционально-технологических свойств модельных фаршевых систем из МПМО с добавлением темпурной муки до термической обработки

Table 4 – Results of studies of the functional and technological properties of model minced meat systems from MPMO with the addition of tempura flour before heat treatment

Образец	ВСС к общей влаге, %	pH	Массовая доля влаги, %	Пластичность, $см^2/г$	Выход, %
	до термической обработки				
1	70,6	6,82	56,18	12,2	95,5
2	18,3	6,86	65,21	18,4	115,9
3	96,4	6,69	72,45	9,8	108,7
4	50,2	6,71	76,58	14,7	144,4
5	64,2	6,83	60,88	17,3	100
6	94,4	6,61	70,85	12,3	125
7	75,4	6,59	58,85	9,4	110
8	41,2	6,58	72,78	18,5	130
9	69,4	6,72	66,38	13,9	115

Примечание: результаты представлены в виде среднеарифметического значения трех повторностей эксперимента

Таблица 5 – Результаты исследований функционально-технологических свойств модельных фаршевых систем из МПМО с добавлением темпурной муки послетермической обработки

Table 5 – Results of studies of the functional and technological properties of model minced meat systems from MPMO with the addition of tempura flour after heat treatment

Образец	ВУС к общей влаге, %	pH	Массовая доля влаги, %	Пластичность, $см^2/г$	Усилия резания, Н	Выход, %
	после термической обработки					
1	41,2	6,84	56,23	9,9	4,95	95,5
2	67,4	6,88	64,87	12,8	4,16	115,9
3	76,5	6,73	59,76	7,8	7,70	108,7
4	96,4	6,76	74,44	12,9	4,75	144,4
5	56,7	6,85	62,04	13,6	4,05	100
6	90,4	6,65	73,54	10,1	7,30	125
7	75,4	6,63	66,76	8	8,08	110
8	91,6	6,62	73,56	15,6	4,03	130
9	69,4	6,75	65,33	11,65	6,05	115

Таблица 6 – Уравнение регрессии при обработке двухфакторного эксперимента функционально-технологических свойств модельных фаршевых систем МПМО и с добавлением темпурной муки

Table 6 – Regression equation for processing a two-factor experiment of functional and technological properties of model minced systems from mechanically deboned poultry meat with the addition of tempura flour

Показатель	Уравнение регрессии
1	2
До термообработки	
ВСС к общей влаге, %	$Y=83,394+0,452X_1-0,73X_2+0,021X_1X_2-0,0251X_{1,2}+0,00893X_{2,2}=85,1$
pH	$Y=6,979-0,035X_1-0,00246X_2+0,0003X_1X_2+0,000416X_{1,2}+0=6,72$
Массовая доля влаги, %	$Y=55,596+0,829X_1+0,44X_2+0,000133X_1X_2+0,036X_{1,2}-0,0033X_{2,2}==66,38$
Пластичность, $см^2/г$	$Y=4,622+1,5444X_1+0,403X_2-0,00044X_1X_2-0,04515X_{1,2}-0,00735X_{2,2}= =13,9$
После термообработки	
ВУС к общей влаге, %	$Y=69,511+2,992X_1-1,232X_2+0,011X_1\times X_2 - 0,0715 \times X_{1,2} + 0,0034X_{2,2} = =69,4$
pH	$Y=7,0688-0,0418X_1-0,003X_2+0,00027X_1X_2+0,000608X_{1,2}+0,00001X_{2,2}= 6,75$
Массовая доля влаги, %	$Y=57,283 + 0,951X_1 + 0,1X_2-0,0063X_1X_2 - 0,03X_{1,2} + 0,00132X_{2,2} = 65,33$
Пластичность, $см^2/г$	$Y=5,46+0,3999X_1+0,1178X_2+0,00688X_1X_2-0,0184X_{1,2}-0,00272X_{2,2}=11,65$
Усилия резания, Н	$Y= 799,15-9,368X_1 -9,3076X_2 + 0,279X_1X_2 +0,276X_{1,2}-0,0677X_{2,2} = 617$
Выход, %	$Y=100,65+1,366X_1-0,595X_2+0,0043X_{1,2}-0,00159X_{1,2}+0,011X_{2,2} =115$

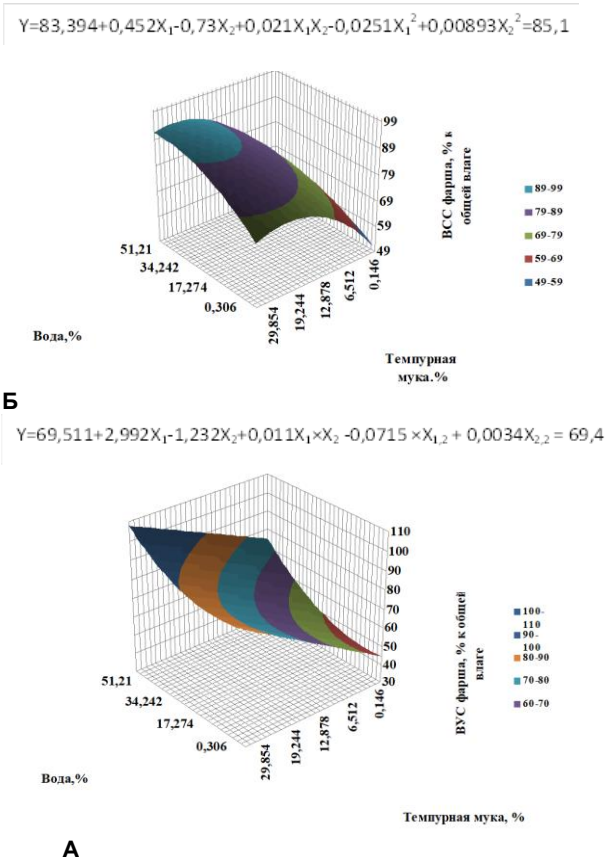


Рисунок 2 – Поверхность отклика для показателей водосвязывающей способности (А) и водоудерживающей способности после термообработки (Б) модельных фаршевых систем при введении темпурной муки

Figure 2 – Response surface for water-binding capacity (A) and water-holding capacity after heat treatment (B) of model minced meat systems with the introduction of tempura flour

Изучение полученных результатов для модельных фаршевых систем перед тепловой обработкой выявило, что добавление темпурной муки в объеме от 19 до 30 % и воды от 35 до 60 % способствует достижению максимальной водосвязывающей способности. Анализ динамики pH в сырых пробах продемонстрировал, что наивысший уровень этого показателя – 6,86 единиц – фиксируется в образце с минимальным содержанием темпурной муки (4,39 %) и максимальным объемом воды (51,22 %). Наибольшая массовая доля влаги наблюдается при внесении воды сверх рецептуры в диапазоне от 51,2 до 60 %. Образцы с наивысшим уровнем добавленной воды обладают максимальной пластичностью. Самая высокая водоудерживающая способность характерна для проб, в которых количество темпурной муки и воды приближается к предельным значениям (15 %). Водоудерживающая способность прямо пропорциональна степени добавления темпурной муки и воды сверх рецептуры. При внесении 15 % темпурной муки этот показатель колеблется в пределах от 75,4 до 91,6 %.

После тепловой обработки pH системы возрастал в результате денатурации белковых структур. Наивысший показатель pH в 6,85 единиц зафиксирован в пробе, где добавлялась только вода, а минимальный уровень pH 6,62 – в пробе с максимальным объемом воды и 15 % темпурной муки.

Максимальная массовая доля влаги достигалась в образцах с добавлением воды от 30 до 60 % и темпурной муки от 15 до 30 %. Пластичность готовых модельных фаршевых составов прямо пропорциональна степени внесения воды. Тем не менее, сравнивая этот параметр в сырых и термически обработанных системах, можно заключить, что после нагрева пластичность уменьшалась из-за денатурации белков и преобразования свободной влаги в более устойчивые формы связей. Минимальные усилия при резке готовых проб наблюдались при максимальном добавлении воды, а также при внесении темпурной муки в пределах 15–30 %, что указывает на более рыхлую структуру.

ОБСУЖДЕНИЕ

Способность мясного сырья эффективно удерживать влагу во время тепловой обработки определяет выход конечного продукта. В модельных фаршевых системах по мере роста количества добавляемой темпурной муки и воды повышается выход готовой продукции. Максимальный выход фиксировался в пробах с наивысшими значениями варьируемых факторов и составил 144,4 %.

Изучая поверхности отклика, было выявлено, что добавление темпурной муки в системы на основе МПМО способствует улучшению качественных свойств конечных изделий. По итогам анализа данных определен оптимальный объем внесения темпурной муки и воды сверх рецептуры – 15 % и 30 % соответственно.

На этой основе осуществлен подбор рецептур с включением темпурной муки. В роли контрольного образца использована рецептура вареной колбасы «Ялтинская», производимая по ТУ 9213-484-00419779-03 компании PTI – Protein Technologies International (таблица 7).

Темпурная мука вводилась в фаршевые системы из мяса птицы механической обвалки в сухом виде на этапе приготовления фарша на куттере. Изготовление образцов продукта проводили в соответствии с технологической схемой, представленной на рисунке 3.

Таблица 7 – Рецептуры изготовленных вареных колбас

Table 7 – Recipes for prepared cooked sausages

Сырьё несоленое, кг на 100 кг	Ялтинская» Контроль № 1		Контроль № 2		Опыт	
	норма	коли-чество	норма	коли-чество	норма	коли-чество
Мясо птицы механической обвалки	70	140	99	198	84	168
Соевый белок	5	10	–	–	–	–
Вода на гидратацию соевого белка	20	40	–	–	–	–
Крахмал или мука пшеничная	4	8	–	–	–	–
Яйца куриные или меланж	1	2	1	2	1	2
Темпурная мука	–	–	–	–	15	30
Итого:	100	200	100	200	100	200
Вода, сверх рецептуры %	20	40	20	40	30	60
Пряности и материалы, кг на 100 кг сырья						
Соль поваренная пищевая	1,3	2,6	1,3	2,6	1,3	2,6
Нитритная соль	0,9	1,8	0,9	1,8	0,9	1,8
Сахар	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4
Перец чёрный	0,09	0,18	0,09	0,18	0,09	0,18
Перец красный	0,03	0,06	0,03	0,06	0,03	0,06
Мускатный орех	0,15	0,3	0,15	0,3	0,15	0,3
Перец душистый	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2

С целью прогнозирования качества выработанной продукции и проверки установленных ранее зависимостей на образцах вареных колбас были изучены качественные показатели сырых фаршей и готовых изделий (таблица 8).

Изучение полученных результатов позволяет утверждать, что добавление темпурной муки в формулы вареных колбас благоприятно влияет на их качественные характеристики. Отмечено небольшое увеличение уровня pH и водоудерживающей способности. В то же время внесение темпурной муки в состав существенно повышает водоудерживающую способность (до 75,1 %), что указывает на эффективное связывание воды матрицей белково-углеводного комплекса. Аналогичная закономерность наблюдается и в отношении выхода готовой продукции (примерно 120 % в пробах с темпурной мукой). При равных значениях массовой доли влаги показатель пластичности существенно варьируется (18,9 % в образце с добавлением муки).

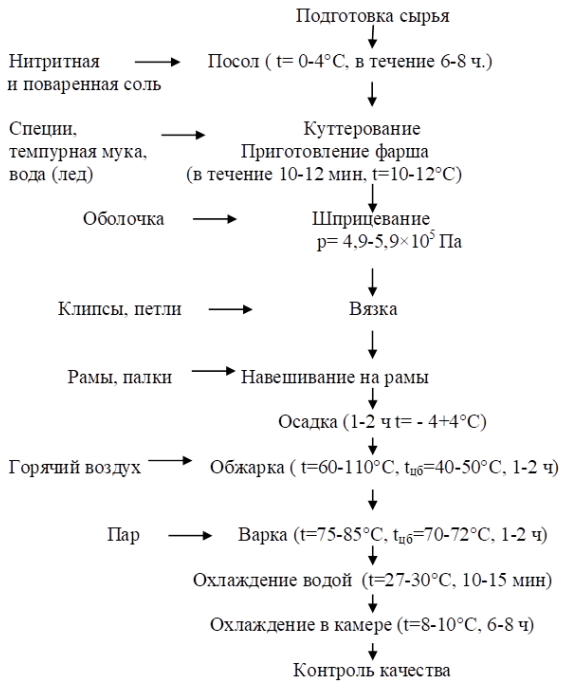


Рисунок 3 – Технологическая схема изготовления образцов вареных колбас на основе мяса птицы мехобвалки

Figure 3 – Technological scheme for the production of samples of cooked sausages based on mechanically deboned poultry meat

Таблица 8 – Качественные показатели сырых и готовых фаршей вареных колбас (n = 3, V < 10)

Table 8 – Quality indicators of raw and prepared minced cooked sausages (n = 3, V < 10)

Показатель	Образцы вареных колбас		
	«Ялтинская» Контроль № 1	Контроль № 2	Опыт
Сырой фарш			
pH, ед.	6,58	6,55	6,57
Массовая доля влаги, %	72,51	76,13	71,15
ВСС, % к общей влаге	82,6	91,5	90,2
Пластичность, см²/г	14,9	39,5	34,8
Готовый продукт			
pH, ед.	6,61	6,63	6,65
Массовая доля влаги, %	72,38	73,05	69,64
Пластичность, см²/г	11,2	20,5	18,9
ВУС, % к общей влаге	67,1	71,2	75,1
Усилия резания, Н	4,31	5,64	4,93
Выход, %	110	105	120
Потери, %	10	25	10
Органолептическая оценка	4,3	4,4	4,1
Химический состав			
Протеин, %	14,26	14,03	13,01
Жир, %	9,22	9,90	10,10
Зола, %	2,75	2,63	2,57

Данные по химическому составу произведенных колбас указывают на уменьшение содержания протеина по сравнению с «Ялтинской» в образце «Контроль 2» на 0,2 %, а в экспериментальной пробе с темпурной мукой – на 1,25 %. Это объясняется относительно низким уровнем белка в темпурной муке по сравнению с соевым белком и МПМО. Наивысший показатель массовой доли жира зафиксирован в пробе с темпурной мукой (10,10 %). Полученные сведения подтверждают целесообразность применения темпурной муки, поскольку содержание белка в выбранном прототипе вареной колбасы «Ялтинская» должно составлять не менее 10 г.

Сенсорная оценка продемонстрировала, что добавление темпурной муки в мясные композиции на основе мяса птицы не приводит к значительным отклонениям от стандартных критериев для таких колбас. Вкус и аромат приятные, с легкой соленостью и нотками специй. Консистенция вареных колбас с темпурной мукой упругая и плотная, структура равномерная. Тем не менее, пробы с мукой получили более низкую общую балльную оценку из-за эффекта «забеливания» структуры. Это связано с недостаточным количеством мясных пигментов, что ставит задачу по оптимизации цвета.

Интенсивность окраски колбас из механически обваленного мяса птицы можно корректировать с помощью красителей. По итогам исследований созданы формулы вареной и полукопченой колбас с включением темпурной муки и красителя кармина, приведенные в таблице 9.

Таблица 9 – Рецептуры колбас варёной «Майская куриная» и полукопчёной «Академическая куриная»

Table 9 – Recipes for cooked sausages «Mayskaya Kurinaya» and semi-smoked sausages «Akademichskaya Kurinaya»

Сырьё несоленое, кг на 100 кг	«Майская куриная»	«Академическая куриная»
Мясо птицы мехобвалки	84	50
Шпик свиной боковой	–	35
Яйца куриные	1	–
Темпурная мука	15	15
Итого:	100	100
Вода сверх рецептуры	30	15
Пряности и материалы, г на 100 кг сырья		
Соль поваренная пищевая	1300	1300
Нитритная соль	900	900
Сахар	200	150
Перец чёрный	90	180
Перец красный	30	–
Перец душистый	100	90
Смесь фосфатная	400	300
Мускатный орех	150	40
Корица молотая	30	–
Краситель Eco color	200	150

На основании разработанных рецептур и технологий колбасных изделий с темпурной мукой разработаны проекты технической документации (ТУ 10.13.14-ХХХ-04717947-2025 Изделия колбасные вареные из мяса птицы. Колбаса вареная «Майская куриная», ТУ 10.13.14-ХХХ-04717947-2025 Изделия колбасные

полукопченые из мяса птицы. Колбаса «Академическая куриная») и технологической документации – технологические инструкции. Отметим, что все выработанные колбасные изделия отвечали требованиям безопасности согласно Техническому регламенту Евразийского экономического союза «О безопасности мяса птицы и продукции его переработки» (ТР ЕАЭС 051/2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В значительной степени количество и качество мясного изделия зависит от физико-химических свойств составляющих компонентов мясного сырья, способности этих компонентов к межмолекулярному взаимодействию, а также к удержанию белковыми веществами влаги в процессе холодной обработки мяса и последующего термического воздействия. В случае, когда высокое содержание свободной влаги в мясных изделиях нежелательно и требуется усилить связь между его компонентами, предлагаем в мясное сырье вводить добавку – темпурную муку как загуститель. В процессе термической обработки мясного сырья с вводом темпурной муки происходит клейстеризация содержащихся в ней полисахаридов (амилопектина и амилозы), которые при взаимодействии с другими компонентами удерживают влагу, образуя коллоидную дисперсию. При этом полисахариды муки не только удерживают свободную влагу, но взаимодействуют с белковыми молекулами мясного сырья, что позволяет улучшить его структуру и облегчить дальнейшую работу по его формованию. Темпурная мука может заменить нативные и химически модифицированные крахмалы, концентраты и изоляты соевых белков и их модифицированные препараты, превосходящие ее по стоимости, увеличивает выход готовых изделий, сокращает потери и не изменяет содержание белка в конечном продукте, придавая изделиям приятный вкус и внешний вид.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айрапетян А.А. Применение растительных компонентов в технологии вареной колбасы / А.А. Айрапетян, В.И. Манжесов // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2021. № 1. С. 89–94.

2. Алексеев А.Л. Использование зернобобовой культуры маш в производстве фаршевых мясных изделий / А.Л. Алексеев, Г.А. Урбан [и др.] // Проблемы развития АПК региона. 2021. № 4 (48). С. 178–183.

3. Есенгазиева А. Использование фермента и гречневой муки в полукопченых колбасных изделиях / Есенгазиева А., Узаков Я., Каймбаева Л. // Annali d'Italia. 2023. № 42. С. 90–92.

4. Натыров А.К. Улучшение качественных характеристик мясных продуктов из баранины / А.К. Натыров, Б.К. Болаев [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4–1. С. 106–113.

5. Пьяникова Э.А. Влияние комплексной растительной добавки на качественные показатели мясного колбасного изделия / Э.А. Пьяникова, А.Е. Ковалева, Е.Ю. Сидоров // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022. № 3. С. 66–75.

6. Широкова Н.В. Исследование качественных показателей, функционально-технологических свойств изолятов растительного белка / Н.В. Широкова, А.В. Шкуров, А.В. Трегубов, А.А. Куц // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2024. № 1. С. 201–206.

Информация об авторах

Н. П. Шевченко – доцент, кандидат технических наук, технологический факультет, Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, Россия.

М. В. Каледина – доцент, кандидат технических наук, технологический факультет, Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, Россия.

В. П. Витковская – преподаватель, кандидат сельскохозяйственных наук, технологический факультет, Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, Россия.

Д. А. Шемякина – преподаватель, технологический факультет, Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, Россия.

REFERENCES

1. Ayrapetyan, A.A. & Manzhesov, V.I. (2021). Primenenie rastitel'nykh komponentov v tekhnologii varenoy kolbasy [The use of plant components in the technology of cooked sausage]. Tekhnologii i tovarovedenie sel'skokhozyaystvennoy produktsii, (1), 89-94.

2. Alekseev, A.L., Urban, G.A. [et al.]. (2021). Ispol'zovanie zernobobovoy kul'tury mash v proizvodstve farshevykh myasnykh izdeliy [The use of mung bean legume crop in the production of minced meat products]. Problemy razvitiya APK regiona, 4(48), 178-183.

3. Esengazieva, A., Uzakov, Ya. & Kaymbaeva, L. (2023). Ispol'zovanie fermenta i grechnevoy muki v polukopchenykh kolbasnykh izdeliyakh [The use of enzyme and buckwheat flour in semi-smoked sausages]. Annali d'Italia, (42), 90-92.

4. Natyrov, A.K., Bolaev, B.K. [et al.]. (2022). Uluchshenie kachestvennykh kharakteristik myasnykh produktov iz baraniny [Improvement of quality characteristics of mutton meat products]. Polzunovskiy vestnik, 4-1, 106-113.

5. P'yanikova, E.A., Kovaleva, A.E. & Sidorov, E.Yu. (2022). Vliyanie kompleksnoy rastitel'noy dobavki na kachestvennye pokazateli myasnogo kolbasnogo izdeliya [The influence of a complex plant additive on the quality indicators of meat sausage products]. Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK - produkty zdorovogo pitaniya, (3), 66-75.

6. Shirokova, N.V., Shkurov, A.V., Tregubov, A.V. & Kuts, A.A. (2024). Issledovanie kachestvennykh pokazateley, funktsional'no-tekhnologicheskikh svoystv izolyatov rastitel'nogo belka [Study of quality indicators, functional and technological properties of vegetable protein isolates]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy, (1), 201-206.

Information about the authors

N.P. Shevchenko - Belgorod State Agricultural University named after V.Ya. Gorin, Russia, associate professor, PhD in Technical Sciences, technological faculty.

M.V. Kaledina - Belgorod State Agricultural University named after V.Ya. Gorin, Russia, associate professor, PhD in Technical Sciences, technological faculty.

V.P. Vitkovskaya - Belgorod State Agrarian University named after V.I. V.Ya. Gorin, Russia, Lecturer, Candidate of Agricultural Sciences, Faculty of Technology.

D.A. Shemyakina - Belgorod State Agrarian University named after V.I. Gorin, Russia, teacher, Faculty of Technology.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 156–159.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 156–159.

Обзорная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 634:311
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.021 EDN: UNRMZF

БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ CITRUS AURANTIUM L. И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Юлия Владимировна Фролова [1], Елена Михайловна Щетинина [2]

[1, 2] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, г. Москва, Россия
[1] himic14@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6065-2244
[2] schetinina2014@bk.ru, http://orcid.org/0000-0002-3463-9502

Аннотация. *В настоящее время наблюдается большой интерес к использованию в различных отраслях промышленности природных биологически активных веществ растительного происхождения. Горький апельсин (Citrus aurantium L.) широко применяется в пищевой, фармацевтической, парфюмерно-косметической промышленности. Целью данного исследования являлись систематизация и анализ научных публикаций за период с 2000 по 2026 гг., посвященных изучению активных компонентов Citrus aurantium L. и возможности его применения в пищевой промышленности. Большинство биологически активных соединений содержится во всех составных частях растения Citrus aurantium L., однако каждая часть (плоды, кожура, листья, цветы, семена) имеет свой фитохимический профиль, который включает в себя фенольные соединения (флавоноиды, флаваноны, флавоны, фенольные кислоты), алколоиды, витамин С, эфирные масла и др. Такой фитохимический профиль обусловливает биологические свойства Citrus aurantium L. К ним относятся антипролиферативные, противотревожные антиоксидантные, антимикробные и другие свойства. В основном в промышленности используются эфирные масла Citrus aurantium L. благодаря специфическому ароматному профилю. С учетом богатого состава Citrus aurantium L. исследования по его применению в составе специализированных продуктов являются актуальными.*

Ключевые слова: *горький апельсин, эфирное масло, плоды и цветы Citrus aurantium, полифенольные соединения, биологически активные соединения, антиоксидантные свойства, пищевая продукция, специализированные продукты.*

Для цитирования: Фролова Ю. В., Щетинина Е. М. Биологически активные компоненты Citrus aurantium L. и его использование в пищевой промышленности // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 156–159. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.021. EDN: https://elibrary.ru/UNRMZF.

Review article

BIOLOGICALLY ACTIVE COMPONENTS OF CITRUS AURANTIUM L. AND ITS USE IN FOOD INDUSTRY

Yuliya V. Frolova [1], Elena M. Schetinina [2]

[1, 2] Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia
[1] himic14@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6065-2244
[2] schetinina2014@bk.ru, http://orcid.org/0000-0002-3463-9502

Abstract. *There is currently great interest in the use of natural biologically active substances of plant origin in various industries. Bitter orange (Citrus aurantium L.) is widely used in the food, pharmaceutical, perfumery, and cosmetics industries. The aim of this study was to systematize and analyze scientific publications from 2000 to 2026 devoted to the study of the active components of Citrus aurantium L. and the possibility of its application in the food industry. Most biologically active compounds are found in all components of the Citrus aurantium L. plant, but each part (fruit, peel, leaves, flowers, seeds) has its own phytochemical profile, which includes phenolic compounds (flavonoids, flavanones, flavones, phenolic acids), alkaloids, vitamin C, essential oils, etc. This phytochemical profile determines the biological properties of Citrus aurantium L. These include antiproliferative, anti-anxiety, antioxidant, antimicrobial, and other properties. Essential oils of Citrus aurantium L. are primarily used in industry due to their distinctive aromatic profile. Given the rich composition of Citrus aurantium L., research into its use in specialized products is relevant.*

Keywords: *bitter orange, essential oil, fruits and flowers of Citrus aurantium, polyphenolic compounds, biologically active compounds, antioxidant properties, food products, specialized products.*

For citation: Frolova, Yu. V. & Schetinina, E. M. (2026). Biologically active components of Citrus aurantium L. and its use in food industry. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 156-159. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.021. EDN: https://elibrary.ru/UNRMZF.

© Фролова Ю. В., Щетинина Е. М., 2026

БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ CITRUS AURANTIUM L. И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к использованию природных биологически активных веществ, в частности флавоноидов, фенольных кислот, терпенов связан с их функциональными свойствами и нутрицевтическим потенциалом [1]. Вторичные метаболиты растений – это органические вещества, образующиеся в результате вторичного метаболизма и необходимые для адаптации растений к окружающей среде, при этом они не участвуют в росте и размножении растений [2, 3], при этом они участвуют в метаболических процессах человека и нейтрализуют свободные радикалы в организме [2].

Citrus aurantium L. (*Rutaceae*) известный как горький апельсин, кислый апельсин, севильский апельсин, бигарадия – это вечнозеленое дерево с ароматными белыми цветами. Его плоды используют в различных отраслях промышленности, включая пищевую, фармацевтическую и парфюмерную [1, 2]. Плоды, цветы, листья *Citrus aurantium L.* содержат большое количество биологически активных веществ (флавоноидов, алкалоидов, эфирных масел, терпеноидов, а также некоторые витамины и минеральные вещества) [2, 3], которые, как доказано, обладают многочисленными свойствами [2, 4].

Цель исследования – систематизировать и проанализировать научные публикации за период с 2000 по 2026 гг., посвященные изучению активных компонентов *Citrus aurantium L.* и его применению в пищевой промышленности.

МЕТОДЫ

Поиск научных статей осуществлялся по базам данных Scopus, PubMed, Google Scholar, Elibrary по ключевому слову «*Citrus aurantium*» за период с 2000 по 2026 гг.

Критериями включения являлись оригинальные статьи с открытым доступом, обзорные статьи. Критериями исключения являлись материалы конференций, книги, статьи несоответствующие тематике.

С 2000 г. вышло свыше двух тысяч публикаций (рисунок 1), посвященных исследованиям компонентного состава, свойствам и применению *Citrus aurantium L.*

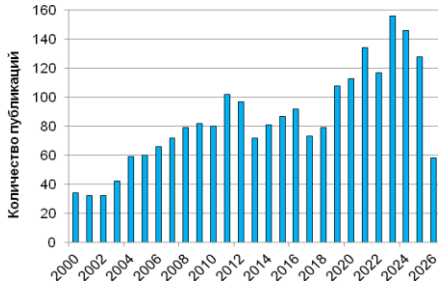


Рисунок 1 – Публикационная активность по ключевому слову «*Citrus aurantium*» по базе данных Scopus

Figure 1 – Publication activity for the keyword «*Citrus aurantium*» in the Scopus database

Исследование выполнено в рамках средств, выделяемых для реализации государственного задания ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (FGMF-2025-0014).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

КОМПОНЕТНЫЙ СОСТАВ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

В настоящее время активно проводятся исследования отдельных частей (плоды, цветы, листья, кожура, семена) *Citrus aurantium L.* с целью выявления зависимостей формирования фитохимического профиля от географического положения региона произрастания, вегетационного периода и времени сбора урожая. Результаты этих исследований позволяют расшить область применения *Citrus aurantium L.* в различных отраслях промышленности, в том числе как источника природных биологически активных веществ. На рисунке 2 показаны исследуемые части и основные свойства содержащихся в них компонентов.

Рисунок 2 – Основные компоненты листьев, кожуры, плодов и цветов *Citrus aurantium L.* и их свойства

Figure 2 – The main components of the leaves, peel, fruits and flowers of *Citrus aurantium L.* and their properties

В зависимости от исследуемой части *Citrus aurantium L.* (листья, кожура, плоды, цветы, семена, в том числе эфирные масла) фитохимический профиль различается. Так например, в работе Karimi [et al.] (2012) было показано, что в метанольных экстрактах цветов содержится большое количество фенольных соединений – общее содержание полифенолов составляло 4,55 ± 0,05 мг экв. галловой кислоты/г, а флавоноидов – 3,83 ± 0,05 мг экв. рутина/г [5]. В исследованиях Lagha-Benamrouche и Madani (2013) отмечалось, что в кожуре общее содержание полифенолов составляет 31,62 ± 0,88 мг экв. галловой кислоты/г, в листьях – 44,41 ± 0,49 мг экв. галловой кислоты/г [6], тогда как в соке содержалось 784,67 мг экв. галловой кислоты/л [7], а в эфирном масле – 3,48 ± 0,10 мг экв. галловой кислоты/г [8].

Эфирные масла цитрусовых относятся к наиболее широко применяемым среди эфирных масел во всем мире. В основном они используются в качестве ароматизаторов в пищевой продукции (акогольные и безалкогольные напитки, мармелад, молочная продукция, мороженое и др.) [9]. Многими исследователями было показано, что лимонен является основным соединением *Citrus aurantium L.* [9]. Например, его содержание в кожуре составляет до 90,25% [9], соке – до 91,61% [9], листьях – до 62 % [10]. Кроме лимонена также содержится линалоол и *β*-мирцен, линалилацетат и др. [4, 8, 11].

ПРИМЕНЕНИЕ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Применение *Citrus aurantium L.* в пищевой промышленности связано с проявлением различных технологических эффектов.

Ароматические соединения и эфирные масла *Citrus aurantium L.* представляют собой интересную альтернативу традиционным консервантам, однако органолептические свойства и изменчивый состав

эфирных масел данных цитрусов ограничивают их промышленное использование [12].

Отдельные части *Citrus aurantium L.* (кожура, незрелые плоды, цветы) веками употреблялись в Китае в качестве приправ и ингредиентов для чая [13], а сок широко используется в Турции в качестве ароматизатора и подкислителя для овощных салатов [14].

В настоящее время проводятся исследования возможности использования *Citrus aurantium L.* в составе разных видов пищевой продукции (рисунок 3). Например, при анализе хлеба, содержащего смесь масел (гвоздичного масла и масла горького апельсина), показано, что при хранении хлеба при 20 ºС в течение 7 дней не происходит потери качественных характеристик. Также отмечено, что добавление эфирного масла замедляет образование плесени [15]. В публикациях отмечено проявление антимикробной активности в отношении микроорганизмов не только эфирных масел [16, 17], но и экстрактов *Citrus aurantium L.* [3].

Рисунок 3 – Использование отдельных частей *Citrus aurantium L.* в пищевой промышленности

Figure 3 – Use of individual parts of Citrus aurantium L. in the food industry

Так как компоненты *Citrus aurantium L.* обладают антимикробной активностью, это свойство предлагается использовать для предотвращения развития микроорганизмов на поверхности пищевой продукции, например для обработки поверхности выпотрошенной охлажденной рыбы, методом окунания в раствор экстракта кожуры. Такая обработка приводит к снижению скорости развития аэробных бактерий и увеличивает срок хранения рыбы [18]. Также исследуется возможность включения экстрактов цитрусовых, в том числе горького апельсина в состав съедобных покрытий. Так, использование покрытия на основе альгината натрия и смеси экстрактов *Citrus aurantium L.* и лимона нанесением на поверхность куриного мяса привело к замедлению роста микроорганизмов и замедлило окислительные процессы (по показателю перекисного и тиобарбитурового чисел) [19].

Необходимость поиска заменителей телячьего сычужного фермента для сыроварения привела к скринингу новых протеаз, которые можно использовать в качестве природных коагулянтов. Одним из таких источников может являться экстракт цветков *Citrus aurantium L.* [20, 21]. В работе [21] показано, что использование протеаз из цветков горького апельсина привело к более высокой степени деградации казеина и образованию пептидов и аминокислот в сырах, что свидетельствует о более интенсивном процессе созревания. Также отмечалось формирование уникального вкуса в конечном продукте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных аналитических исследований за период с 2000 по 2026 гг. было издано свыше двух тысяч публикаций, посвященных исследованиям состава и свойств Citrus aurantium L. Несмотря на богатый фитохимический профиль и широкий ряд описываемых полезных свойств *Citrus aurantium L.*, необходимо отметить их зависимость от географического положения региона произрастания, вегетационного периода и времени сбора урожая, что может влиять на стабильность качества производимой продукции. Особое внимание стоит уделить специфике органолептических свойств *Citrus aurantium L.*, в частности с проявлением горечи, которая может в дальнейшем присутствовать и в готовом пищевом продукте, что негативно скажется на потребительских характеристиках. Таким образом, использование *Citrus aurantium L.* в составе специализированных продуктов с точки зрения полезных свойств является актуальным, а с точки зрения потребительских характеристик требует особого внимания и внесения технологических корректировок по орагнолептическому профилю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Değirmenci H., Erkurt H. Relationship between volatile components, antimicrobial and antioxidant properties of the essential oil, hydrosol and extracts of Citrus aurantium L. flowers // Journal of infection and public health. 2020. Т. 13, № 1. С. 58–67. doi: 10.1016/j.jiph.2019.06.017.

2. Recent developments in Citrus aurantium L.: an overview of bioactive compounds, extraction techniques, and technological applications / J. Fernández-Cabal [et al.] // Processes. 2025. Т. 13, № 1. С. 120. doi: 10.3390/pr13010120.

3. Citrus aurantium flowers: overview of chemistry, functionality, and technological applications / S. Seyyedi-Mansour [et al.] // Molecules. 2025. Т. 30, № 4. С. 930. doi: 10.3390/molecules30040930.

4. An overview on Citrus aurantium L.: Its functions as food ingredient and therapeutic agent / I. Suntar [et al.] // Oxidative medicine and cellular longevity. 2018. Т. 2018, № 1. С. 7864269. doi: 10.1155/2018/7864269.

5. Phenolic compounds characterization and biological activities of Citrus aurantium bloom / E. Karimi [et al.] // Molecules. 2012. Т. 17, № 2. С. 1203–1218. doi: 10.3390/molecules17021203.

6. Lagha-Benamrouche S., Madani K. Phenolic contents and antioxidant activity of orange varieties (Citrus sinensis L. and Citrus aurantium L.) cultivated in Algeria: Peels and leaves // Industrial Crops and Products. 2013. Т. 50. С. 723–730. doi: 10.1016/j.indcrop.2013.07.048.

7. Juice components and antioxidant capacity of four Tunisian Citrus varieties / M.S. Tounsi [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2011. Т. 91, № 1. С. 142–151. doi: 10.1002/jsfa.4164.

8. Essential oil of Citrus aurantium L. leaves: composition, antioxidant activity, elastase and collagenase inhibition / C. Oulebsir [et al.] // Agronomy. 2022. Т. 12, № 6. С. 1466. doi: 10.3390/agronomy12061466.

9. Jabri karoui I., Marzouk B. Characterization of bioactive compounds in Tunisian bitter orange (Citrus aurantium L.) peel and juice and determination of their antioxidant activities // BioMed research international. 2013. Т. 2013, № 1. С. 345415. doi: 10.1155/2013/345415.

10. Gholivand M.B., Piryaei M. A method for fast analysis of volatile components of Citrus aurantium L. leaves // Natural Product Research. 2013. Т. 27, № 14. С. 1315-1318. doi: 10.1080/14786419.2012.730048.

11. Yield, phytochemical constituents, and antibacterial activity of essential oils from the leaves/twigs, branches, branch wood, and branch bark of Sour Orange (Citrus aurantium L.) / M.K. Okla [et al.] // Processes. 2019. Т. 7, № 6. С. 363. doi: 10.3390/pr7060363.

12. Anwar S. [et al.]. Bitter orange (Citrus aurantium L.) oils // Essential oils in food preservation, flavor and safety. Academic Press, 2016. С. 259–268. doi: 10.1016/B978-0-12-416641-7.00029-8.

13. Lu Y., Zhang C., Bucheli P., Wei, D. Citrus flavonoids in fruit and

traditional Chinese medicinal food ingredients in China // Plant Foods for Human Nutrition. 2006. Т. 61, № 2. С. 55–63. doi: 10.1007/s11130-006-0014-8.

14. Karabıyıklı Ş., Değirmenci H., Karapınar M. Inhibitory effect of sour orange (Citrus aurantium) juice on Salmonella Typhimurium and Listeria monocytogenes // LWT-Food Science and Technology. 2014. Т. 55, № 2. С. 421–425. doi: 10.1016/j.lwt.2013.10.037.

15. Şahin F.İ., Acaralı N. Extending shelf life and optimizing effective parameters by using clove oil (Syzygium aromaticum oleum)/orange oil (Citrus aurantium var dulcis oleum) in bread: thermal, morphological and sensory approach // Journal of Food Science and Technology. 2023. Т. 60, № 12. С. 3002–3013. doi: 10.1007/s13197-023-05827-8.

16. Chemical composition and in vitro antimicrobial and antioxidant activities of Citrus aurantium L. flowers essential oil (Neroli oil) / A.H. Ammar [et al.] // Pakistan Journal of Biological Sciences. 2012. Т. 15, № 21. С. pp. 1034–1040. doi: 10.3923/pjbs.2012.1034.1040.

17. Chemical composition of Citrus aurantium L. leaves and zest essential oils, their antioxidant, antibacterial single and combined effects / W. Ouedrhiri [et al.] // J. Chem. Pharm. Res. 2015. Т. 7, № 1. С. 78–84.

18. Efficacy of mint (Mentha arvensis) leaf and citrus (Citrus aurantium) peel extracts as natural preservatives for shelf life extension of chill stored Indian mackerel / P. Viji [et al.] // Journal of food science and technology. 2015. Т. 52, № 10. С. 6278–6289. doi: 10.1007/s13197-015-1788-1.

19. The effect of sodium alginate coating containing citrus (Citrus aurantium) and Lemon (Citrus lemon) extracts on quality properties of chicken meat / Z. Panahi [et al.] // Journal of Food Quality. 2022. Т. 2022, № 1. С. 6036113. doi: https://doi.org/10.1155/2022/6036113.

20. Sour orange Citrus aurantium L. flowers: a new vegetable source of milk-clotting proteases / M.A. Mazorra-Manzano [et al.] // LWT-Food Science and Technology. 2013. Т. 54, № 2. С. 325–330. doi: 10.1016/j.lwt.2013.07.009.

21. Novel milk-clotting enzyme from sour orange flowers (Citrus aurantium L.) as a coagulant in Iranian white cheese / E. Nasiri [et al.] // European Food Research and Technology. 2020. Т. 246, № 1. С. 139–148. doi: 10.1007/s00217-019-03403-z.

Информация об авторах

Ю. В. Фролова – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии».

Е. М. Щетинина – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии».

REFERENCES

1. Değirmenci, H. & Erkurt, H. (2020). Relationship between volatile components, antimicrobial and antioxidant properties of the essential oil, hydrosol and extracts of Citrus aurantium L. flowers. Journal of Infection and Public Health, *13*(1), 58-67. https://doi.org/10.1016/j.jiph.2019.06.017.

2. Fernández-Cabal, J. [et al.]. (2025). Recent developments in Citrus aurantium L.: An overview of bioactive compounds, extraction techniques, and technological applications. Processes, *13*(1), 120. https://doi.org/ 10.3390/pr13010120.

3. Seyyedi-Mansour, S. [et al.]. (2025). Citrus aurantium flowers: Overview of chemistry, functionality, and technological applications. Molecules, *30*(4), 930. https://doi.org/10.3390/molecules30040930.

4. Suntar, I. [et al.]. (2018). An overview on Citrus aurantium L.: Its functions as food ingredient and therapeutic agent. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, *2018*(1), 7864269. https://doi.org/10.1155/2018/7864269.

5. Karimi, E. [et al.]. (2012). Phenolic compounds characterization and biological activities of Citrus aurantium bloom. Molecules, *17*(2), 1203-1218. https://doi.org/10.3390/molecules17021203.

6. Lagha-Benamrouche, S. & Madani, K. (2013). Phenolic contents and antioxidant activity of orange varieties (Citrus sinensis L. and Citrus aurantium L.) cultivated in Algeria: Peels and leaves. Industrial Crops and Products, *50*, 723-730. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.048.

7. Tounsi, M.S. [et al.]. (2011). Juice components and antioxidant capacity of four Tunisian Citrus varieties. Journal of the Science of Food and Agriculture, *91*(1), 142-151. https://doi.org/10.1002/jsfa.4164.

8. Oulebsir, C. [et al.]. (2022). Essential oil of Citrus aurantium L. leaves: Composition, antioxidant activity, elastase and collagenase inhibition. Agronomy, *12*(6), 1466. https://doi.org/10.3390/agronomy12061466.

9. Jabri Karoui, I. & Marzouk, B. (2013). Characterization of bioactive compounds in Tunisian bitter orange (Citrus aurantium L.) peel and juice and determination of their antioxidant activities. BioMed Research International, *2013*(1), 345415. https://doi.org/10.1155/2013/345415.

10. Gholivand, M.B. & Piryaei, M. (2013). A method for fast analysis of volatile components of Citrus aurantium L. leaves. Natural Product Research, *27*(14), 1315-1318. https://doi.org/10.1080/14786419.2012.730048.

11. Okla, M.K. [et al.]. (2019). Yield, phytochemical constituents, and antibacterial activity of essential oils from the leaves/twigs, branches, branch wood, and branch bark of sour orange (Citrus aurantium L.). Processes, *7*(6), 363. https://doi.org/10.3390/pr7060363.

12. Anwar, S. [et al.]. (2016). Bitter orange (Citrus aurantium L.) oils. In Essential oils in food preservation, flavor and safety (pp. 259-268). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00029-8.

13. Lu, Y., Zhang, C., Bucheli, P. & Wei, D. (2006). Citrus flavonoids in fruit and traditional Chinese medicinal food ingredients in China. Plant Foods for Human Nutrition, *61*(2), 55-63. https://doi.org/10.1007/s11130-006-0014-8.

14. Karabıyıklı, Ş., Değirmenci, H. & Karapınar, M. (2014). Inhibitory effect of sour orange (Citrus aurantium) juice on Salmonella Typhimurium and Listeria monocytogenes. LWT - Food Science and Technology, *55*(2), 421-425. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.10.037.

15. Şahin, F.İ. & Acaralı, N. (2023). Extending shelf life and optimizing effective parameters by using clove oil (Syzygium aromaticum oleum)/orange oil (Citrus aurantium var dulcis oleum) in bread: Thermal, morphological and sensory approach. Journal of Food Science and Technology, *60*(12), 3002-3013. https://doi.org/10.1007/s13197-023-05827-8.

16. Ammar, A.H. [et al.]. (2012). Chemical composition and in vitro antimicrobial and antioxidant activities of Citrus aurantium L. flowers essential oil (Neroli oil). Pakistan Journal of Biological Sciences, *15*(21), 1034-1040. https://doi.org/10.3923/pjbs.2012.1034.1040.

17. Ouedrhiri, W. [et al.]. (2015). Chemical composition of Citrus aurantium L. leaves and zest essential oils, their antioxidant, antibacterial single and combined effects. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, *7*(1), 78-84.

18. Viji, P. [et al.]. (2015). Efficacy of mint (Mentha arvensis) leaf and citrus (Citrus aurantium) peel extracts as natural preservatives for shelf life extension of chill stored Indian mackerel. Journal of Food Science and Technology, 52 (10), 6278-6289. https://doi.org/10.1007/s13197-015-1788-1.

19. Panahi, Z. [et al.]. (2022). The effect of sodium alginate coating containing citrus (Citrus aurantium) and lemon (Citrus lemon) extracts on quality properties of chicken meat. Journal of Food Quality, *2022*(1), 6036113. https://doi.org/10.1155/2022/6036113.

20. Mazorra-Manzano, M.A. [et al.]. (2013). Sour orange Citrus aurantium L. flowers: A new vegetable source of milk-clotting proteases. LWT - Food Science and Technology, *54*(2), 325-330. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.07.009.

21. Nasiri, E. [et al.]. (2020). Novel milk-clotting enzyme from sour orange flowers (Citrus aurantium L.) as a coagulant in Iranian white cheese. European Food Research and Technology, *246*(1), 139-148. https://doi.org/10.1007/s00217-019-03403-z.

Information about the authors

Yu.V. Frolova - Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Food Biotechnology and Specialized Products, Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center of Nutrition and Biotechnology".

E.M. Shchetinina - Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Food Biotechnology and Specialized Products of the Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Research Center of Nutrition and Biotechnology".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 160–164.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 160–164.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.952
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.022 EDN: ROWXWU

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗА МОРОЖЕНЫМИ РЫБНЫМИ ПОЛУФАБРИКАТАМИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ПИЩЕВОЙ РЫБНОЙ ПРОДУКЦИИ

Анна Лобсановна Блинова

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия
blinova.al@dgtru.ru

Аннотация. *В статье анализируются нормативные документы, требования которых направлены на производство безопасной и качественной специализированной пищевой рыбной продукции: технические регламенты и документы по стандартизации, действующие в отношении мороженого рыбного филе как полуфабриката для дальнейшей технологической переработки в специализированный продукт. В статье установлено, что показатели технологической пригодности рыбных полуфабрикатов для производства специализированной рыбной продукции установлены в нормативных документах только в отношении детского питания, поэтому контроль рыбных полуфабрикатов для производства других специализированных рыбных продуктов может носить субъективный характер. Исследование выявило и другие «узкие места» контроля рыбных полуфабрикатов, в связи с чем предложена более совершенная структура производственного контроля за мороженым филе из рыбы, предназначенным для производства специализированной рыбной продукции. Данное исследование может быть использовано специалистами рыбной отрасли при разработке собственных стандартов, методических материалов и программ производственного контроля.*

Ключевые слова: *нормативные документы, специализированная пищевая рыбная продукция, система контроля, программа производственного контроля.*

Для цитирования: Блинова А. Л. Построение системы контроля за мороженными рыбными полуфабрикатами для производства специализированной пищевой рыбной продукции // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 160–164. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.022. EDN: https://elibrary.ru/ROWXWU.

Original article

CONSTRUCTION OF CONTROL SYSTEM FOR FROZEN FISH SEMI-FINISHED PRODUCTS FOR PRODUCTION OF SPECIALIZED FISH FOOD PRODUCTS

Anna L. Blinova

Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia
blinova.al@dgtru.ru

Abstract. *The article analyzes regulatory documents whose requirements are aimed at the production of safe and high-quality specialized fish products: technical regulations and standardization documents that apply to frozen fish fillets as semi-finished products for further technological processing. The article establishes that the indicators of technological suitability of fish semi-finished products for the production of specialized fish products are established in regulatory documents only in relation to baby food, so the control of fish semi-finished products for the production of other specialized fish products may be subjective. The study also identified other "bottlenecks" in the control of fish semi-finished products, which led to the development of a more advanced structure for the production control of frozen fish fillets intended for the production of specialized fish products. This study can be used by fish industry professionals to develop their own standards, guidelines, and production control programs.*

Keywords: *regulatory documents, specialized food fish products, control system, industrial control program.*

For citation: Blinova, A. L. (2026). Construction of control system for frozen fish semi-finished products for production of specialized fish food products. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 160-164. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.022. EDN: https: //elibrary.ru/ROWXWU.

ВВЕДЕНИЕ

Важным видом пищевой рыбной продукции являются мороженые рыбные полуфабрикаты (далее полуфабрикаты), пользующиеся большим спросом как у населения, так и у предприятий общественного питания. Нормативные требования к их безопасности и качеству содержатся в ряде технических регламентов, а также стандартов, по которым они производятся. Если изготовитель заявляет об их особенных

© Блинова А. Л., 2026

свойствах (лечебных, профилактических, диетических или как компонентов для производства детского питания), то полуфабрикат следует считать специализированным, так как он предназначен для изготовления продукции для отдельной категории граждан [1].

Для контроля качества и безопасности полуфабрикатов (на примере филе из рыбы), предназначенных для технологической переработки в специализированную рыбную продукцию, не подлежащую повторному замораживанию, этих документов недостаточно, так как существуют риски потери качества и безопасности полуфабрикатов при первичной переработке, шоковой заморозке и их дальнейшем хранении. Это может выражаться в потере влаги, окислении жиров, несоблюдении температурного режима на этапах технологической переработки, микробиологического обсеменения и др.

Филе – это продольная часть тела рыбы различной формы и размера, срезанная параллельно позвоночной кости. Оно является полуфабрикатом для использования в качестве сырьевого компонента для производства рыбных котлет, рыбных палочек, рыбных консервов, сыро-вяленых продуктов и другого ассортимента. Если из филе производят детское питание, лечебные профилактические или диетические продукты, то сырье, используемое для их изготовления, должно отвечать требованиям как к специализированному продукту и при контроле отвечать повышенным требованиям в части отсутствия костей, низкого содержания жира или окисленных липидов и пищевой ценности продукта.

К повышенному риску получения небезопасной продукции может привести недостаточная система контроля, связанная с отсутствием в нормативных документах дополнительных показателей к филе из рыбы, предназначенной для производства специализированной продукции.

Цель работы – обосновать нормативные основы совершенствования системы контроля за соответствием мороженого рыбного филе, предназначенного для изготовления специализированной рыбной продукции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Провести анализ нормативных документов, в которых содержатся требования к безопасности и качеству мороженого рыбного филе, предназначенного для изготовления специализированных рыбных продуктов.

2. Установить «узкие места» контроля за мороженым рыбным филе.

3. Усовершенствовать систему контроля в отношении изготовления мороженого рыбного филе как полуфабриката для производства специализированных рыбных продуктов.

Объектом исследования являются технологические процессы производства и хранения мороженого рыбного филе.

Предметом исследования выступает методическое обеспечение контроля качества и безопасности мороженого рыбного филе.

Методы исследования: поиск и сравнение требований нормативных документов по операциям переработки и хранения рыбных полуфабрикатов; системный анализ причин критичности контроля и построение усовершенствованной программы контроля.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ нормативных документов, (далее НД), относящихся к рыбной продукции, показал, что они не содержат определения классификации продукта «специализированная пищевая **рыбная** продукция», хотя требования этих документов применимы к производству мороженого рыбного филе, предназначенного для технологической переработки в специализированную рыбную продукцию. Анализ наиболее информативных в отношении мороженого рыбного филе НД представлен в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Анализ нормативных документов, предназначенных для производства мороженого рыбного филе
Table 1 – Analysis of regulatory documents intended for the production of frozen fish fillets

Нормативный документ	Краткое содержание	Требования к специализированной рыбной продукции	Значимость для системы контроля
1	2	3	4
1. ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» [2]	Содержит термины и определения на пищевую продукцию, общие требования безопасности ко всем видам пищевой продукции и процессам ее производства	Содержит определение пищевой продукции диетического, лечебного, профилактического назначения, а также детского питания, устанавливает требования безопасности к специализированной продукции, форму оценки ее соответствия, требования безопасности к производственным объектам, подлежащим государственной регистрации	Возможность идентификации мороженого филе из рыбы как полуфабриката для производства специализированных пищевых рыбных продуктов; установление требований к сырью, к безопасностям: микробиологической (приложение 2 (п.1.12-1.14)), гигиенической (приложение 3 п.3), содержанию радионуклеидов: цезия-137 и стронция-90 (приложение 4)
2. ТР ТС 027/2012 «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного, диетического профилактического питания» [3]	Дает определения продуктам диетического лечебного и диетического профилактического питания, а также детского питания, питания для спортсменов, беременных и кормящих женщин	Запрещает использовать для производства продукции диетического лечебного и диетического профилактического питания, для питания беременных и кормящих женщин и детского питания продовольственное пищевого сырьё, содержащее ГМО и (или) компоненты, полученные из ГМО, другие требования устанавливаются с отсылкой к требованиям ТР ТС 021/2011	Возможность контроля отсутствия запрещенного сырья, состава заменителей соли (приложение 2), остальной контроль по требованиям ТР ТС 021/2011

Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

1	2	3	4
3. ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции» [4]	Содержит определение «мороженая пищевая рыбная продукция», методы ее идентификации, устанавливает требования к безопасности рыбного сырья, полуфабрикатов и готовой рыбной продукции, к процессам их производства, в том числе к оборудованию, используемому в процессе производства мороженой рыбной продукции	Запрещает в качестве сырья для детского питания использовать рыбу садкового содержания и придонных видов рыб; сырья, подвергнутого повторному замораживанию; некоторые пищевые добавки; устанавливает требования к пищевой ценности и показателям безопасности только для питания детей дошкольного и школьного возраста; детское питание раннего возраста производить на специализированных технологических линиях	Возможность контроля допустимых уровней показателей безопасности сырья и полуфабрикатов, предназначенных для переработки для детского питания
4. ГОСТ 33282-2024 «Филе рыбы мороженое для детского питания. Технические условия» [5]	Содержит все характеристики и показатели филе из рыбы для детского питания	Запрещает использовать сырье для полуфабриката, полученного из ГМО, выращенного с применением стимуляторов роста и гормональных препаратов, а также содержащего остаточные антимикробные средства	Дает возможность контролировать все требования, установленные стандартом на мороженое рыбное филе для детского питания
5. ГОСТ 3948-2016 «Филе рыбы мороженое Технические условия» [6]	Содержит требования на мороженое филе из рыб всех семейств, дает определение «филе из рыбы», устанавливает показатели качества, в том числе требования к сырью	–	Дает возможность контролировать установленные требования на рыбное филе, а путем введения дополнительных показателей технологической пригодности для специализированной рыбной продукции использовать при разработке ТУ или СТО

Из содержания таблицы следует, что рассмотренные технические регламенты содержат требования безопасности, достаточные для производства исследуемого объекта – мороженого рыбного филе, используемого для технологической переработки в специализированную рыбную продукцию.

ГОСТ 33282 содержит полный перечень требований на филе из рыбы, предназначенного для детского питания.

Для производства других специализированных полуфабрикатов необходимо разрабатывать документы по стандартизации (технические условия или стандарты организации) с использованием положений ГОСТ 33282, ГОСТ 3948 с внесением совокупности дополнительных требований в зависимости от категории потребителя конечного продукта, которые будут относить эти полуфабрикаты в особую категорию по сравнению с простыми (введение требований к количеству костей, микротрещин и др.).

Анализ положений СаНПиН 2.3.4.050-96.2.3.4 «Предприятия пищевой и перерабатывающей промышленности (технологические процессы, сырье). Производство и реализация рыбной продукции. Санитарные правила и нормы», устанавливающие требования к рыбоперерабатывающим предприятиям, в том числе к температурным режимам обработки и хранения, которые критичны для мороженых рыбных полуфабрикатов, предназначенных для изготовления, например, детского питания, не приводится, так как это ведомственный документ, и все его обязательные требования перенесены в технические регламенты, обязательные для исполнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Отнесение мороженого рыбного филе в нормативном документе (ТУ, СТО) к категории специализированного полуфабриката, предназначенного для технологической переработки в специализированную рыбную продукцию, требует адаптации типовой программы производственного контроля (далее ППК) к специфике производства таких полуфабрикатов. Для этого были определены уязвимые этапы контроля, выявлены причины критичности контроля на этих этапах производства мороженого рыбного филе [7]. Результаты представлены в виде таблицы 2.

Таблица 2 – Причины критичности на этапах контроля полуфабриката
Table 2 – Reasons for criticality at the semi-finished product control stages

Этап контроля	Проблема	Причина критичности контроля
1	2	3
1. Приемка и первичная оценка сырья	Недостаточный контроль свежести и температуры рыбы перед разделкой	Филе как специализированный полуфабрикат должен быть получен из сырья высокого качества
2. Технологическая пригодность	Недостаточный контроль за наличием механических повреждений, полного удаления костей и других посторонних включений	Снижает технологическую пригодность филе для приготовления специализированных продуктов
3. Температурный режим на разделке и последующее охлаждение	Продолжительные перерывы без контроля температуры, связанные с отсутствием непрерывного температурного мониторинга на линии	Повышение риска микробиологической порчи и снижения качества до дальнейшей переработки из-за нарушения «холодовой цепи»
4. Шоковая заморозка и формирование мороженого филе	Несоответствие режимов заморозки, таких как температура, скорость и время при отсутствии последующего контроля температуры внутри блока	Повышение риска из-за невозможности подтверждения требуемых параметров, причина распространения патогенной микрофлоры

Продолжение таблицы 2 / Continuation of table 2

1	2	3
5. Микробиологический и санитарный контроль	Недостаточная чистота микробиологического контроля с точки зрения гигиены оборудования, инвентаря и персонала	Особенно критично, если филе предназначено для детского питания
6. Хранение и транспортирование	Наличие разрывов «холодовой цепи» при отсутствии контроля нахождения филе при несоответствующей температуре	Снижение пищевой и технологической ценности филе
7. Нормативно-методическое обеспечение	Фрагментарность требований к филе из-за отсутствия показателей технологической пригодности	Отсутствуют единые нормы технологической пригодности филе, что приводит к субъективности контроля
8. Организация производственного контроля	Отсутствие четко выделенных контрольных критических точек (ККТ), что приводит к неэффективной верификации контрольных результатов	Проблематично системно управлять рисками в ККТ, что затрудняет обратную связь, необходимую для улучшений

Из содержания таблицы следует, что «узкие места» контроля филе – это участки, с неустановленным компонентом контроля, на которых возможно резкое повышение риска изготовления, не соответствующего по качеству и безопасности для технологической пригодности полуфабриката.

На основе определения «узких мест» контроля сформирована структура системы контроля для специализированного полуфабриката – мороженого рыбного филе, предназначенного для производства специализированных рыбных продуктов. Она представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Структура системы контроля мороженого рыбного филе, предназначенного для переработки в специализированный продукт

Table 3 – Structure of the control system for frozen fish fillets intended for processing into a specialized product

Компонент системы контроля	Содержание компонента	Получаемый результат
1. Классификация продукта	Отнесение рыбного филе, к категории специализированного рыбного полуфабриката для его дальнейшей технологической переработки в специализированную продукцию	Совершенствование нормативного обеспечения производства мороженых рыбных полуфабрикатов с ориентацией на технологическую пригодность для производства специализированной рыбной продукции
2. Показатели качества и безопасности	Введение дополнительных показателей, определяющих пригодность филе для производства специализированной продукции	Снижение брака на последующих этапах производства
3. Выбор контрольных критических точек (ККТ)	Нормирование ККТ на операциях приемки сырья, разделки рыбы, шоковой заморозки, хранении и транспортировании	Эффективное управление рисками для быстрого обнаружения отклонений
4. Микробиологический и санитарный контроль	Увеличение числа исследований сырья и готового полуфабриката по микробиологическим показателям	Повышение безопасности филе, связанного со своевременным реагированием на риски
5. Температурный мониторинг	Непрерывный контроль и регистрация температуры на этапах: сырье–филе–шоковая заморозка	Недопущение разрывов «холодовой цепи» для обеспечения качества и безопасности филе
6. Документирование результатов контроля	Регистрация данных контроля с обязательной привязкой к партии сырья	Обеспечение прослеживаемости и обратной связи для совершенствования технологии
7. Разработка программы производственного контроля (ППК)	ППК для производства специализированного полуфабриката – филе из рыбы с учетом результатов внутреннего аудита и выполнения корректирующих действий при отклонениях	ППК, документально оформленная, направленная на управление качеством и безопасностью полуфабрикатов

Данные таблицы свидетельствуют о разработке структуры контроля мороженого рыбного филе, основанной на увязке требований нормативных документов с принципами системы ХАССП, обязательной для всех пищевых производств.

ВЫВОДЫ

Анализ нормативных документов, регламентирующих требования к производству специализированной рыбной продукции из мороженых рыбных полуфабрикатов, показал, что требования к безопасности таких полуфабрикатов задаются требованиями технических регламентов, а требования к качеству – документами по стандартизации, в которых должны присутствовать все показатели технологической пригодности продукта. Отсутствие таких показателей приводит к субъективному контролю качества полуфабрикатов.

Наиболее уязвимыми участками контроля являются: приемка сырья, технология переработки, температурный режим при разделке и заморозке, а также хранение и транспортирование полуфабрикатов, в том числе из-за риска нарушения «холодовой цепи».

Усовершенствование контроля заключается в выделении мороженого рыбного филе, предназначенного для дальнейшей переработки в специализированную продукцию как специализированного полу-

фабриката, введении более жестких показателей качества, с конкретными критическими пределами в ККТ, усилении микробиологического и санитарного контроля, а также проведения непрерывного мониторинга температуры на уязвимых участках. Результаты данного исследования могут помочь специалистам рыбной отрасли при разработке внутренних документов и адаптации типовых ППК в отношении специализированных полуфабрикатов для дальнейшего получения качественной и безопасной специализированной продукции с высокими потребительскими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белова М.П. Этапы разработки специализированных продуктов для диабетиков на примере рыбных полуфабрикатов / М.П. Белова // Пищевая индустрия и общественное питание: современное состояние и перспективы развития : Материалы I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Улан-Удэ : Изд-во ВСГУТУ, 2017. С. 103–106.

2. ТР ТС 021/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции»: принят Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 880. Москва : Изд-во стандартов, 2011. 242 с.

3. ТР ТС 027/2012. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и профилактического питания» : принят Решением Комиссии Таможенного союза от 15 июня 2012 г. № 34. Москва : Изд-во стандартов. 2012. 26 с.

4. ТР ЕАЭС 040/2016. Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции» : принят Решением Комиссии Евразийского экономического союза от 18 октября 2016 г. № 162. Москва : Изд-во стандартов. 2016. 85 с.

5. ГОСТ 33282-2024 «Филе рыбы мороженое для детского питания. Технические условия». Межгосударственный стандарт. М. : ФГБУ «Институт стандартизации». 2015.10 01. 22 с.

6. ГОСТ 3948-2016 «Филе рыбы мороженое. Технические условия». Межгосударственный стандарт. М. : Стандартинформ. 2018-01-01. 18 с.

REFERENCES

1. Belova, M.P. (2017). Stages of development of specialized products for diabetics on the example of fish semi-finished products. In Food industry and public catering: Current state and development prospects: Materials of the I All-Russian scientific and practical conference with international participation (pp. 103-106). Ulan-Ude: Publishing House of VSGUTU. (In Russ.).

2. TR CU 021/2011. (2011). Technical Regulations of the Customs Union "On Food Safety" (adopted by the Decision of the Commission of the Customs Union dated December 9, 2011, No. 880). Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

3. TR CU 027/2012. (2012). Technical Regulations of the Customs Union "On the Safety of Certain Types of Specialized Food Products, Including Dietary Medical and Preventive Nutrition" (adopted by the Decision of the Customs Union Commission dated June 15, 2012, No. 34). Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

4. TR EAEU 040/2016. (2016). Technical Regulations of the Eurasian Economic Union "On the Safety of Fish and Fish Products" (adopted by the Decision of the Commission of the Eurasian Economic Union dated October 18, 2016, No. 162). Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

5. GOST 33282-2024. (2015). Fillet of fish frozen for baby food. Technical conditions (Interstate Standard). Moscow : FGBU "Institute of Standardization". (In Russ.).

6. GOST 3948-2016. (2018). Frozen fish fillets. Technical conditions (Interstate Standard). Moscow : Standartinform. (In Russ.).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 165–170.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 165–170.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК641.5
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.023 EDN: VRLXRT

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИОКСИДАНТНОГО И ВИТАМИННОГО КОМПЛЕКСА ФЕРМЕНТИРОВАННЫХ НАПИТКОВ НА ОСНОВЕ ЧАЙНОГО ГРИБА

Ольга Викторовна Чугунова [1], Антон Владимирович Вяткин [2], Александр Валерьевич Арисов [3]

[1, 2, 3] ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», г. Екатеринбург, Россия
[1] chugun.ova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7039-4047
[2] 3dognight2009@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-0214-2398
[3] arisov_av@usue.ru, https://orcid.org/0000-0002-8005-1697

Аннотация. *В статье представлены результаты исследования антиоксидантного и витаминного комплекса 6 образцов безалкогольных ферментированных напитков, представленных в розничной торговой сети. Установлено, что значения общей антиоксидантной активности исследуемых напитков находятся в диапазоне от 0,67±0,02 до 3,63±0,11 ммоль-экв/дм^3, что в свою очередь позволяет удовлетворить рекомендуемую суточную норму потребления в пересчете на аскорбиновую кислоту на 2,1–11,3 %.*

Также проведено исследование содержания водорастворимых витаминов, в результате которого установлено, что содержание пантотеновой кислоты находится в диапазоне от 0,30±0,01 до 0,84±0,03 мг/100 г и позволяет удовлетворить суточную потребность в витамине B5 на 6,0–16,8 %. При этом содержание рибофлавина находится в диапазоне от 0,44±0,02 до 1,23±0,04 мг/100 г, что позволяет удовлетворить суточную потребность в витамине B2 на 33,8–94,6 %. В результате исследований содержания жирорастворимых витаминов установлено, что содержание α-токоферола находится в диапазоне от 1,2±0,1 до 5,6±0,2 мкг/100 г, что позволяет удовлетворить суточную потребность в витамине E на 8–37,3 %.

Ключевые слова: *общая антиоксидантная активность, витаминный комплекс, комбуча, ферментированные напитки.*

Для цитирования: Чугунова О. В., Вяткин А. В., Арисов А. В. Исследование антиоксидантного и витаминного комплекса ферментированных напитков на основе чайного гриба // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 165–170. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.023. EDN: https://elibrary.ru/VRLXRT.

Original article

RESEARCH ON ANTIOXIDANT AND VITAMIN COMPLEX OF FERMENTED BEVERAGES ON BASED ON KOMBUCHA

Olga V. Chugunova [1], Anton V. Vyatkin [2], Alexander V. Arisov [3]

[1, 2, 3] Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia
[1] chugun.ova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7039-4047
[2] 3dognight2009@mail.ru, https://orcid.org/ 0000-0003-0214-2398
[3] arisov_av@usue.ru, https://orcid.org/0000-0002-8005-1697

Abstract. *The article presents the results of a study of the antioxidant and vitamin complex of 6 samples of non-alcoholic fermented beverages presented in a retail chain. It was found that the values of the total antioxidant activity of the studied beverages are in the range from 0.67±0.02 to 3.63±0.11 mmol-eq/dm^3, which in turn makes it possible to meet the recommended daily intake rate in terms of ascorbic acid by 2.1–11.3%.*

A study of the content of water-soluble vitamins was also conducted, as a result of which it was established that the content of pantothenic acid is in the range from 0.30±0.01 to 0.84±0.03 mg/100 g and allows satisfying the daily requirement for vitamin B5 by 6.0-16.8%. At the same time, the riboflavin content ranges from 0.44±0.02 to 1.23±0.04 mg/100 g, which makes it possible to meet the daily requirement of vitamin B2 by 33.8-94.6%. As a result of studies of the content of fat-soluble vitamins, it was found that the content of alpha-tocopherol ranges from 1.2±0.1 to 5.6±0.2 micrograms/100 g, which makes it possible to meet the daily requirement for vitamin E by 8-37.3%.

Keywords: *total antioxidant activity, vitamin complex, kombucha, fermented drinks.*

For citation: Chugunova, O. V., Vyatkin, A. V. & Arisov, A. V. (2026). Research on antioxidant and vitamin complex of fermented beverages on based on kombucha. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 165-170. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.023. EDN: https: //elibrary.ru/VRLXRT.

© Чугунова О. В., Вяткин А. В., Арисов А. В., 2026

ВВЕДЕНИЕ

Перспектива расширения ассортимента и повышения качества ферментированных безалкогольных напитков обуславливается снижением содержания биологически активных веществ в продуктах питания, входящих в рацион человека, связанного с совокупностью различных факторов, включающих применение интенсивных технологий и высокотемпературных режимов на различных этапах производства, а также выращивание растительного сырья на обедненных почвах. Приобретение уникальных органолептических характеристик, включая вкус, текстуру и внешний вид, а также увеличение функционального и физиологического эффекта от потребления, включая противомикробные [5, 8], антиоксидантные [6] и антиканцерогенные свойства [9], а также улучшений функций печени, иммунной системы и желудочно-кишечного тракта напрямую связано с процессом ферментации ингредиентов безалкогольных напитков плодово-ягодного и растительного происхождения.

Особую популярность и значение в настоящее время приобретает такой ферментированный безалкогольный напиток, как комбуча – представляющий собой кисло-сладкий напиток, получаемый в результате ферментации чайной или альтернативной основы с использованием любых источников сахаров, обеспечивающих протекание процесса, а также различных штаммов симбиотической культуры уксуснокислых бактерий и дрожжей (SCOBY) [10]. Вариативность всех используемых в производстве данной категории ферментированных напитков ингредиентов позволяет сформировать уникальные полезные и потребительские свойства (рис. 1) [1, 2], а внесение вкусоароматических композиций и ингредиентов в высушенном виде, в виде соков, пюре и экстрактов различного растительного сырья, включая пряности, травы, фрукты, а также плодово-ягодное сырье, позволяет регулировать состав биологически активных соединений конечного напитка (рис. 2) [3, 4, 7].

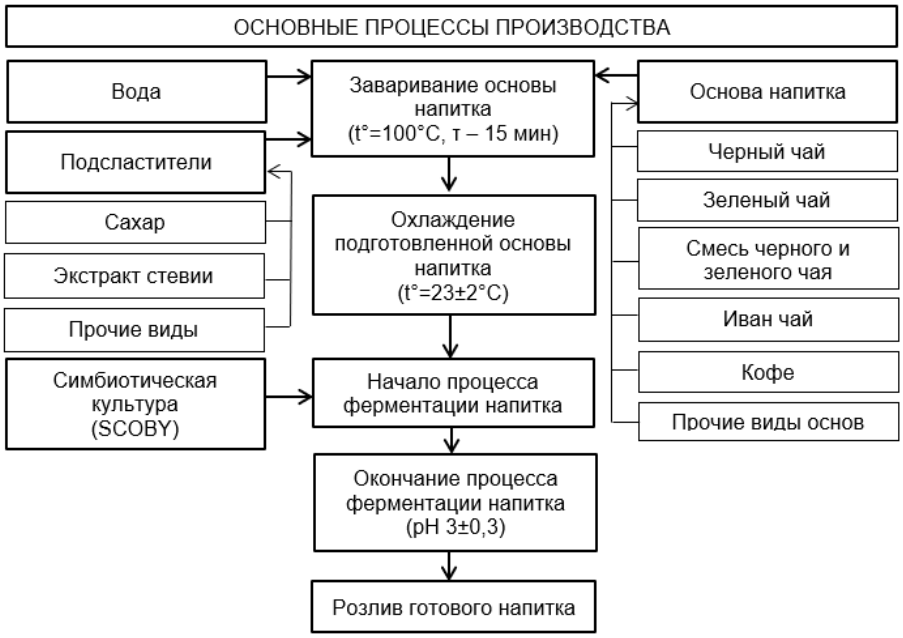


Рисунок 1 – Основные процессы обобщенной технологической схемы производства безалкогольных ферментированных напитков на основе чайного гриба

Figure 1 – The main processes of the generalized technological scheme for the production of non-alcoholic fermented beverages based on kombucha

Целью данного исследования являлось изучение антиоксидантного комплекса через определение общей антиоксидантной активности, а также содержания пантотеновой кислоты, рибофлавина, α-токоферола в безалкогольных ферментированных напитках, представленных в торговой сети с целью дальнейшего формирования пищевых систем и рационов с выраженными потребительскими характеристиками функциональной направленности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе представлены результаты исследования 6 образцов ферментированного безалкогольного напитка на основе чайного гриба Hill Kombucha (ООО «Комбуча»), реализуемых в торговой сети. Наименование, состав и профилограммы органолептических показателей исследуемых напитков представлены в таблице 1. Исследования осуществлялись по ГОСТ ISO 6658-2016 «Органолептический анализ. Методология. Общее руководство» по двадцатипятибалльной шкале (пятибалльной универсальной шкале для каждого отдельного показателя) с комиссией, включающей 6 испытателей. Сумма баллов всех показателей у исследуемых образцов находится в диапазоне от 13,0 до 19,0 баллов (минимальное значение у образца «Sagaan Dailya» Hill Kombucha, максимальное – у образца «Lavender & Vanilla» Hill Kombucha). Необходимо отметить тот факт, что довольно низкие баллы за органолептический показатель кислотности во вкусе у большинства образцов обуславливаются значительным содержанием остаточного или добавленного сахара – исключением является образец «Green» Hill Kombucha.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение значений общей антиоксидантной активности осуществлялось с использованием многофункционального потенциометрического анализатора МПА-1 по ТУ 4215-003-05828695-07 (Нормативная документация: МВИ 02.005-07 Методика определения антиоксидантной активности пищевых продуктов, продовольственного сырья, БАД и витаминов методом потенциометрии с применением анализатора МПА-1).

Определение качественного и количественного состава водорастворимых (пантотеновая кислота, пиридоксин, никотиновая кислота и рибофлавин) и жирорастворимых (ретинол, кальцеферол D3, α-токоферол) витаминов осуществлялось с использованием хроматографа жидкостного Agilent 1260 InfinityII (Нормативная документация: ОФС.1.2.3.0017.15 Методы количественного определения витаминов).

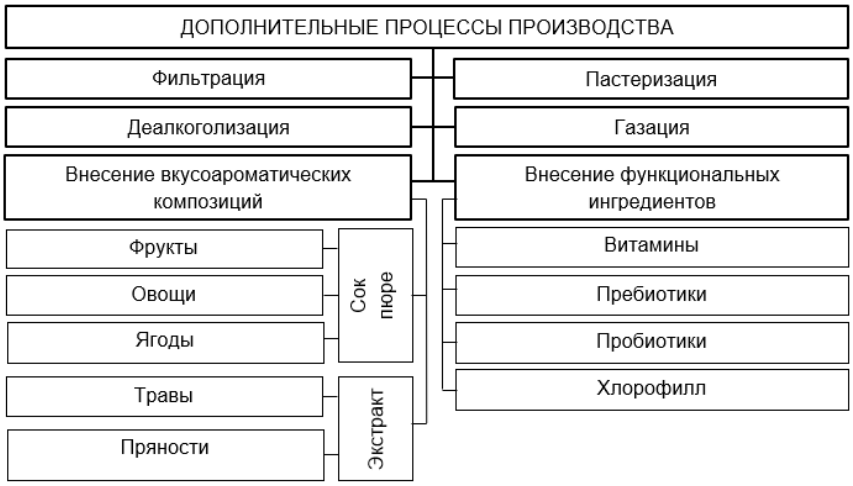
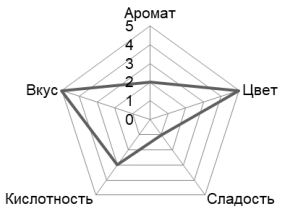
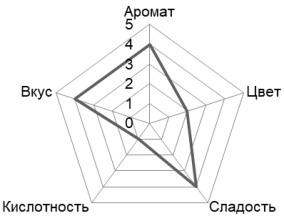
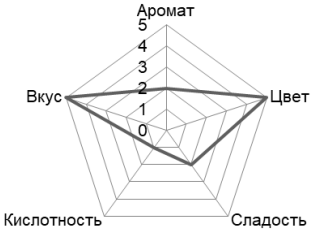


Рисунок 2 – Дополнительные процессы технологической схемы производства безалкогольных ферментированных напитков на основе чайного гриба

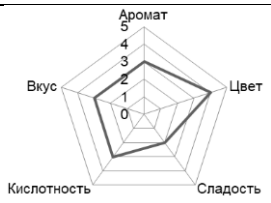
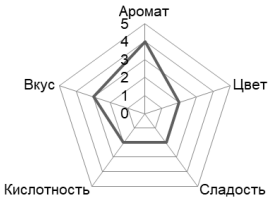
Figure 2 – Additional processes of the technological scheme for the production of non-alcoholic fermented beverages based on kombucha

Таблица 1 – Наименование, регламентированный состав и профилограмма органолептических показателей исследуемых ферментированных напитков

Table 1 – Name, regulated composition and profilogram of organoleptic parameters of the studied fermented beverages

Наименование	Профилограмма органолептических показателей
1	2
«Green» Hill Kombucha Нормативная документация: ТУ 9185-001-27494674-2015 Регламентируемый производителем состав: вода питьевая очищенная, сахар, чай зеленый, культура чайного гриба	
«Mint» Hill Kombucha Нормативная документация: ТУ 9185-001-27494674-2015 Регламентируемый производителем состав: вода питьевая очищенная, сахар, мята, культура чайного гриба	
«Ivan-Chai» Hill Kombucha Нормативная документация: ТУ 9185-001-27494674-2015 Регламентируемый производителем состав: вода питьевая очищенная, сахар, иван-чай, культура чайного гриба	

Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

1	2
«Rose» Hill Kombucha Нормативная документация: ТУ 9185-001-27494674-2015 Регламентируемый производителем состав: вода питьевая очищенная, сахар, чай зеленый, гибискус, мята, культура чайного гриба	
«Lavender & Vanilla» Hill Kombucha Нормативная документация: ТУ 9185-001-27494674-2015 Регламентируемый производителем состав: вода питьевая очищенная, сахар, чай зеленый, лаванда, ванилин, культура чайного гриба	
«Sagaan Dailya» Hill Kombucha Нормативная документация: ТУ 9185-001-27494674-2015 Регламентируемый производителем состав: вода питьевая очищенная, сахар, чай черный, чабрец, саган-дайля, культура чайного гриба	

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенных исследований общей антиоксидантной активности у образцов безалкогольных ферментированных напитков Hill Kombucha установлено, что значения исследуемого показателя находятся в диапазоне от 0,67±0,02 до 3,63±0,11 ммоль-экв/дм^3 (минимум у образца «Mint», максимум – у образца «Green»). Таким образом, употребление данных напитков позволяет удовлетворить рекомендуемую суточную норму потребления в пересчете на аскорбиновую кислоту на 2,1–11,3 % (экспериментально установленного значения АОА раствора 90 мг аскорбиновой кислоты 32,024±0,350 ммоль-экв/дм^3).

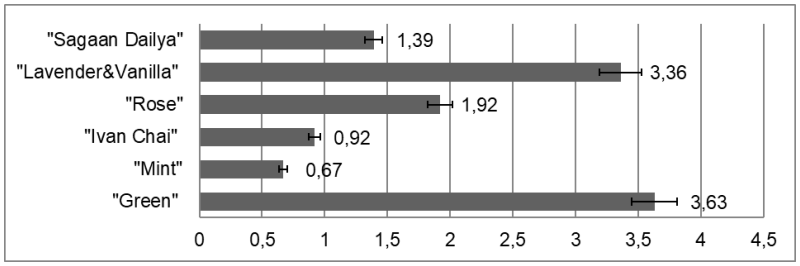


Рисунок 3 – Значения общей антиоксидантной активности исследуемых образцов безалкогольных ферментированных напитков, ммоль-экв/дм^3 (n = 3, p = 0,95)

Figure 3 – Values of the total antioxidant activity of the studied samples of non-alcoholic fermented beverages, mmol-eq/dm3 (n = 3, p = 0.95)

Согласно результатам проведенных исследований содержания водорастворимых витаминов, у образцов безалкогольных ферментированных напитков Hill Kombucha установлено, что значения содержания пантотеновой кислоты находятся в диапазоне от 0,30±0,01 до 0,84±0,03 (минимум у образца «Sagaan Dailya», максимум – у образца «Rose»). Таким образом, употребление данных напитков позволит удовлетворить суточную потребность в витамине B5 на 6,0–16,8 %.

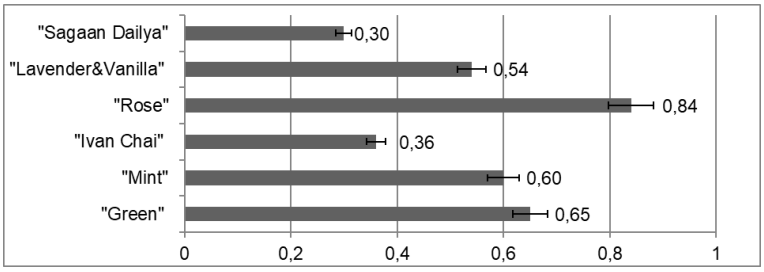


Рисунок 4 – Значения содержания пантотеновой кислоты в исследуемых образцах безалкогольных ферментированных напитков, мг/100г (n = 3, p = 0,95)

Figure 4 – Pantothenic acid content values in the studied samples of non-alcoholic fermented beverages, mg/100g (n = 3, p = 0.95)

В результате проведенных исследований содержания водорастворимых витаминов у образцов безалкогольных ферментированных напитков Hill Kombucha установлено, что значения содержания рибофлавина находятся в диапазоне от 0,44±0,02 до 1,23±0,04 (минимум у образца «Ivan Chai», максимум – у образца «Green»). Таким образом, употребление данных напитков позволит удовлетворить суточную потребность в витамине B_2 на 33,8–94,6 %.

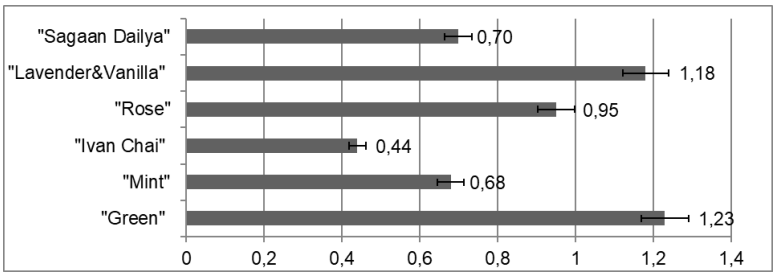


Рисунок 5 – Значения содержания рибофлавина в исследуемых образцах безалкогольных ферментированных напитков, мг/100 г (n = 3, p = 0,95)

Figure 5 – Values of riboflavin content in the studied samples of non-alcoholic fermented beverages, mg/100g (n = 3, p = 0.95)

Помимо представленных выше данных, в рамках данной работы также проводилось исследование таких водорастворимых витаминов, как пиридоксин и никотиновая кислота. В исследуемых образцах данные вещества обнаружены не были, либо были представлены в виде незначительных следов.

Согласно результатам проведенных исследований содержания жирорастворимых витаминов у образцов безалкогольных ферментированных напитков Hill Kombucha установлено, что содержание α-токоферола находится в диапазоне от 1,2±0,1 до 5,6±0,2 (минимум у образца «Sagaan Dailya», максимум – у образца «Rose»). Таким образом, употребление данных напитков позволяет удовлетворить суточную потребность в витамине Е на 8–37,3 %.

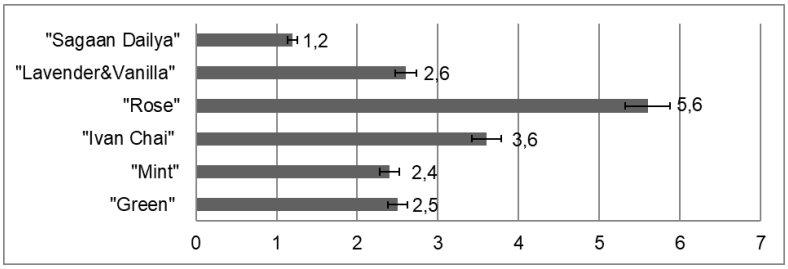


Рисунок 6 – Значения содержания α-токоферола в исследуемых образцах безалкогольных ферментированных напитков, мкг/ 100 г (n = 3, p = 0,95)

Figure 5 – Values of riboflavin content in the studied samples of non-alcoholic fermented beverages, mg/100g (n = 3, p = 0.95)

Помимо представленных выше данных, в рамках данной работы также проводилось исследование таких жирорастворимых витаминов, как кальциферол D3 и ретинол. В исследуемых образцах содержание данных веществ представлено в виде незначительных следов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ферментированные безалкогольные напитки в целом, и комбуча на основе чайного гриба в частности, представляют уникальный по органолептическим свойствам продукт, который может быть рекомендован к внедрению в рацион. Возможность и вариативность дополнительных операций, которые могут осуществляться в ходе производственного процесса напитка, включая фильтрацию, пастеризацию, деалкоголизацию, газацию, а также внесение вкусоароматических и функциональных композиций и ингредиентов, позволяют осуществлять регулирование состава и содержания биологически активных веществ в напитке.

Согласно представленным выше результатам проведенных исследований содержание веществ антиоксидантов, водорастворимых и жирорастворимых витаминов в образцах комбучи розничной торговой сети является незначительным (за исключением содержания рибофлавина), что обуславливает актуальность дальнейших исследований с целью формирования пищевых систем с выраженными полезными потребительскими характеристиками с высоким содержанием веществ функциональной направленности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белокурова Е.С. Инновационные технологии получения ферментированных напитков функционального назначения / Белокурова Е.С., Борисова Л.М., Панкина И.А. // Вопросы питания. 2016. Т. 85. № 2. С. 133.

2. Бурак Л.Ч. Использование современных технологий в производстве ферментированных продуктов // Научное обозрение. Технические науки. 2023. № 5. С. 5–13.

3. Воробьева В.М. Технологические особенности производства ферментированных напитков с использованием чайного гриба / Воробьева В.М., Воробьева И.С., Саркисян В.А., Фролова Ю.В., Кочеткова А.А. // Вопросы питания. 2022. Т. 91. № 4. С. 115–120.

4. Калужина О.Ю. Применение чайного гриба в рецептуре безалкогольного напитка / Калужина О.Ю., Заграничная А.Д., Черненков Е.Н., Черненкова А.А., Бодров А.Ю., Илларионова О.В. // Российский электронный научный журнал. 2022. № 3(45). С. 27–41.

5. Меренкова С.П. Исследование структуры и

микробиологических показателей ферментированных напитков / Меренкова С.П., Зинина О.В. // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С.59–66.

6. Меренкова С.П. Технологические аспекты получения ферментированных напитков антиоксидантной направленности на основе зернового сырья / Меренкова С.П., Резанова М.А. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2022. Т. 10. № 1. С. 76–85.

7. Миллер Ю.Ю. Использование сухих хлебопекарных дрожжей в производстве ферментированных зерновых напитков / Миллер Ю.Ю., Помозова В.А., Киселева Т.Ф. // Индустрия питания / Food Industry. 2024. Т. 9. № 1. С. 73–81.

8. Степанова А.А. Ферментированные напитки: источники их получения и видовой состав микробных сообществ (обзор) / Степанова А.А., Асякина Л.К., Ларичев Т.А., Остапова Е.В. // АПК России. 2023. Т. 30. № 5. С. 703–711.

9. Степанова А.А. Традиционные ферментированные напитки / Степанова А.А., Асякина Л.К., Козлова О.В. : сборник тезисов VIII Международ. науч. конференции студентов, аспирантов и молодых ученных «Пищевые инновации и биотехнологии» 25–27 мая 2020. Кемерово. 2020. Т. 1. С. 268–269.

10. Фролова Ю.В. Российский рынок ферментированных напитков на основе чайного гриба // Вопросы питания. 2022. Т. 91. № 3. С.115–118.

Информация об авторах

О. В. Чугунова – д.т.н., профессор, заведующая кафедрой технологии питания, Уральского государственного экономического университета.

А. В. Вяткин – к.т.н., ассистент кафедры туристического бизнеса и гостеприимства Уральского государственного экономического университета.

А. В. Арисов – к.т.н., старший преподаватель кафедры технологии питания Уральского государственного экономического университета.

REFERENCES

1. Belokurova, E.S., Borisova, L.M. & Pankina, I.A. (2016). Innovatsionnye tekhnologii polucheniya fermentirovannykh napitkov funktsionalnogo naznacheniya [Innovative technologies for producing fermented functional beverages]. Voprosy pitaniya, 85(2), 133. (In Russ.).

2. Burak, L.Ch. (2023). Ispolzovanie sovremennykh tekhnologiy v proizvodstve fermentirovannykh produktov [The use of modern technologies in the production of fermented products]. Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki, (5), 5-13. (In Russ.).

3. Vorobyeva, V.M., Vorobyeva, I.S., Sarkisyan, V.A., Frolova, Yu.V. & Kochetkova, A.A. (2022). Tekhnologicheskie osobennosti proizvodstva fermentirovannykh napitkov s ispolzovaniem chaynogo griba [Technological features of the production of fermented beverages using kombucha]. Voprosy pitaniya, 91(4), 115-120. (In Russ.).

4. Kaluzhina, O.Yu., Zagranichnaya, A.D., Chernenkov, E.N., Chernenkova, A.A., Bodrov, A.Yu. & Illarionova, O.V. (2022). Primenenie chaynogo griba v retsepture bezalkogolnogo napitka [The use of kombucha in the formulation of a non-alcoholic beverage]. Rossiyskiy elektronnyy nauchnyy zhurnal, (3(45)), 27-41. (In Russ.).

5. Merenkova, S.P. & Zinina, O.V. (2023). Issledovanie struktury i mikrobiologicheskikh pokazateley fermentirovannykh napitkov [Study of the structure and microbiological parameters of fermented beverages]. Polzunovskiy vestnik, (1), 59-66. (In Russ.).

6. Merenkova, S.P. & Rezanova, M.A. (2022). Tekhnologicheskie aspekty polucheniya fermentirovannykh napitkov antioksidantnoy napravlennosti na osnove zernovogo syrya [Technological aspects of obtaining fermented beverages with antioxidant properties based on grain raw materials]. Vestnik YuUrGU. Seriya "Pishchevye i biotekhnologii", 10(1), 76-85. (In Russ.).

7. Miller, Yu.Yu., Pomozova, V.A. & Kiseleva, T.F. (2024). Ispolzovanie sukhikh khlebopekarnykh drozhzhey v proizvodstve fermentirovannykh zernovykh napitkov [The use of dry baker's yeast in the production of fermented grain beverages]. Industriya pitaniya / Food Industry, 9(1), 73-81. (In Russ.).

8. Stepanova, A.A., Asyakina, L.K., Larichev, T.A., & Ostapova, E.V. (2023). Fermentirovannye napitki: istochniki ikh polucheniya i vidovoy sostav mikrobykh soobshchestv (obzor). [Fermented beverages: Sources of their production and species composition of microbial communities (review)]. APK Rossii, 30(5), 703-711. (In Russ.).

9. Stepanova, A.A., Asyakina, L.K. & Kozlova, O.V. (2020). Traditsionnye fermentirovannye napitki [Traditional fermented beverages]. In Pishchevye innovatsii i biotekhnologii: Sbornik tezisov VIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (Vol. 1, pp. 268-269). Kemerovo. (In Russ.).

10. Frolova, Yu.V. (2022). Rossiyskiy rynok fermentirovannykh napitkov na osnove chaynogo griba [Russian market of fermented beverages based on kombucha]. Voprosy pitaniya, 91(3), 115-118. (In Russ).

Information about the authors

O.V. Chugunova - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Food Technology, Ural State University of Economics.

A.V. Vyatkin - Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department of Tourism Business and Hospitality, Ural State University of Economics.

A.V. Arisov - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Food Technology, Ural State University of Economics.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 171–176.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 171–176.

Научная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.788.8(045)
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.024 EDN: MQNOGX

ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ШЕЛУШИТЕЛЯ С АБРАЗИВНЫМИ ДИСКАМИ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

Василий Александрович Марьин [1], Александр Леонидович Верещагин [2], Андрей Александрович Иванов [3]

[1, 3] ООО «Алтай», с. Смоленское, Смоленского района, Алтайского края, Россия
[2] Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия
[1] tehbiysk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1858-238X
[2] val@bti.secna.ru, https://orcid.org/0009-0002-6061-7064
[3] tehbiysk@mail.ru

Аннотация. *В статье представлены результаты производственных исследований влияния степени износа абразивных дисков шелушителя ШЗ-2 на эффективность переработки зерна гречихи в крупу ядрицу. Установлено, что с увеличением износа рабочих поверхностей (от 0,05–0,1 мм до 6,0–8,0 мм) выход ядрицы снижается с 72,2 % до 69,6 %, а доля дроблёного ядра и мучки возрастает. Показано, что неравномерный износ абразивных дисков нарушает технологический процесс шелушения, приводит к повреждению поверхности зерновок и снижению качества готовой продукции. Выполнен экономический расчёт, подтверждающий целесообразность своевременной замены или ремонта абразивных дисков. Результаты исследования могут быть использованы на крупяных заводах для оптимизации программ производственного контроля и повышения рентабельности переработки гречихи.*

Ключевые слова: *шелушитель, абразивные диски, износ, гречиха, крупа ядрица, эффективность переработки, выход продукции.*

Для цитирования: Марьин В. А., Верещагин А. Л., Иванов А. А. Изменение эффективности работы шелушителя с абразивными дисками в процессе работы // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 171–176. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.024. EDN: https://elibrary.ru/MQNOGX.

Original article

CHANGING EFFICIENCY OF PEELING MACHINE WITH ABRASIVE DISCS DURING OPERATION

Vasiliy A. Marin [1], Alexander L. Vereshchagin [2], Andrey A. Ivanov [3]

[1, 3] Altai LLC, Smolenskoye village, Smolensky district, Altai Territory, Russia
[2] Biysk Institute of Technology (branch) of Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia
[1] tehbiysk@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1858-238X
[2] val@bti.secna.ru, https://orcid.org/0009-0002-6061-7064
[3] tehbiysk@mail.ru

Abstract. *The article presents the results of industrial studies on the influence of the wear degree of abrasive discs of the ShZ-2 huller on the efficiency of buckwheat grain processing into buckwheat groats (kernel). It was found that with an increase in the wear of working surfaces (from 0.05-0.1 mm to 6.0-8.0 mm), the yield of kernels decreases from 72.2% to 69.6%, while the proportion of crushed kernels and meal increases. It is shown that uneven wear of the abrasive discs disrupts the technological process of hulling, leads to damage to the grain surface, and reduces the quality of the finished product. An economic calculation was performed, confirming the feasibility of timely replacement or repair of abrasive discs. The results of the study can be used at cereal plants to optimize production control programs and increase the profitability of buckwheat processing.*

Keywords: *huller, abrasive discs, wear, buckwheat, buckwheat groats (kernel), processing efficiency, product yield.*

For citation: Marin, V. A., Vereshchagin, A. L. & Ivanov, A. A. (2026). Changing efficiency of peeling machine with abrasive discs during operation. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 171-176. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.024. EDN: https: //elibrary.ru/MQNOGX.

ВВЕДЕНИЕ

Технологией производства крупы гречневой ядрицы предусмотрен процесс шелушения. Являясь основной операцией, шелушение определяет количественные и качественные показатели и эффективность переработки зерна [1, 2]. Задачей технологического процесса шелушения является отделение не усваиваемых человеком оболочек [3]. Различают множество способов шелушения и машин, работающих по этим способам,

© Марьин В. А., Верещагин А. Л., Иванов А. А., 2026

однако выбор способа и машины для шелушения перерабатываемого зерна зависит в том числе от прочности связи оболочки с ядром, прочности ядра и ассортимента вырабатываемой продукции [4, 5].

Основным требованием, предъявляемым к шелушильным машинам, является высокая степень шелушения при максимальном сохранении целостности ядра [6, 7]. С этой точки зрения наиболее перспективным для зерна гречихи является шелушение в машинах с абразивными дисками.

Рабочими органами этих шелушителей являются вертикально вращающийся и неподвижно закрепленный абразивные диски.

Технологический процесс осуществляется следующим образом. Зерно, подлежащее шелушению, подается по самотеку с помощью специального устройства в центр между подвижным и неподвижным дисками. Величина зазора устанавливается несколько меньше размера зерна, но больше ядра. Проходя значительное расстояние в рабочей зоне шелушителя, зерно движется по спирали в направлении от внутреннего диаметра диска к наружному, так как один диск вращается относительно другого. В результате приложенных усилий к зерновке развиваются сложные деформации (сжатие, сдвиг, трение и скалывание) следствием которых является разрушение оболочки и отделение ее от ядра.

Характерной особенностью таких машин является высокий коэффициент шелушения и низкая дробимость ядра. Интенсивности шелушения зерна добиваются изменением зазора между подвижным диском и неподвижным.

Эффективность переработки зерна в крупу в большей степени определена повышением коэффициента использования зерна, т.е. выходом и качеством готовой продукции [8, 9].

Однако при эксплуатации любых шелушителей происходит износ его рабочих органов, в том числе и абразивных, они утрачивают свою работоспособность, что приводит к нарушению равномерного шелушения зерна и, как следствие, к появлению повреждений на поверхности обрушенного ядра, увеличению его дробимости и уменьшению коэффициента шелушения [10, 11].

Таким образом, можно утверждать, что износ абразивных поверхностей шелушителей может влиять на эффективность переработки зерна в крупу.

В настоящее время литературные и патентные источники предоставляют большое количество технологий для шелушения зерна гречихи, однако факторы, позволяющие определять влияние степени износа рабочих органов шелушителей на выход, качество вырабатываемой крупы, недостаточно изучены.

В связи с этим актуальным и практически значимым являются исследования, направленные на изучение влияния степени износа рабочих органов шелушителя на эффективность переработки зерна.

Целью настоящей работы является исследования влияния изменения эффективности работы шелушителя с абразивными дисками в процессе работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в производственных условиях. В качестве экспериментального материала использовали зерно гречихи урожая предгорной части Алтая 2021–2025 гг. Перед шелушением согласно [12] зерно сортировали на шесть фракций. В дальнейшем каждую фракцию перерабатывали на своем шелушителе с вертикально расположенными дисками ШЗ-2 [13, 14]. Объектом исследования являются образцы крупы ядрицы, полученные из зерна гречихи, разделенного на фракции по крупности перед шелушением. Исследовали качество крупы ядрицы, полученной после шелушения на дисковых шелушителях с разной степенью износа рабочей зоны абразивных поверхностей.

В качестве абразивных кругов использовали серийно выпускаемые шлифовальные круги Лужского абразивного завода с зернистостью № 40. В таблице 1 представлены технические характеристики абразивных дисков.

Таблица 1 – Технические характеристики абразивных дисков шелушителя

Table 1 – Technical characteristics of abrasive discs of the peeling machine

Показатели	Размеры
Диаметр диска, мм	400
Толщина диска, мм	40
Количество дисков, шт	2

Оценку эффективности шелушения зерна проводили методом сравнения со стандартными показателями, полученными при работе с новыми абразивными дисками и дисками с разной степенью износа.

При разделении зерна на фракции в каждой фракции контролировали содержание зерен других фракций, добиваясь однородности по крупности и содержанию мелких и крупных зерен. Такой подход позволил исключать появления необрушенных зерен в ядрице при разделении продуктов шелушения. Фракционный состав зерна гречихи по крупности представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Фракционный состав зерна гречихи

Table 2 – Fractional composition of buckwheat grain

Наименование	Фракции					
Номер фракции	1	2	3	4	5	6
Массовая доля зерен во фракции, %	37,9	25,4	15,8	13,5	4,4	3,0

Как следует из таблицы 2, массовая доля зерна во фракциях различна, вследствие чего износ абразивных рабочих поверхностей шелушителей различается.

Главными показателями качества шелушения при переработке зерна в крупу, определяющими ее сортность, являются влажность, крупность, условия вегетации, количество расколотых ядер, влаготепловая обработка.

При проведении экспериментов все указанные условия соблюдали, используемое зерно соответствовало ГОСТ Р 19092-2021 Гречиха. Технические условия. Выработанная крупа соответствовала ГОСТ 5550-2021 высший сорт.

Отбор и формирование партий зерна для исследования проводили согласно ГОСТ 13586.3-2015. Образцы для исследования отобрали на гречезаводе производительностью 2,5 т/ч.

Достоверность полученных результатов подтверждена 6-8 кратной повторностью экспериментов. Все исследования обрабатывали статистически. Для выполнения работы использовали стандартные методы оценки качества. В экспериментальной части приведены средние значения показателей. Оценку эффективности шелушения зерна проводили методом сравнения количества готового продукта и массовой долей дробленого ядра и мучки со стандартной работой шелушителя при сохранности (на новых дисках без износа) рабочих органов шелушения.

Научные исследования выполнены на базе Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении исследований в указанный период при переработке каждой партии зерна объемом три тысячи тонн оформляли акт-отчет об использовании зерна и выработке готового продукта с определением качества, количества выработанных продуктов, проводился осмотр оборудования, в том числе абразивных поверхностей шелушителей.

На рисунке 1 представлены абразивные поверхности шелушильного станка ШЗ-2 с разной степенью выработки.

1. Новый без выработки

2. Равномерная выработка по всей рабочей поверхности

3. Выработка с незначительными вкраплениями

4. Неравномерная выработка поверхности

5. Значительная выработка

Рисунок 1 – Абразивные поверхности шелушителя ШЗ-2 с разной степенью выработки поверхности

Figure 1 – Abrasive surfaces of the SHZ-2 peeling machine with varying degrees of surface development

Как следует из рисунка 1, абразивные поверхности, не использованные для переработки, имеют гладкие без нарушения поверхности – 1, равномерная выработка по всей рабочей поверхности – 2, выработка с незначительными круговыми углублениями – 3, неравномерная выработка поверхности с глубокими круговыми углублениями – 4, выработка поверхности со значительным углублением – 5.

В процессе работы происходит механический процесс разрушения абразивных поверхностей шелушителя, которые подвергаются различным воздействиям, что приводит к их износу, что может быть связано со следующими причинами:

1) недостаточной прочностью абразивного материала;

2) наличием минеральной примеси в зерне – неотделенными камнеотборником;

3) неотделенными металломагнитными примесями.

Опыт эксплуатации и анализ работы шелушильных машин ШЗ-2 показал, что некорректная эксплуатация, приводящая к неравномерному износу абразивных поверхностей, оказывает на них отрицательное влияние. Их ресурс может составлять: при равномерной выработке 5–6 тысяч тонн;

- при равномерном износе с небольшими повреждениями – 3–4 тысяч тонн;
- при неравномерной выработке – 2–3 тысяч тонн зерна;
- при значительной выработке – 1–1,5.

Дальнейшая эксплуатация шелушителей с указанными ресурсами приводит к значительным ухудшениям качества и выхода готового продукта крупы гречневой ядрицы. Результаты производственных испытаний представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты производственных испытаний при разной выработке рабочих поверхностей шелушителей
Table 3 – Results of production tests with different production of the working surfaces of the peelers

Степень износа поверхности	Массовая доля продукта, %			Колотые ядра в крупе, %
	Крупа ядрица	Продел	Мучка	
1	72,2	–	0,3	0,3
2	71,6	0,2	0,4	0,4
3	71,1	0,3	0,6	0,5
4	70,4	0,6	0,9	0,7
5	69,6	0,9	1,2	0,8

Таким образом, на основании проведенных исследований, представленных в таблице 3, можно утверждать, что с увеличением износа абразивных поверхностей шелушителя качество шелушения ухудшается.

Изменение абразивных поверхностей приводит к нарушению зазоров в рабочей зоне шелушителей, интенсивности воздействия абразивных дисков на зерно, неравномерного распределения зерна в рабочей зоне, невозможности правильной регулировки и потере своих характеристик, что сопровождается ухудшением качества шелушения и, как следствие, образованием повреждений на поверхности зерновки, снижением ее прочности и даже к разрушению. На рисунках 2.1–2,5 представлена выработанная крупа ядрица при разной степени разрушения абразивных поверхностей.

2.1 2.2 2.3

2.4 2.5

Рисунок 2 – Выработанная крупа гречневая ядрица на шелушителях с разной степенью разрушения абразивной поверхности

Figure 2 – Processed buckwheat kernels on huskers with varying degrees of destruction of the abrasive surface

Анализ таблицы 2 и рисунка 2 показывает, что с увеличением степени нарушения поверхности доля целого ядра уменьшается при возрастании доли дробленого ядра и мучки. При нулевом повреждении (рисунок 2.1) после шелушения ядро ровное, однородное по цвету, повреждения отсутствуют; при равномерной выработке (рисунок 2.2) поверхность слегка зашлифована, присутствуют повреждения семенной оболочки, незначительные отколы с граней и боковых поверхностей; при равномерном износе с незначительными вкраплениями (рисунок 2.3) количество повреждений ядра незначительно увеличивается; при неравномерной выработке поверхности (рисунок 2.4) выявлено ухудшение органолептических показателей, присутствуют сколы ребер и дробленые ядра (рисунок 2.5), значительное ухудшение органолептических показателей, существенное снижение выхода целого ядра.

Таким образом, анализ выработанной продукции позволяет утверждать, что в процессе эксплуатации шелушителей происходит изменение качества и выхода готового продукта, что является следствием нарушения шелушильных поверхностей. Поэтому в процессе эксплуатации необходимо контролировать состояние рабочих поверхностей шелушителей, при необходимости производить их ремонт или замену.

Для оценки степени повреждения выбран метод щупового анализа ГОСТ 2789-73. При щуповом (контактном) методе измерения неровностей поверхности в качестве щупа используют остро заточенную иглу, поступательно перемещающуюся по определенной трассе относительно поверхности. Ось иглы располагали по нормали к поверхности. Опускаясь во впадины, поднимаясь на выступы, фиксировали отклонения от нормали поверхности.

Измерение неровностей поверхности осуществляли на сверлильном станке. Вместо сверла

устанавливали острую иглу и перемещали ее параллельно поверхности, по диаметру измеряя выступы. Согласно данному анализу целью измерений было определение отклонений (неровностей) от номинального значения и исследование их влияния на эксплуатационные характеристики шелушильных машин. Результаты анализов глубины впадин представлены в таблице 4, площадь износа в указанных анализах не определялась.

Таблица 4 – Результаты исследования абразивных поверхностей шелушителей сразной степенью выработки

Table 4 – Results of the study of abrasive surfaces of desiccants with varying degrees of production

Показатель	Износ абразивной поверхности				
	1	2	3	4	5
Степень выработки поверхностей абразивного валка, мм	0,05 -0,1	0,2- 0,3	0,3- 0,5	3,0- 5,5	6,0- 8,0

Как следует из таблицы 3, анализ износа результатов исследования абразивных поверхностей шелушителей показывает, в процессе эксплуатации износ может значительно превышать размеры ядра гречихи – таблица 5, что может приводить к нарушению процесса шелушения и высокой дробимости ядра.

Таблица 5 – Размеры круглых отверстий, характеризующих крупность фракции ядра

Table 5 – Sizes of round holes, characterizing the size of the core fraction

Фракции						
Номер	1	2	3	4	5	6
Размер, мм	4,7	4,5	4,2	4,0	3,8	3,6

Проведенные исследования позволяют утверждать, что выработка абразивных поверхностей приводит к невозможности установления оптимального зазора вследствие неровности рабочих поверхностей. Поэтому шелушильные машины не позволяют обеспечить равномерного шелушения зерновой массы. В процессе работы абразивное воздействие изношенных рабочих органов на зерно может сопровождаться образованием повреждений на поверхности зерновки, что может приводить к сколам, снижению прочности и ее разрушению.

Экономическая эффективность производственных испытаний при работе шелушителей с разным износом рабочих органов при текущей стоимости зерна гречихи 15 000 руб/т представлена в таблице 6. При стоимости одного диска без НДС, 5 600 руб., с полной заменой ежегодно 24 дисков, общая стоимость дисков составляет 134 400 руб, замена всех дисков составляет 130 000 руб. Таким образом, общая стоимость замены всех дисков будет составлять 264 400 руб.

Таблица 6 – Экономическая эффективность работы шелушителей с разной степенью износа рабочих поверхностей
Table 6 – Economic efficiency of peeling machines with varying degrees of wear on work surfaces

Показатели	Варианты переработки				
	1	2	3	4	5
Номинальная производительность в сутки, т	60	60	60	60	60
Выход готовой продукции (крупа гречневая ядрица), %	72,2	71,6	71,1	71,4	69,6
Выход готовой продукции (крупа продел), %	0,0	0,2	0,3	0,6	0,9
Выход зерноотходов (мучка, продел), %	0,3	0,6	0,9	1,5	2,1
Стоимость переработки без учета мешкотары, руб/т зерна	2 800				
Итоговая цена 1 тонны гречихи, руб	15 000				
Стоимость мешкотары на 1 тонну крупы, руб	333				
Стоимость 1 тонны зерноотходов, руб	3 636				
Стоимость 1 тонны продела, руб	13 500				
Стоимость 1 тонны крупы гречневой, б/НДС, руб	27 000				
Стоимость сырья (суточная), руб	900 000				
Стоимость переработки в денежном выражении, руб	168 000				
Выход Количество крупы, т	43,3	42,1	43,0	42,7	42,2
Количество продела, т	0	0,2	0,2	0,6	0,9
Количество зерноотходов, т	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8
Стоимость тары, руб	14 406	14 368	14 336	14 306	14 266
Итого стоимость готовой продукции, руб	1 082 406	1 082 368	1 082 336	1 082 306	1 082 266
Выручка от реализации крупы, руб	1 168 020	1 164 054	1 159 920	1 151 820	1 138 860
Выручка от реализации продела, руб	0	2220	2 430	4 050	8 910
Выручка от реализации зерноотходов, руб	655	980	1 091	1 745	2 182
Итого выручка, руб	1 168 675	1 165 351	1 163 441	1 157 615	1 149 952
Маржинальная прибыль, руб	85 614	79 480	77 544	69 514	56 954
Эффект по сравнению с базовым сценарием		-7 400	-8 600	-16 100	-29 020
Количество рабочих дней в году	300				
Годовой эффект	0	-2 322 040	-2 418 012	-8 830 030	-8 706 042
Количество дней по окупаемости дисков		34,6	32,8	16,4	9,1

Проведенный расчет, представленный в таблице 6, позволяет утверждать, что экономически целесообразно при любой выработке дисков ремонтировать абразивные поверхности или производить их замену с целью сохранения рентабельности производства. Количество дней окупаемости при прочих равных условиях будет уменьшаться с ростом цены на готовую продукцию.

ВЫВОДЫ

Таким образом, производственные испытания показали влияние степени повреждения абразивной по-

верхности шелушителя на качество и выход готового продукта. Экономический расчет показал целесообразность ремонта или замены шелушителей при обнаружении ухудшении качества и выхода готового продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгополова Н.В. Сравнительная оценка подготовки зерна гречихи к переработке и сохранности / Н.В. Долгополова, А.А. Маньшин, С.Ф. Рюмшина, М.Ж. Аширбеков // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 6. С. 13–18.

2. Кандроков Р.Х. Роль шелушения зерна в технологии переработки твердой пшеницы / Р.Х. Кандроков, Г.Н. Панкратов // Хлебопродукты. 2013. № 3. С. 44–45.

3. Безъязыков Д.С. Модернизация технологии шелушения зерна овса / Д.С. Безъязыков, В.Н. Невзоров, И.В. Мацкевич // Вестник КрасГАУ. 2020. № 4 (157). С. 163–168.

4. Еремина М.А. Разработка технологий по производству импортозамещающих продуктов – будущее отечественных производителей при вступлении в ВТО / М.А. Еремина, М.И. Дмитриченко, Г.В. Алексеев // Технико-технологические проблемы сервиса. 2012. № 3 (21). С. 89–93.

5. Котельников В.Я. Технико-экономические параметры и эффективность комплекса для шелушения и размола зерна / В.Я. Котельников, В.Д. Секерин, О.А. Федченкова, Е.В. Мельник // Известия Курского государственного технического университета. 2002. № 1 (8). С. 107–110.

6. Анисимов А.В.Совершенствование технологии подготовки зерна к помолу на малых предприятиях / А.В. Анисимов, Ф.Я. Рудик, Б.П. Загородских // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. № 4. С. 603–623.

7. Невзоров В.Н. Технология и оборудование для шелушения зерна пшеницы / В.Н. Невзоров, И.В. Мацкевич, Д.В. Салыхов [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2018. № 6 (141). С. 162–166.

8. Краснов И.Н. Процесс шелушения зерна при его дроблении / И.Н. Краснов, И.И. Пасечников, Ю.С. Горбанёв, Р.В. Поэта // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 1 (53). С. 12–18.

9. Журба О.С. Влияние шелушения зерна на параметры процесса его измельчения / О.С. Журба, А.В. Карамзин, Л.Н. Крикунова, С.М. Рябова // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 8. С. 18–23.

10. Верещинский А.П. Эффективность шелушильно-шлифовальных машин «Каскад» при подготовке зерна пшеницы в сортовых помолах // Хлебопродукты. 2012. № 11. С. 40–41.

11. Перов А.А. Способы шелушения зерна / А.А. Перов // Комбикорма. 2010. № 3. С. 45–46.

12. Правила организации и ведения технологического процесса на крупяных предприятиях. ВНПО «Зернопродукт». М., 1990. 81 с.

13. Марьин В.А. Шелушение зерна гречихи с помощью шелушителя с абразивными дисками / В.А. Марьин, А.Л. Верещагин, Р.В. Баринов, А.А. Иванов // Хлебопродукты. 2023. № 7. С. 65–69.

14. Марьин В.А. Использование абразивных кругов для шелушения зерна гречихи / В.А. Марьин, А.Л. Верещагин // Хлебопродукты. 2023. № 2. С. 41–44.

REFERENCES

1. Dolgopolova, N.V., Manshin, A.A., Ryumshina, S.F. & Ashirbekov, M.Zh. (2022). Sravnitelnaya otsenka podgotovki zerna grechikhi k pererabotke i sokhrannosti [Comparative assessment of buckwheat grain preparation for processing and preservation]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*, (6), 13-18. (In Russ.).

2. Kandrokov, R.Kh. & Pankratov, G.N. (2013). Rol shelusheniyazerna v tekhnologii pererabotki tverdoy pshenitsy [The role of grain hulling in durum wheat processing technology]. *Khleboprodukty*, (3), 44-45. (In Russ.).

3. Bezyazykov, D.S., Nevzorov, V.N. & Matskevich, I.V. (2020). Modernizatsiya tekhnologii shelusheniya zerna ovsa [Modernization of oat grain hulling technology]. *Vestnik KrasGAU*, (4(157)), 163-168. (In Russ.).

4. Eremina, M.A., Dmitrichenko, M.I. & Alekseev, G.V. (2012). Razrabotka tekhnologiy po proizvodstvu importozameshchayushchikh produktov - budushchee otechestvennykh proizvoditeley pri vstuplenii v VTO [Development of technologies for the production of import-substituting products - the future of domestic producers upon accession to the WTO]. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*, (3(21)), 89-93. (In Russ.).

5. Kotelnikov, V.Ya., Sekerin, V.D., Fedchenkova, O.A., & Melnik, E.V. (2002). Tekhniko-ekonomicheskie parametry i effektivnost kompleksa dlya shelusheniya i razmola zerna [Technical and economic parameters and efficiency of a complex for grain hulling and grinding]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, (1(8)), 107-110. (In Russ.).

6. Anisimov, A.V., Rudik, F.Ya. & Zagorodskikh, B.P. (2018). Sovershenstvovanie tekhnologii podgotovki zerna k pomolu na malykh predpriyatiyakh [Improving grain preparation technology for grinding at small enterprises]. *Vestnik Mordovskogo universiteta*, *28*(4), 603-623. (In Russ.).

7. Nevzorov, V.N., Matskevich, I.V., Salykhov, D.V. [et al.]. (2018). Tekhnologiya i oborudovanie dlya shelusheniya zerna pshenitsy [Technology and equipment for wheat grain hulling]. *Vestnik KrasGAU*, (6(141)), 162-166. (In Russ.).

8. Krasnov, I.N., Pasechnikov, I.I., Gorbanov, Yu.S. & Poeta, R.V. (2021). Protsess shelusheniya zerna pri ego droblenii [The process of grain hulling during its crushing]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, (1(53)), 12-18. (In Russ.).

9. Zhurba, O.S., Karamzin, A.V., Krikunova, L.N. & Ryabova, S.M. (2012). Vliyanie shelusheniya zerna na parametry protsessa ego izmelcheniya [The influence of grain hulling on the parameters of its grinding process]. *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya*, (8), 18-23. (In Russ.).

10. Vereshchinsky, A.P. (2012). Effektivnost shelushilno-shlifovalnykh mashin "Kaskad" pri podgotovke zerna pshenitsy v sortovykh pomolakh [Efficiency of "Cascade" hulling and grinding machines in the preparation of wheat grain for graded grinding]. *Khleboprodukty*, (11), 40-41. (In Russ.).

11. Perov, A.A. (2010). Sposoby shelusheniya zerna [Methods of grain hulling]. *Kombikorma*, (3), 45-46. (In Russ.).

12. Pravila organizatsii i vedeniya tekhnologicheskogo protsessa na krupyanykh predpriyatiyakh [Rules for organizing and conducting the technological process at cereal enterprises]. (1990). Moscow : VNPO "Zernoprodukt". (In Russ.).

13. Marin, V.A., Vereshchagin, A.L., Barinov, R.V. & Ivanov, A.A. (2023). Shelushenie zerna grechikhi s pomoshchyu shelushitelya s abrazivnymi diskami [Buckwheat grain hulling using a huller with abrasive discs]. *Khleboprodukty*, (7), 65-69. (In Russ.).

14. Marin, V.A. & Vereshchagin, A.L. (2023). Ispolzovanie abrazivnykh krugov dlya shelusheniya zerna grechikhi [The use of abrasive wheels for buckwheat grain hulling]. *Khleboprodukty*, (2), 41-44. (In Russ.).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 177–185.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 177–185.

Научная статья
2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
УДК 544.3-971.2
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.025 EDN: HSJSAS

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА РЕАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ ВОЛЬФРАМ – ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН С ДОБАВКАМИ СВС-СМЕСЕЙ (NI+AL, TI+2B)

Степан Арутюнович Серопян [1], Иван Владимирович Сайков [2], Александр Викторович Смирнов [3], Гульназ Рафиковна Сайкова [4], Евгений Владимирович Петров [5]

[1, 2, 3, 4, 5] Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН, Черноголовка, Россия
[1] stepan.seropyan@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-3714-3983
[2] revan.84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1473-2854
[3] smirnov_av@ism.ac.ru, https://orcid.org/0009-0003-3350-4440
[4] gulnaz-84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6542-7123
[5] petrov@ism.ac.ru, https://orcid.org/0000-0002-7070-0972

Аннотация. *Исследовано влияние механической активации в шаровой мельнице на свойства реакционных материалов на основе системы вольфрам-политетрафторэтилен (W+ПТФЭ) с добавками СВС смесей (Ni+Al) и (Ti+2B). Исследованы параметры воспламенения и горения составов на основе микронного (μW) и наноразмерного (nW) порошков вольфрама. Показано, что механическая активация приводит к значительному повышению реакционной способности всех исследуемых составов. Температура воспламенения активированных составов снижается на 250–500 °С, в то время как скорость воспламенения возрастает на порядки, достигая значений 1300–2200 °С/с. Установлено, что механическая активация сокращает время индукции до начала самоподдерживающейся реакции, что приводит к снижению начальной температуры воспламенения образца на 280 °С. Методами рентгенофазового анализа установлено, что механическая активация существенно влияет на фазовый состав продуктов горения. В составах 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) образуется два двойных карбида (Ni_2W_4C, $Ni_{10}W_3C_3$), причем их массовая доля сопоставима с долей карбидов вольфрама (W_2C, WC). В составе 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) зафиксировано образование кубического WC вместо гексагонального. Исследуемые составы демонстрируют высокую полноту синтеза (43–45 мас. %), скорость и температуру горения, что делает их перспективными в качестве реакционных материалов. Полученные результаты подчеркивают важную роль высокоэнергетических добавок, размера частиц и способа приготовления составов в контроле путей реакции и достижения необходимых энергетических свойств материалов.*

Ключевые слова: *W+ПТФЭ, нано-вольфрам, реакционные материалы, механическая активация, горение, воспламенение.*

Благодарности: *Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00787, https://rscf.ru/project/24-29-00787/). Исследование выполнено с использованием оборудования РЦКП ИСМАН.*

Для цитирования: Влияние механической активации на реакционную способность системы вольфрам – политетрафторэтилен с добавками СВС-смесей (Ni+Al, Ti+2B) / С. А. Серопян [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 177–185. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.025. EDN: https://elibrary.ru/HSJSAS.

Original article

EFFECT OF MECHANICAL ACTIVATION ON REACTIVITY OF TUNGSTEN – POLYTETRAFLUOROETHYLENE SYSTEM WITH ADDITIVES OF SHS MIXTURES (NI+AL, TI+2B)

Stepan A. Seropyan [1], Ivan V. Saikov [2], Alexandr V. Smirnov [3], Gulnaz R. Saikova [4], Evgenii V. Petrov [5]

[1, 2, 3, 4, 5] Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences (ISMAN), Chernogolovka, Moscow Region, Russia
[1] stepan.seropyan@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-3714-3983
[2] revan.84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1473-2854
[3] smirnov_av@ism.ac.ru, https://orcid.org/0009-0003-3350-4440
[4] gulnaz-84@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6542-7123
[5] petrov@ism.ac.ru, https://orcid.org/0000-0002-7070-0972

© Серопян С. А., Сайков И. В., Смирнов А. В., Сайкова Г. Р., Петров Е. В., 2026

Abstract. *The Effect of Mechanical Activation on the Properties of Tungsten-Polytetrafluoroethylene (W+PTFE) Based Reactive Materials with SHS Additives. The influence of mechanical activation (MA) in a ball mill on the properties of reactive materials based on the tungsten-polytetrafluoroethylene (W+PTFE) system with additions of SHS mixtures - nickel and aluminum (Ni+Al) and titanium with boron (Ti+2B) - was investigated. Compositions based on both micron-sized (μW) and nano-sized (nW) tungsten powders were synthesized and characterized. It was shown that mechanical activation leads to a significant increase in the reactivity of all studied compositions. The ignition temperature of the activated compositions decreases by 250-500 °C, while the ignition rate increases by orders of magnitude, reaching values of 1300-2200 °C/s. It was established that MA reduces the induction time before the onset of the self-sustaining reaction, leading to a decrease in the initial ignition temperature of the sample by 280 °C. X-ray phase analysis methods revealed that mechanical activation significantly affects the phase composition of the combustion products. In the compositions 76μW+19PTFE+5(Ni+Al) and 76nW+19PTFE+5(Ni+Al), two double carbides (Ni_2W_4C, $Ni_{10}W_3C_3$) are formed, with their mass fraction being comparable to the fraction of tungsten carbides (W_2C, WC). In the composition 76nW+19PTFE+5(Ti+2B), the formation of cubic WC instead of the hexagonal phase was recorded. The studied compositions demonstrate high synthesis completeness (43-45 wt. %), as well as high combustion rate and temperature, making them promising as reactive materials. The obtained results underscore the important role of high-energy additives, particle size, and preparation method in controlling reaction pathways and achieving the required energy properties of the materials.*

Keywords: *W+PTFE, nano-tungsten, reactive materials, mechanical activation, combustion, ignition*.

Acknowledgements: *This research was performed by using the set of modern scientific instruments available for multiple accesses at the ISMAN Center of Shared Services. This work was supported by Russian Science Foundation No. 24-29-00787, https://rscf.ru/project/24-29-00787/.*

For citation: Seropyan, S. A., Saikov, I. V., Smirnov, A. V., Saikova, G. R. & Petrov, E. V. (2026). Effect of mechanical activation on the reactivity of the tungsten - polytetrafluoroethylene system with additives of SHS mixtures (Ni+Al, Ti+2B). *Polzunovskiy vestnik*, (2), 177-185. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.025. EDN: https: //elibrary.ru/HSJSAS.

ВВЕДЕНИЕ

Реакционные материалы (РМ) представляют собой многокомпонентные порошковые составы, способные к интенсивным экзотермическим реакциям при термическом или ударном воздействии [1, 2]. Процесс горения данных составов, в результате которого образуются конденсированные фазы и газы, сопровождается выделением значительной энергии, что открывает широкие возможности для их применения [3, 4]. Помимо специальных областей, РМ перспективны для технологических операций, таких как резка и перфорация конструкционных материалов, где используется сфокусированная струя продуктов горения [5]. РМ включают интерметаллические смеси [6, 7], термиты [8], смеси металла и полимера [9–12]. Наиболее распространенной основой для них служат металло-полимерные смеси [13], в частности, комбинации активных металлов (алюминия [13], титана [14], магния [15]) с политетрафторэтиленом (ПТФЭ). Смесь Al+ПТФЭ является одной из самых изученных и характеризуется высоким энерговыделением (до 8,53 МДж/кг), значительным выходом газообразных продуктов и чувствительностью к высокоскоростному нагружению [13]. Однако ключевым недостатком такой системы остается ее низкая плотность и прочность [16]. Для решения этой проблемы в нее вводят высокоплотные компоненты, такие как вольфрам [17], оксид молибдена (MoO_3) [18], тантал [19] никель [20] и др. [21]. В работах [13, 20, 22] показано, что несмотря на успешное упрочнение структуры, это зачастую приводит к снижению общей энергетики состава и его чувствительности к внешним воздействиям. Повышение чувствительности к ударно-волновому воздействию можно добиться за счет применения высокодисперсных исходных порошков [10, 23].

В работах [24, 25, 26] свою эффективность по получению и исследованию новых реакционных материалов показал подход, при котором в качестве основы для них используется высокоплотная смесь W+ПТФЭ, к которой добавляются активные металлы. Помимо активных металлов [14–16] существует достаточное количество компонентов, способных повысить температуру, скорость горения и чувствительность к ударно-волновому нагружению РМ, могут быть использованы: гидриды [27], оксиды металлов [28], а также смеси с высокой реакционной способностью Ni+Al [17], Ti+2B и др. [29]. Помимо выбора компонентного состава такого материала необходимо подобрать их оптимальное соотношение, при котором удастся сохранить высокую реакционную способность и плотность материала. Другим эффективным методом управления свойствами РМ является механическая активация (МА) в шаровых мельницах, которая способствует повышению реакционной способности порошковых смесей за счет увеличения площади контакта между компонентами [30, 31]. Таким образом, поиск оптимальных составов и методов их приготовления, позволяющих совместить высокую плотность, прочность и энерговыделение, остается актуальной задачей.

В данной работе исследуется влияние механической активации на параметры горения, воспламенения и фазообразования в системе W+ПТФЭ на основе микро- и нано- порошков вольфрама с добавками смесейTi+2B и Ni+Al.

МЕТОДЫ

В качестве основы для реакционного материала выбрана система W+ПТФЭ (с массовым соотношением 80:20) [26]. Выбор оптимального содержания добавок проводился с помощью термодинамических расчетов в программе ISMAN-Thermo [32]. Изготавливалось 4 состава системы W+ПТФЭ на основе микродисперсного μW и нанодисперсного nW вольфрама. В таблице 1 представлено соотношение компонентов и соответствующие им теоретическая максимальная плотность (ТМП), фактическая плотность. Фактическая плотность образцов измерялась методом гидростатического взвешивания. Относительная плотность рассчитывалась как отношение фактической к теоретической максимальной плотности [24].

Таблица 1 – Исследуемые составы / Table 1 – Investigated compositions

№	Массовая доля, (масс. %)				ТМП, (г/см^3)	Фактическая плотность, (г/см^3)	Относительная плотность
	W	ПТФЭ	Ni+Al	Ti+2B			
0	80	20	–	–	7,55	7,25	0,96-0,98
1	76	19	5	–	7,38	7,23	
2	76	19	–	5	7,14	7,00	

В качестве исходных компонентов использовались порошки микродисперсного вольфрама (марки ПВ2, размер частиц < 50 мкм), нанодисперсного вольфрама (размер частиц < 500 нм), политетрафторэтилен (ПТФЭ марки Флуралит, размер частиц < 50 мкм), алюминия (марки АСД-1, размер частиц < 50 мкм), никеля (марки ПНК-УТ-3, размер частиц< 50 мкм), титана (марки ПТС-1 размер частиц < 50 мкм) и бора (марки Б-99А, размер частиц< 30 мкм). Механическая активация (МА) порошков проводилось в планетарной шаровой мельнице АГО-2 в течение 2 минут, со скоростью вращения барабанов 2200 об/мин при соотношении массы порошка к размольным шарам 1:10. Сухое смешивание порошков проводилось в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 180 минут, со скоростью вращения барабана 30 об/мин при соотношении массы порошка к размольным шарам 1:5. Составы, полученные методом сухого смешивания, обозначены как «до МА»; составы, полученные методом механической активации, – как «после МА».

Температуры воспламенения исследуемых составов определялись на образцах диаметром 3 мм и высотой 1,4–1,7 мм путем инициирования в них теплового взрыва. Образцы помещались в тигле из нитрида бора непосредственно на спай термопары ВР5/20 толщиной 50 мкм. Тигель вместе с образцом и термопарой размещались на графитовом нагревателе между молибденовыми токоподводами. Скорость нагрева образцов составляла 60–80 °С/с. Эксперименты проводились в реакторе объемом 1 л с системой поддержания инертной атмосферы, которая формировалась путем откачки воздуха и закачки аргона (чистота ≥ 99,998 %) [26, 33]. Температуры воспламенения образцов устанавливались после обработки термограмм процесса нагрева.

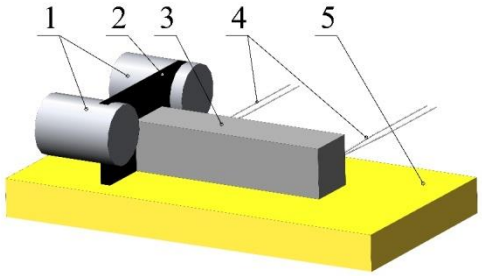


Рисунок 1 – Схема измерения скорости горения: 1) токоподводы; 2) графитовый нагреватель; 3) образец; 4) термопары ВР5/20; 5) огнеупорная подложка

Figure 1 – The scheme of measuring the combustion velocity: 1) current leads, 2) graphite heater, 3) sample, 4) WR5/20 thermocouples, 5) refractory substrate

Для измерения скорости горения изготавливались образцы в форме параллелепипеда с размерами 5×5×20 мм и относительной плотностью 0,96–0,98. На боковой поверхности образцов просверливались два глухих отверстия диаметром 0,3 мм и глубиной 2 мм под термопары ВР5/20 диаметром 100 мкм, расстояние между отверстиями 14–15 мм (рис. 1, *а*). Образец располагался на огнеупорной подложке вплотную к графитовому нагревателю для его локального нагрева с бокового торца (рис. 1, *б*). Измерение скорости горения проводилось в реакторе объемом 20 л с системой поддержания инертной атмосферы, описанной выше. Сигналы с термопар через аналого-цифровой преобразователь QMBox (R-Technology, Moscow, Russia) записывались с частотой 250 Гц. Рентгенофазовый анализ (РФА) продуктов синтеза проводился с использованием ДРОН-3М. Образцы сканировались в диапазоне от 20 ° до 80 ° (2Θ) с шагом 0,02 °. Количественный анализ продуктов синтеза проводился методом Ритвельда.

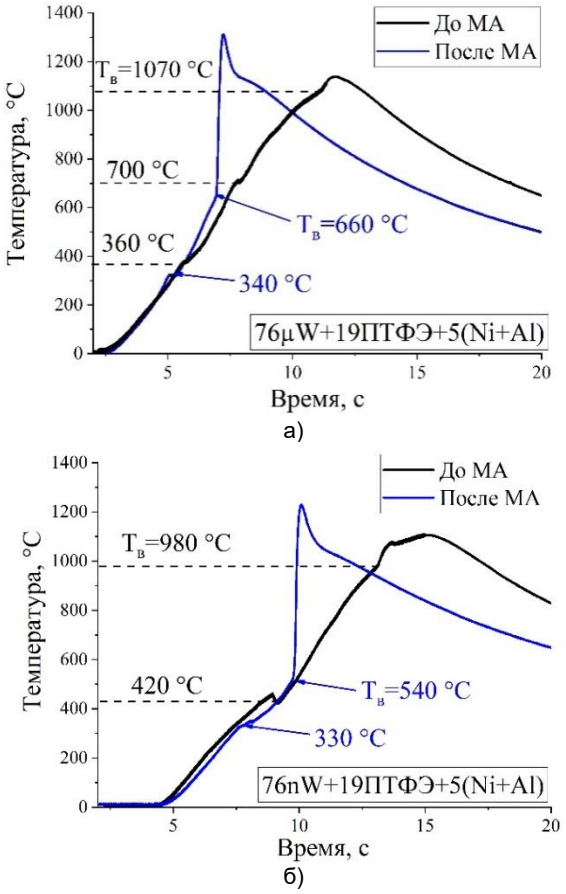


Рисунок 2 – Термограммы нагрева образцов до и после МА: а) 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al); б) 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al)

Figure 2 – Thermograms of heating samples before and after MA: a) 76μW+19PTFE+5(Ni+Al), b) 76nW+19PTFE+5(Ni+Al)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены термодинамические расчеты в системе (1-x)(80W+20ПТФЭ)+xY, где Y – Ni+Al и Ti+2B. Рас-

четные адиабатические температуры и образующиеся продукты горения выбранных составов представлены в таблице 2 (приведены основные продукты горения). Максимальная адиабатическая температура горения ($T_{ад}$) соответствует составу № 2 и равна 2563 ºС при высокой доле конденсированных продуктов.

На рисунке 2 представлены термограммы нагрева составов 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) до и после МА. Механическая активация обоих составов привела к значительному снижению температуры и повышению скорости воспламенения. Для состава 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) температура воспламенения снизилась с 1070 до 660 ºС, а скорость возросла со 100 до 2200 ºС/с (рис. 2, *а*). Для состава 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) температура воспламенения снизилась с 980 до 540 ºС, а скорость возросла со 180 до 2100 ºС/с (рис. 2, *б*). Данный эффект объясняется тем, что в отличие от сухого смешивания (до МА), механическая активация приводит к формированию композитных частиц с развитой площадью контакта между компонентами. Это, в свою очередь, снижает энергию активации, что и обусловливает снижение температуры и резкое повышение скорости воспламенения.

Таблица 2 – Расчетная адиабатическая температура горения и доля газовых и конденсированных продуктов в системе (1-x)(80W+20ПТФЭ)+xY

Table 2 – Calculated adiabatic combustion temperature and the fraction of gaseous and condensed products in the system (1-x)(80W+20 PTFE)+xY

№	Составы, масс. %	$T_{ад}$, ºС	Газовые продукты, (г/см^3)	Конденсированные продукты, масс. %
0	80W+20ПТФЭ	2112	3,9 (CF_2), 1,0 (CF_3), 50,1 (CF_4), 3,0 (C_2F_2), 7,7 (WF_5), 23,2 (WF_6),	10,2 (C)
1	76W+19ПТФЭ+5(Ni+Al)	2255	9,1 (WF_4), 12,2 (WF_5), 4,3 (WF_6), 5,5 (NiF_2), 4,9 (AlF_3)	60,6 (W_2C), 2,5 (C)
2	76W+19ПТФЭ+5(Ti+2B)	2563	4,5 (TiF_3), 3,6 (TiF_4) 15,1 (WF_4), 12,1 (WF_5), 1,8 (WF_6), 1,0 (C_2F_2)	58,0 (W_2C), 2,0 (C)

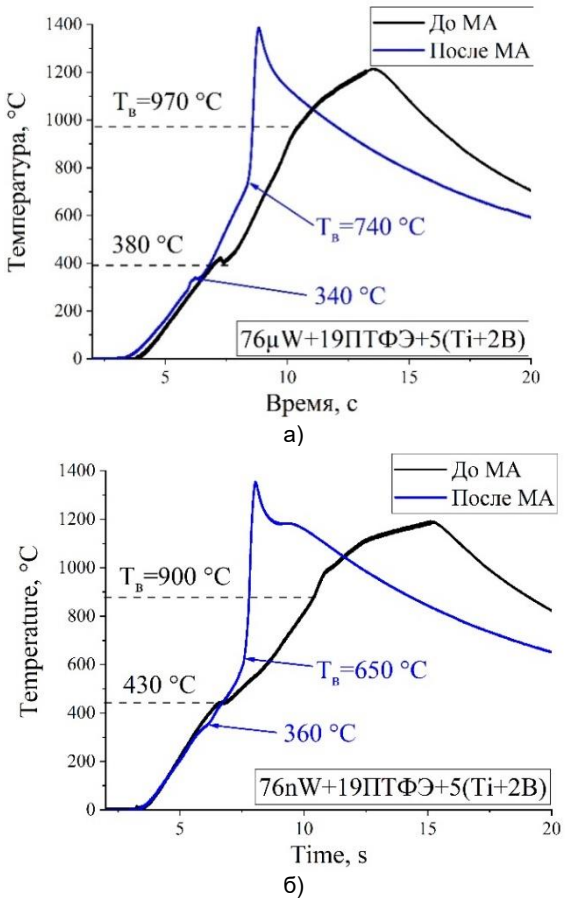


Рисунок 3 – Термограммы нагрева образцов до и после МА: а) 76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B); б) 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B)

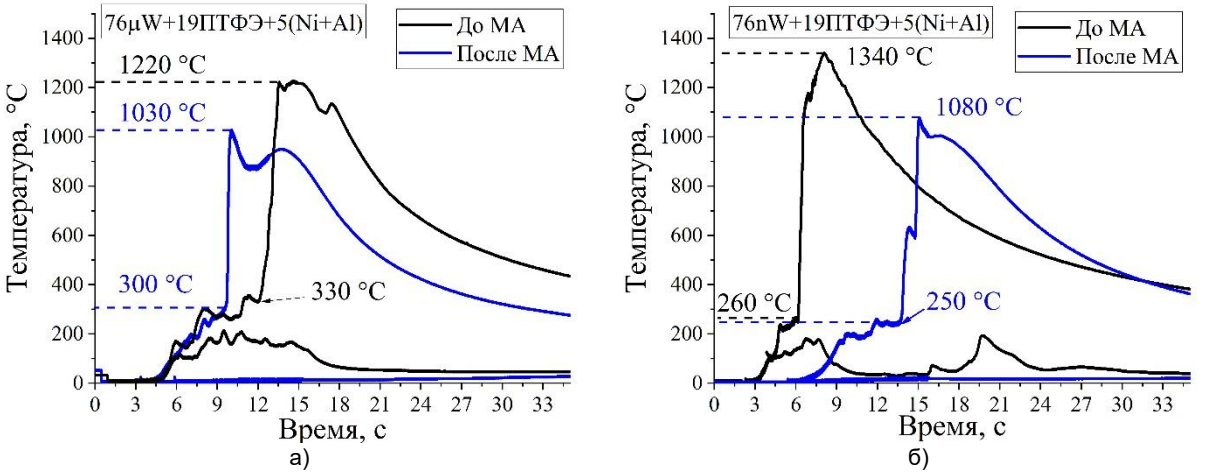
Figure 3 – Thermograms of heating samples before and after MA: a) 76μW+19PTFE+5(Ti+2B), b) 76nW+19PTFE+5(Ti+2B)

На рисунке 3 представлены термограммы нагрева составов 76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) до и после МА. Механическая активация обоих составов привела к значительному снижению температуры и повышению скорости воспламенения. Для состава 76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) температура воспламенения снизилась с 970 до 740 ºС, а скорость возросла со 100 до 1300 ºС/с (рис. 3, *а*). Для состава 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) температура воспламенения снизилась с 900 до 650 ºС, а скорость возросла со 210 до 1600 ºС/с (рис. 3, *б*). Снижение энергии активации и повышение скорости воспламенения после механической активации обусловлено факторами, описанными выше для состава 76W+19ПТФЭ+5(Ni+Al). Рост температуры свыше 1000 ºС продолжается за счет нагревательного элемента.

МА состава 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) сократила время нагрева для инициирования горения и, как следствие, снизила начальную температуру образца с 330 до 300 ºС. Снижение температуры горения с 1220 до 1030 ºС связано с интенсивным газовыделением во фронте волны горения (рис. 4, *а*). Важно отметить, что из-за сокращения времени прогрева длина синтезированного участка образца после МА осталась на прежнем уровне и составила около 5 мм. Аналогичный эффект МА наблюдался и для состава 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) – время нагрева сократилось, а температура горения снизилась с 1340 до 1080 ºС (рисунок 4, *б*). Однако в данном случае интенсивное газовыделение оказало решающее влияние на полноту сгорания. До МА образец сгорал полностью, а после МА газовыделение препятствовало полному сгоранию.

МА состава 76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) позволила реализовать синтез в начальной части образца, температура горения составила 1050 ºС, тогда как состав до механической активации разогревался от нагревательного элемента до 500 ºС (рисунок 5, *а*). Длина синтезированных частей образцов до и после МА составляла около 5 мм, но до МА обусловлена воздействием нагревательного элемента. МА состава 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) сократила время нагрева для инициирования самоподдерживающейся реакции, тем самым снизив начальную

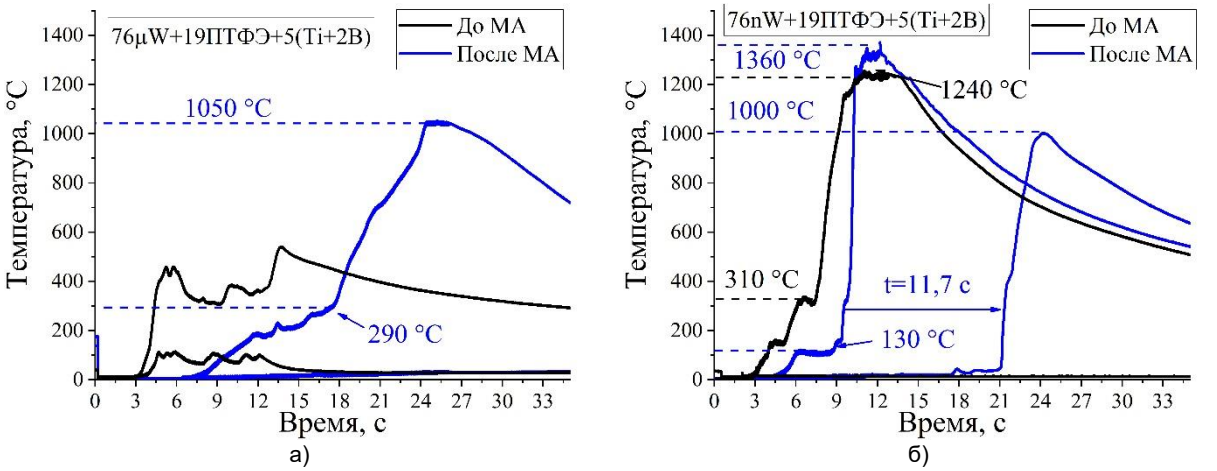
температуру образца с 310 до 130 ºС, а температура горения возросла с 1240 до 1360 ºС (рисунок 5, *б*). МА позволила реализовать самоподдерживающийся синтез во всем образце, тогда как без нее сгорало около 8 мм образца.



а) б)

Рисунок 4 – Термограммы горения образцов 76W+19ПТФЭ+5(Ni+Al) до и после МА: а) на основе μW; б) на основе nW

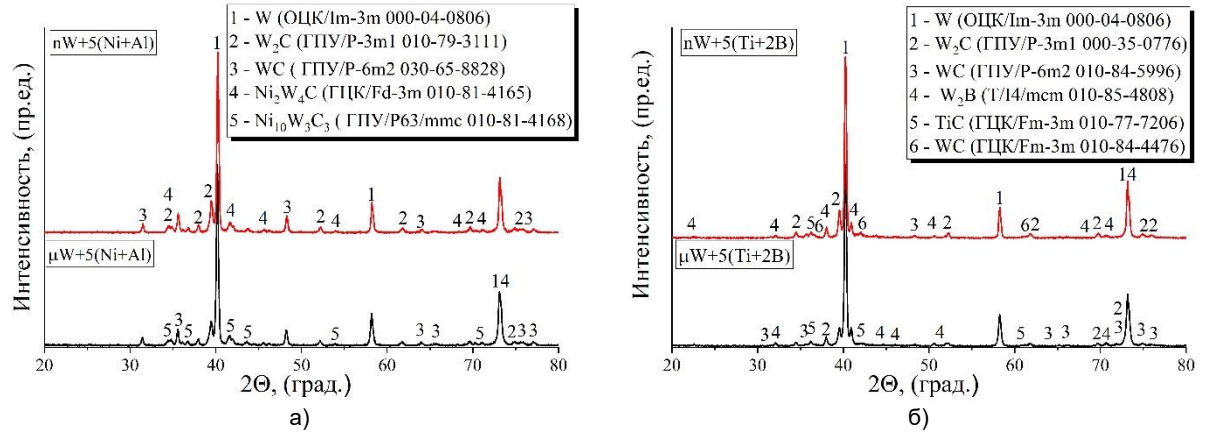
Figure 4 – Thermograms combustion samples 76W+19PTFE+5(Ni+Al) before and after MA: a) based on μW, b) based on nW



а) б)

Рисунок 5 – Термограммы горения образцов 76W+19ПТФЭ+5(Ti+2B) до и после МА: а) на основе μW; б) на основе nW

Figure 5 – Thermograms combustion samples 76W+19PTFE+5(Ti+2B) before and after MA: a) based on μW; b) based on nW



а) б)

Рисунок 6 – Дифрактограммы продуктов синтеза: а) 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al); б) 76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B)

Figure 6 – X-ray diffractograms of the synthesis products: a) 76μW+19PTFE+5(Ni+Al) and 76nW+19PTFE+5(Ni+Al), b) 76μW+19PTFE+5(Ti+2B) and 76nW+19PTFE+5(Ti+2B)

На рисунке 6 представлены дифрактограммы продуктов горения составов 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al), 76nW+ПТФЭ+5(Ni+Al), 76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) после МА. В продуктах горения состава 76W+19ПТФЭ+5(Ni+Al) обнаружены двойные карбиды (Ni_2W_4C и $Ni_{10}W_3C_3$). Интенсивность пиков продуктов синтеза составов на основе μW выше, чем составов на основе nW, что обусловлено большей длительностью нагрева образца до момента инициирования самоподдерживающейся реакции. Отсутствие свободного алюминия на дифрактограммах связано с его малым количеством, которое не обнаруживается прибором.

В таблице 3 приведен количественный анализ продуктов синтеза составов 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) до и после МА. Наибольшая глубина превращения, о чем свидетельствует наименьшее количество непрореагировавшего вольфрама, была достигнута в составах до МА. Этот факт обусловлен длительностью прогрева данных состав до реализации синтеза. Проведение МА также оказало значительное влияние на фазовый состав продуктов. До активации в продуктах синтеза преобладали карбиды вольфрама W_2C (11–20 мас. %) и WC (17–41 мас. %). После МА состав продуктов стал более сбалансированным: наблюдалось равномерное содержание фаз W_2C (11–14 мас. %), Ni_2W_4C (6–7 мас. %) и $Ni_{10}W_3C_3$ (8–11 мас. %).

Таблица 3 – Количественный анализ продуктов синтеза составов 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) до и после МА

Table 3 – Quantitative analysis of the synthesis products in the 76μW+19PTFE+5(Ni+Al) and 76nW+19PTFE+5(Ni+Al) systems before and after mechanical activation

Продукты	Составы			
	До МА	После МА	До МА	После МА
	76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al), мас. %	76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al), мас. %	76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al), мас. %	76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al), мас. %
W	35	65,7	52	57,3
W_2C	11	11,1	20	13,9
WC	41	9,2	17	10,8
Ni_2W_4C	–	5,8	11	7,3
$Ni_{10}W_3C_3$	9	8,2	–	10,7
AlF_3	4	–	–	–

В таблице 4 приведен количественный анализ продуктов синтеза составов 76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) до и после МА. Для состава 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) после МА наблюдается повышение глубины превращения, несмотря на сокращение времени прогрева. До МА составов в продуктах синтеза преобладали W_2C (15–27 мас. %), W_2B (9–12 мас. %) и Ti_2C (2–7 мас. %), а после МА содержание продуктов синтеза становилось равномерным W_2C (8–14 мас. %), WC (0.5–1.5 мас. %) W_2B (7.9–8.3 мас. %) и TiC (12–16 мас. %). После МА составов формируются композитные частицы с большей площадью контакта, чем до активации. В процессе нагрева образуется углерод, который взаимодействует с титаном вместо вольфрама из-за их большего сродства [34]. Кроме того, в составе 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) после МА наблюдается образование метастабильного кубического карбида вольфрама (WC) вместо более устойчивого гексагонального (WC), что обусловлено изменением кинетики реакции [35].

Таблица 4 – Количественный анализ продуктов синтеза составов 76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) до и после МА

Table 4 – Quantitative analysis of the synthesis products in the 76μW+19PTFE+5(Ti+2B) and 76nW+19PTFE+5(Ti+2B) systems before and after mechanical activation

Продукты	Составы			
	До МА	После МА	До МА	После МА
	76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B), мас. %	76μW+19ПТФЭ+5(Ti+2B), мас. %	76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B), мас. %	76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B), мас. %
W	45	67,0	67	57,3
W_2C	27	8,1	15	13,7
WC	7	0,5	2	1,5+7,4
W_2B	12	7,9	9	8,3
TiC	–	16,5	–	11,8
Ti_2C	9	–	7	–

ВЫВОДЫ

1. Термодинамические расчеты, а также экспериментальные исследования параметров воспламенения и горения подтвердили принципиальную возможность реализации СВС в реакционных материалах на основе системы W-ПТФЭ с добавками Ni+Al и Ti+2B. Механическая активация является эффективным методом модификации данных систем, позволяющим целенаправленно изменять их свойства.

2. Установлено, что замена μW на nW в системах W+ПТФЭ+(Ni+Al), W+ПТФЭ+(Ti+2B) снижает потерю летучих продуктов разложения ПТФЭ благодаря повышенной сорбционной способности наночастиц, что увеличивает продолжительность контакта между реагирующими компонентами и способствует более полному протеканию реакций.

3. Проведение механической активации исследуемых составов приводит к значительному повышению реакционной способности. Температура воспламенения снижается на 250–500 ºС, а скорость воспламенения повышается на порядки (со 100–200 ºС/с до 1300–2200 ºС/с). Данные эффекты обусловлены

формированием композитных частиц с развитой площадью контакта между компонентами и снижением энергии активации процесса.

4. Механическая активация оказывает существенное влияние на фазообразование, повышая полноту синтеза. В составах 76μW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) и 76nW+19ПТФЭ+5(Ni+Al) образуются двойные карбиды Ni2W4C и Ni10W3C3, содержание которых является соизмеримым с другими основными продуктами реакции (W_2C, WC). В составе 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B) образуется кубический WC вместо гексагонального.

5. Наиболее перспективным является состав 76nW+19ПТФЭ+5(Ti+2B), который после механической активации сочетает высокую скорость горения, значительную температуру и полноту протекания реакции, что делает его предпочтительными для дальнейшей апробации в условиях ударно-волнового нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang H. Characterization of the Dynamic Response and Constitutive Behavior of PTFE/Al/W Reactive Materials // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2020. Т. 45, С. 788–797. Doi: 10.1002/prep.201900334.

2. A Study on the Mechanical Properties and Impact-Induced Initiation Characteristics of Brittle PTFE/Al/W Reactive Materials / C. Ge [и др.] // Materials. 2017. Т. 10, С. 452. Doi: 10.3390/ma10050452.

3. The Effect of Crystallinity on Compressive Properties of Al-PTFE / B. Feng [и др.] // Polymers. 2016. Т. 8, С. 356. Doi: 10.3390/polym8100356.

4. Sensitivity of Al-PTFE upon Low-Speed Impact / B. Feng [и др.] // Journal of Materials Design. 2016. Т. 108, С. 411–417. Doi: 10.1016/j.matdes.2016.06.125.

5. Committee on Advanced Energetic Materials and Manufacturing Technologies, National Research Council. Advanced Energetic Materials, National Academies Press: Washington, 2004, p. 1–23.

6. Highly Reactive Metastable Intermixed Composites (MICs): Preparation and Characterization / W. He [и др.] // Advanced Materials. 2018. Т. 30, С. 1706293. Doi: 10.1002/adma.201706293.

7. Study on the Impact-Induced Energy Release Characteristics of $Zr_{68.5}Cu_{12}Ni_{12}Al_{7.5}$ Amorphous Alloy / J. Tu [и др.] // Materials. 2021. Т. 14, С. 1447. Doi: 10.3390/ma14061447.

8. Nanoenergetics as Pressure Generator for Nontoxic Impact Primers: Comparison of Al/Bi_2O_3, Al/CuO, Al/MoO_3 Nanothermites and Al/PTFE / L. Glavier [и др.] // Combustion and Flame. 2021. Т. 162, С. 1813–1820. Doi: 10.3390/ma14061447.

9. Investigation on Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites with Different Al Particle Size / J.X. Wu [и др.] // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. Т. 2018, С. 1–10. Doi: 10.1155/2018/2767563.

10. Mock W.Jr. Impact Initiation of Rods of Pressed Polytetrafluoroethylene (PTFE) and Aluminum Powders // AIP Conference Proceedings. 2006. Т. 845, С. 1097–1100. Doi: 10.1063/1.2263514.

11. Guo J. Reaction Behavior of Polytetrafluoroethylene/Al Granular Composites Subjected to Planar Shock Wave // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2017. Т. 42, С. 300–307. Doi: 10.1002/prep.201600115.

12. Hastings D.L. Reactive Structural Materials: Preparation and Characterization // Advanced Engineering Materials. 2017. Т. 1, С. 1700631. Doi: 10.1002/adem.201700631.

13. Modified model of Al/PTFE projectile impact reaction energy release considering energy loss / C. Chen [и др.] // Experimental Thermal and Fluid Science. 2020. Т. 116, С. 110132. Doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110132.

14. Compressive Mechanical Properties and Shock-Induced Reaction Behavior of Zr/PTFE and Ti/PTFE Reactive Materials / Z. Zhang [и др.] // Materials. 2022. Т. 15, С. 6524. Doi: 10.3390/ma15196524.

15. Influence of composition and microstructure on the properties of PTFE/Mg reactive materials / Z. Wu [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Т. 1965, С. 12104. Doi: 10.1088/1742-6596/1965/1/012104.

16. Fabrication and characterization of the Ni–Al energetic structural material with high energy density and mechanical properties / Q. Zhou [и др.] //Journal of Alloys and Compounds. 2020. Т. 832, С. 154894, Doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154894.

17. Investigation on reaction energy, mechanical behavior and impact insensitivity of W–PTFE–Al composites with different W percentage / L. Wang [и др.]. // Materials & Design. 2016. Т. 92, С. 397–404. Doi: 10.1016/j.matdes.2015.12.045.

18. Tao J. The effect of PTFE on the physical compatibility and mechanical performance of Al-MoO3 mechanically activated energetic composites // Journal of Dispersion Science and Technology. 2019. Т. 42, С. 653–663. Doi: 10.1080/01932691.2019.1704774.

19. Sintering Reaction and Pyrolysis Process Analysis of Al/Ta/PTFE / J. Zhang [и др.] // Polymers. 2019. Т. 11, С. 1469. Doi: 10.3390/polym11091469.

20. Investigation on the Thermal Behavior, Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites Enhanced by Ni Particle / J. Wu [и др.] // Materials. 2018. Т. 11, С. 1741. Doi: 10.3390/ma11091741.

21. Quasi-static and dynamic response of explosively consolidated metal–aluminum powder mixtures / C.T. Wei [и др.] // Acta Materialia. 2012. Т. 60, С. 1418–1432. Doi: 10.1016/j.actamat.2011.10.027.

22. Compressive Properties of PTFE/Al/Ni Composite Under Uniaxial Loading / H.X. Wang [и др.] // Journal of Materials Engineering and Performance. 2017. Т. 26, С. 2331–2336. Doi:10.1007/s11665-017-2666-y.

23. Effects of Al and W Particle Size on Combustion Characteristics and Dynamic Response of W-PTFE-Al Composites / X. Zhang [и др.] // Rare Metal Materials and Engineering. 2018. Т. 47, С. 1723–1728. Doi: 10.1016/s1875-5372(18)30156-5.

24. Shock-wave treatment of tungsten/fluoropolymer powder compositions / M.I. Alymov [и др.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8, С. 340–343. Doi: 10.1134/S2075113317020022.

25. Vadchenko S.G., Ignition of Some Powder Mixtures of Metals with Teflon // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Т. 9, С. 517–522. Doi: 10.1134/S2075113318030309.

26. Energetic Materials Based on W/PTFE/Al: Thermal and Shock-Wave Initiation of Exothermic Reactions / I.V. Saikov [и др.] // Metals, 2021. Т. 11, С. 1355. Doi: 10.3390/met11091355.

27. Effect of multi-metal-hydrides on mechanical response and impact damage characteristics of PTFE/Al/XH_2 reactive material / J. Wu [и др.] // Journal of Energetic Materials. 2023. Т. 41, С. 171–191. Doi: 10.1080/07370652.2021.1942330.

28. Impact Energy Release Characteristics of PTFE/Al/CuO Reactive Materials Measured by a New Energy Release Testing Device / L. Ding [и др.] // Polymers. 2019. Т. 11, С. 149. Doi: 10.3390/polym11010149.

29. Rogachev A.S. Mechanical activation of heterogeneous exothermic reactions in powder mixtures // Russian Chemical Reviews. 2019. Т. 88, С. 875–900. Doi: 10.1070/RCR4884.

30. Kochetov N.A. Effects of Magnesium on Initial Temperature and Mechanical Activation on Combustion Synthesis in Ti–Al–Mg System // Materials Chemistry and Physics. 2021. Т. 257, С. 123727. Doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.123727.

31. Gaurav M. Effect of mechanical activation of high specific surface area aluminium with PTFE on composite solid propellant // Combustion and Flame. 2016. Т. 166, С. 203–215. Doi: 10.1016/j.combustflame.2016.01.019.

32. Shiryaev A.A. Thermodynamics of SHS processes: advanced approach // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 1995. Т. 4, С. 351–362.

33. Reactive Ni–Al–Based Materials: Strength and Combustion Behavior / S.A. Seropyan [и др.] // Metals. 2021. Т. 11, С. 949. Doi: 10.3390/met11060949.

34. Investigation of SHS Process in W–TI–C System for Production of Tungsten Carbides WC and W_2C. Application of Carbides Mixture for Cast Iron Modification / V.A. Poluboyarov [и др.] // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2014. Т. 7, С. 579–586.

35. Suetin D.V. Structural, electronic properties and stability of tungstenmono- and semi- carbides: a first principles investigation // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2009. Т. 70, С. 64–71. Doi: 10.1016/j.jpcs.2008.09.004.

Информация об авторах

С. А. Серопян – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук.

И. В. Сайков – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук.

А. В. Смирнов – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук.

Г. Р. Сайкова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук.

Е. В. Петров – кандидат технических наук, ученый секретарь, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук.

REFERENCES

1. Zhang, H., Wang, H., and Ge, C. (2020). Characterization of the Dynamic Response and Constitutive Behavior of PTFE/Al/W Reactive Materials. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 45, 788-797. Doi: 10.1002/prep.201900334.

2. Ge, C., Maimaitituersun, W., Dong, Y. & Tian, C. (2017). A study on the mechanical properties and impact-induced initiation characteristics of brittle PTFE/Al/W reactive materials. *Materials*, 10(5), 452. Doi: 10.3390/ma10050452.

3. Feng, B., Fang, X., Wang, H.-X., Dong, W. & Li, Y.-C. (2016). The effect of crystallinity on compressive properties of Al-PTFE. *Polymers*, 8(10), 356. Doi: 10.3390/polym8100356.

4. Feng, B., Li, Y. C. & Wu, S.Z. (2016). Sensitivity of Al-PTFE upon low-speed impact. *Journal of Materials Design*, 108, 411-417. Doi: 10.1016/j.matdes.2016.06.125.

5. Committee on Advanced Energetic Materials and Manufacturing Technologies, National Research Council. (2004). Advanced energetic materials. National Academies Press.

6. He, W., Liu, P.J., He, G.Q., Gozin, M. & Yan, Q.L. (2018). Highly reactive metastable intermixed composites (MICs): Preparation and characterization. *Advanced Materials*, 30(41), 1706293. Doi: 10.1002/adma.201706293.

7. Tu, J., Qiao, L., Shan, Y., Xin, C. & Liu, J. (2021). Study on the impact-induced energy release characteristics of $Zr_{68.5}Cu_{12}Ni_{12}Al_{7.5}$ amorphous alloy. *Materials*, 14(6), 1447. Doi: 10.3390/ma14061447.

8. Glavier, L., Taton, G., Ducéré, J., Baijot, V., Pinon, S., Calais, T., Esteve, A., Rouhani, M.D. & Rossi, C. (2015). Nanoenergetics as pressure generator for nontoxic impact primers: Comparison of Al/Bi2O3, Al/CuO, Al/MoO3 nanothermites and Al/PTFE. *Combustion and Flame*, 162(5), 1813-1820. doi 10.1016/j.combustflame.2014.12.002.

9. Wu, J.-X., Fang, X., Gao, Z.-R., Wang, H.-X., Huang, J.-Y., Wu, S.-Z. & Li, Y.-C. (2018). Investigation on mechanical properties and reaction characteristics of Al-PTFE composites with different Al particle size. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1-10. Doi: 10.1155/2018/2767563.

10. Mock, W.Jr. & Holt, W.H. (2006). Impact initiation of rods of pressed polytetrafluoroethylene (PTFE) and aluminum powders. *AIP Conference Proceedings*, 845(1), 1097-1100. Doi: 10.1063/1.2263514.

11. Guo, J., Zhang, Q.M. & Zhang, L.S. (2017). Reaction behavior of polytetrafluoroethylene/Al granular composites subjected to planar shock wave. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 42(3), 300-307. Doi: 10.1002/prep.201600115.

12. Hastings, D.L. & Dreizin, E.L. (2017). Reactive structural materials: Preparation and characterization. *Advanced Engineering Materials*, 1, 1700631. Doi: 10.1002/adem.201700631.

13. Chen, C., Tang, E., Zhu, W., Han, Y. & Gao, Q. (2020). Modified model of Al/PTFE projectile impact reaction energy release considering energy loss. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 116, 110132. Doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110132.

14. Zhang, Z., He, Y., He, Y., Guo, L., Ge, C., Wang, H., Ma, Y., Gao, H., Tian, W. & Wang, C. (2022). Compressive mechanical properties and shock-induced reaction behavior of Zr/PTFE and Ti/PTFE reactive materials. *Materials*, 15(19), 6524. Doi: 10.3390/ma15196524.

15. Wu, Z., Liu, J., Yunshu, G., Feng, X. & He, C. (2021). Influence of composition and microstructure on the properties of PTFE/Mg reactive materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 1965(1), 012104. Doi: 10.1088/1742-6596/1965/1/012104.

16. Zhou, Q., Hu, Q.W., Wang, B., Zhou, B.B., Chen, P.W. & Liu, R. (2020). Fabrication and characterization of the Ni-Al energetic structural material with high energy density and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 832, 154894. Doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154894.

17. Wang, L., Liu, J., Li, S. & Zhang, X. (2016). Investigation on reaction energy, mechanical behavior and impact insensitivity of W-PTFE-Al composites with different W percentage. *Materials & Design*, 92, 397-404. Doi: 10.1016/j.matdes.2015.12.045.

18. Tao, J. & Wang, X. (2019). The effect of PTFE on the physical compatibility and mechanical performance of Al-MoO3 mechanically activated energetic composites. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(5), 653-663. Doi: 10.1080/01932691.2019.1704774.

19. Zhang, J., Huang, J., Li, Y., Liu, Q., Yu, Z., Wu, J., Gao, Z., Wu, S., Kui, J. & Song, J. (2019). Sintering reaction and pyrolysis process analysis of Al/Ta/PTFE. *Polymers*, 11(9), 1469. Doi: 10.3390/polym11091469.

20. Wu, J., Wang, H., Fang, X., Li, Y., Mao, Y., Yang, L., Yin, Q., Wu, S., Yao, M. & Song, J. (2018). Investigation on the thermal behavior, mechanical properties and reaction characteristics of Al-PTFE composites enhanced by Ni particle. *Materials*, 11(9), 1741. Doi: 10.3390/ma11091741.

21. Wei, C.T., Vitali, E., Jiang, F., Du, S.W., Benson, D.J., Vecchio, K.S., Thadhani, N.N. & Meyers, M.A.

(2012). Quasi-static and dynamic response of explosively consolidated metal-aluminum powder mixtures. *Acta Materialia*, 60(3), 1418-1432. Doi: 10.1016/j.actamat. 2011.10.027.

22. Wang, H.X., Li, Y.C., Feng, B., Huang, J.Y., Zhang, S. & Fang, X. (2017). Compressive properties of PTFE/Al/Ni composite under uniaxial loading. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(5), 2331-2336. Doi: 10.1007/s11665-017-2666-y.

23. Zhang, X., Liu, J., Wang, L., Li, S., Zhang, S., Lan, J. & Wang, Y. (2018). Effects of Al and W particle size on combustion characteristics and dynamic response of W-PTFE-Al composites. *Rare Metal Materials and Engineering*, 47(6), 1723-1728. Doi: 10.1016/s1875-5372(18)30156-5.

24. Alymov, M.I., Vadchenko, S.G., Saikov, I.V. & Kovalev, I.D. (2017). Shock-wave treatment of tungsten/ fluoropolymer powder compositions. *Inorganic Materials: Applied Research*, 8(2), 340-343. Doi: 10.1134/ S2075113317020022.

25. Vadchenko, S.G., Alymov, M.I. & Saikov, I.V. (2018). Ignition of some powder mixtures of metals with Teflon. *Inorganic Materials: Applied Research*, 9(3), 517-522. Doi: 10.1134/S2075113318030309.

26. Saikov, I.V., Seropyan, S.A., Malakhov, A.Y., Saikova, G.R., Denisov, I.V. & Petrov, E.V. (2021). Energetic Materials Based on W/PTFE/Al: Thermal and Shock-Wave Initiation of Exothermic Reactions. *Metals*, 11(9), 1355. Doi: 10.3390/met11091355.

27. Wu, J., Huang, J., Zhang, J., Li, Y., Yin, Q., Xiao, L., Liu, Q., Wu, S., and Yao, M. (2023). Effect of multi-metal-hydrides on mechanical response and impact damage characteristics of PTFE/Al/XH_2 reactive material. *Journal of Energetic Materials*. 41, 171-191. Doi: 10.1080/07370652. 2021.1942330.

28. Ding, L., Zhou, J., Tang, W., Ran, X. & Hu, Y. (2019). Impact energy release characteristics of PTFE/Al/CuO reactive materials measured by a new energy release testing device. *Polymers*, 11(1), 149. Doi: 10.3390/ polym11010149.

29. Rogachev, A.S. (2019). Mechanical activation of heterogeneous exothermic reactions in powder mixtures. *Russian Chemical Reviews*, 88(9), 875-900. Doi: 10.1070/ RCR4884.

30. Kochetov, N.A. & Sytschev, A.E. (2021). Effects of magnesium on initial temperature and mechanical activation on combustion synthesis in Ti-Al-Mg system. *Materials Chemistry and Physics*, 257, 123727. Doi: 10.1016/ j.matchemphys.2020.123727.

31. Gaurav, M. & Ramakrishna, P.A. (2016). Effect of mechanical activation of high specific surface area aluminium with PTFE on composite solid propellant. *Combustion and Flame*, 166, 203-215. Doi: 10.1016/j.combustflame. 2016.01.019.

32. Shiryaev, A.A. (1995). Thermodynamics of SHS processes: Advanced approach. International *Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 4(4), 351-362.

33. Seropyan, S.A., Saikov, I.V., Andreev, D.E., Saikova, G.R. & Alymov, M.I. (2021). Reactive Ni-Al-based materials: Strength and combustion behavior. *Metals*, 11(6), 949. Doi: 10.3390/met11060949.

34. Poluboyarov, V.A., Zhdanok, A.A., Korotaeva, Z.A. & Kuznetzov, V.A. (2014). Investigation of SHS process in W-Ti-C system for production of tungsten carbides WC and W2C. Application of carbides mixture for cast iron modification. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 7, 579-586.

35. Suetin, D.V., Shein, I.R. & Ivanovskii, A.L. (2009). Structural, electronic properties and stability of tungsten mono- and semi- carbides: A first principles investigation. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 70(1), 64-71. Doi: 10.1016/j.jpcs.2008.09.004.

Information about the authors

S.A. Seropyan - junior research, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences.

I.V. Saikov - Ph.D. in Engineering sciences, Leading Researcher, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences.

A.V. Smirnov - junior research, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences.

G.R. Saikova - Ph.D. in Engineering sciences, Senior Researcher, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences.

E.V. Petrov - Ph.D. in Engineering sciences, Scientific Secretary, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 186–194.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 186–194.

Обзорная статья
2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
УДК 621.357.7+669.587+661.635.68
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.026 EDN: AZGDBA

ПОЛИФОСФАТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ЦИНКОВАНИЯ

Евгений Геннадиевич Афонин

Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств, Калуга, Россия
afonineg.chem@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-5457-8646

Аннотация. *Покрытия цинком недороги, эффективны и широко применяются в промышленности для защиты стали от коррозии. В статье представлен краткий обзор химических составов и технологических характеристик известных из литературы электролитов для получения покрытий цинком и его сплавами, содержащих комплексы цинка(+2) с анионами полифосфорных кислот $H_2O_3P[PO_2(OH)]_nOPO_3H_2$. Полифосфатные электролиты позволяют наносить покрытия цинком, сплавами цинк–олово, цинк–медь хорошего качества. Например, из электролита с pH 7,5–8,5, содержащего 20–23 г/дм^3 сульфата цинка, 14–16 г/дм^3 дигидрата хлорида олова(+2), 200–300 г/дм^3 триполифосфата натрия, 1–3 г/дм^3 желатина, при температуре 55–65 ºС, катодной плотности тока 1–4 А/дм^2 получают беспористые, однородные, мелкокристаллические покрытия сплавом Zn–Sn (катодный выход по току 60–70 %, массовая доля цинка в покрытии 1–33 %). В обзоре приведены данные о термодинамической устойчивости триполифосфатных комплексов цинка(+2) в водном растворе, кристаллических соединениях цинка(+2) с триполифосфат-ионами $P_3O_{10}^{5-}$, даны рекомендации по составам триполифосфатных электролитов для получения покрытий цинком, сплавами цинк–олово, цинк–медь, цинк–никель.*

Ключевые слова: *электролит цинкования, полифосфатный электролит, триполифосфат, химический состав электролита, технологическая характеристика электролита, комплексообразование, приготовление электролита.*

Для цитирования: Афонин Е. Г. Полифосфатные электролиты цинкования // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 186–194. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.026. EDN: https://elibrary.ru/AZGDBA.

Review article

POLYPHOSPHATE ELECTROLYTES FOR ZINC PLATING

Evgeniy G. Afonin

Kaluga research institute of telemechanical devices, Kaluga, Russia
afonineg.chem@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-5457-8646

Abstract. *Zinc coatings are inexpensive, effective, and widely used in industry for sacrificial protection of steel against corrosion. The article provides a brief overview of the available literature on the chemical compositions and technological characteristics of the electrolytes for the production of zinc and its alloys coatings containing zinc(+2) complexes with anions of polyphosphoric acids $H_2O_3P[PO_2(OH)]_nOPO_3H_2$. Good quality Zn, Zn-Cu, Zn-Sn coatings was obtained from an electrolytes containing metals complexes with tripolyphosphate-ion $P_3O_{10}^{5-}$. For example, non-porous, uniform, fine crystalline Zn-Sn alloy coatings were obtained from the electrolytes with pH 7,5-8,5 containing 20-23 g/dm^3 of zinc sulfate, 14-16 g/dm^3 of tin(+2) chloride dihydrate, 200-300 g/dm^3 of sodium tripolyphosphate, 1-3 g/dm^3 of gelatin at temperature 55-65 ºC, cathodic current density 1-4 A/dm^2 with current efficiency 60-70 % (Zn 1-33 wt% in an alloys). Literature data on Zn(+2) - tripolyphosphate complex formation in aqueous solutions and on crystalline Zn(+2) - tripolyphosphate compounds are presented. Methods for preparing of Zn(+2), Zn(+2)-Sn(+2), Zn(+2)-Cu(+2), Zn(+2)-Ni(+2)- $P_3O_{10}^{5-}$ electroplating baths from metal(+2) salts and sodium or potassium tripolyphosphates are also described in this review.*

Keywords: *zinc plating electrolyte, polyphosphate electrolyte, tripolyphosphate, chemical composition of electrolyte, technological characteristic of electrolyte, complex formation, electrolyte preparing method.*

For citation: Afonin, E. G. (2026). Polyphosphate electrolytes for zinc plating. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 186-194. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.026. EDN: https: //elibrary.ru/AZGDBA.

ВВЕДЕНИЕ

Покрытия цинком, полученные гальваническим методом, широко применяются для защиты поверхности деталей из черных металлов от атмосферной коррозии и коррозии в пресной воде, а также для их декоративной отделки [1–4].

Гальваническое цинкование можно проводить из водных электролитов различного химического состава [2, 5–9]: кислых некомплексных (сульфатных, хлоридных, перхлоратных, бромидных, тетрафтороборатных, сульфаматных, метансульфонатных, ацетатных), щелочных цинкатных, слабокислых, нейтральных и слабощелочных комплексных (цианидных, дифосфатных, аммиакатных, хлоридно-аммиакатных, этилендиаминовых, полиэтиленполиаминовых, моноэтаноламиновых, триэтаноламиновых, оксалатных, лактатных, D-

© Афонин Е. Г., 2026

глюконатных, тартратных, цитратных, аминоацетатных, аминотриацетатных, этилендиаминтетраацетатных, аминотриметиленфосфонатных, этилендиаминтетраметиленфосфонатных, 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфонатных) и некоторых других.

Полифосфатные электролиты цинкования относятся к группе комплексных электролитов; электроосаждение цинкового покрытия происходит из комплексов цинка(+2) с анионами полифосфорных кислот, чаще всего триполифосфорной кислоты $H_5P_3O_{10}$; полифосфатные электролиты цинкования по химической природе родственны дифосфатным электролитам цинкования, в которых электроосаждение цинка идет из его комплексов с анионами дифосфорной кислоты $H_4P_2O_7$. Термодинамически прочные триполифосфатные комплексы удерживают катионы цинка(+2) в водном растворе в слабощелочной среде в условиях, когда без лиганда (триполифосфат-иона) катионы Zn^{2+} выпадают в осадок в форме гидроксида или гидроксосолей.

В настоящей статье дан обзор химического состава и некоторых технологических характеристик полифосфатных электролитов для получения покрытий цинком, сплавами цинка с оловом или медью.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛИФОСФАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ЦИНКОВАНИЯ

Полифосфаты натрия и калия являются солями линейных полифосфорных кислот $H_2O_3P[PO_2(OH)]_nOPO_3H_2$, n = 1,2,3… (рис. 1), например триполифосфорная кислота $H_5P_3O_{10}$ (рис. 2) и триполифосфат натрия $Na_5P_3O_{10}$, триполифосфат калия $K_5P_3O_{10}$ (рис. 3).

Известно большое число полифосфатов натрия и калия, например [10–13], но практическое значение имеют лишь немногие из них. Химической промышленностью производятся как средства для умягчения воды, пищевые добавки, компоненты буровых растворов, флотореагенты и другие, являются недорогими и часто пригодными для использования в составах электролитов для покрытия металлами кристаллические триполифосфат натрия ($Na_5P_3O_{10}$ CAS 7758-29-4 и $Na_5P_3O_{10}\cdot 6H_2O$ CAS 15091-98-2), триполифосфат калия ($K_5P_3O_{10}$ CAS13845-36-8), стеклообразные полифосфат натрия (соль Грэма $(NaPO_3)_n$), полифосфат калия $(KPO_3)_n$ и некоторые другие [10–26]. Технический триполифосфат натрия ГОСТ 13493-86 [15] представляет собой безводную соль $Na_5P_3O_{10}$ (не менее 94,0 % основного вещества, не более 0,1 % нерастворимых в воде веществ, содержание мышьяка и фторидов не нормируется) [15] с примесью ортофосфата, дифосфата, сульфата, хлорида натрия и некоторых других веществ [12]; пищевой триполифосфат натрия ГОСТ 31638-2012 является слабо гигроскопичным безводным веществом $Na_5P_3O_{10}$ (не менее 85 % основного вещества, не более 0,1 % нерастворимых в воде веществ, не более 0,005 % фторидов, не более 0,0003 % мышьяка, не более 0,0004 % свинца) [16] или кристаллогидратом $Na_5P_3O_{10}\cdot 6H_2O$ (не менее 65 % основного вещества) [16]; пищевой триполифосфат калия ГОСТ 31638-2012 представляет собой гигроскопичное бесцветное вещество $K_5P_3O_{10}$ (не менее 85 % основного вещества, не более 2,0 % нерастворимых в воде веществ, не более 0,001 % фторидов, не более 0,0003 % мышьяка, не более 0,0004 % свинца) [16]. Промышленностью также выпускаются триполифосфаты натрия и калия с заявленным содержанием основного вещества 95-99 %, например [24-26]. Перекристаллизацией из воды, водного раствора NaOH, водных растворов этанола или ацетона можно получить 98–99 %-ный препарат $Na_5P_3O_{10}\cdot 6H_2O$ [10, 11].

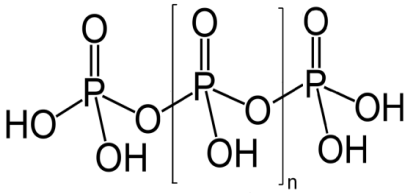


Рисунок 1 – Общая структурная формула полифосфорных кислот

Figure 1 – General structural formula of polyphosphoric acids

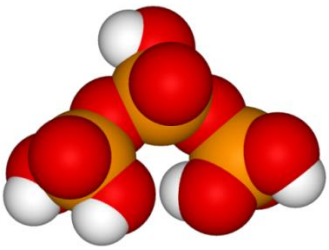


Рисунок 2 – Объемная формула триполифосфорной кислоты (Wikipedia)

Figure 2 – Volume formula of tripolyphosphoric acid (from Wikipedia)

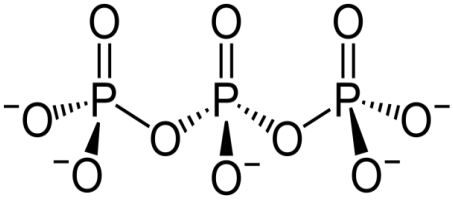


Рисунок 3 –Химическое строение триполифосфат-иона

Figure 3 – Chemical structure of tripolyphosphate-ion

Триполифосфаты натрия и калия представляют собой бесцветные кристаллические порошки, хорошо растворимые в воде: $Na_5P_3O_{10}$ 13-14 % при 0–50 ºС, $K_5P_3O_{10}$ 194 г/100 г воды при 10 ºС, 212 г/100 г воды при 50 ºС [10–12, 24], pH 1 %-ных водных растворов очищенных солей 9,7–9,9.

Пищевой полифосфат калия ГОСТ 33773-2016 [18] представляет собой хорошо растворимый в воде стеклообразный материал, который является в основном смесью калиевых солей линейных полифосфорных кислот (рис. 1) (массовая доля циклических полифосфатов не более 8,0 %, массовая доля фторидов не более 0,001 %). Технический полифосфат натрия ГОСТ 20291-80 [14] – бесцветное стеклообразное вещество, хорошо растворимое в воде (массовые доли $(NaPO_3)_n$ не менее 88 %, неактивных фосфатов не более 7 %).

Безводный триполифосфат натрия существует в форме двух моноклинных кристаллических модификаций, пр. гр. C2/c [27, 28]; гексагидрат триполифосфата натрия образует триклинные кристаллы [29, 30]; известны также структуры некоторых других солей триполифосфорной кислоты с катионами натрия, калия и аммония [31–34] (табл. 1).

КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ ИОНОВ ЦИНКА(+2) С ТРИПОЛИФОСФАТ-ИОНАМИ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТРИПОЛИФОСФАТЫ ЦИНКА(+2)

В водных растворах, содержащих цинк(+2) и триполифосфат-ион, в слабощелочной среде, характерной для триполифосфатных электролитов цинкования, образуются комплексы $[ZnP_3O_{10}]^{3-}$ (lg $K_{уст.}$= 6,5–8,4 при *I* = 0,1-0,15 и t = 20-25 ºС) [11, 35–44] и, возможно, $[Zn(P_3O_{10})_2]^{8-}$ [35, 42] с термодинамической устойчивостью, достаточно высокой для того, чтобы удержать цинк(+2) от осаждения в форме гидроксида. В слабокислой среде образуются также протонированные комплексы $[ZnHP_3O_{10}]^{2-}$ (lg $K_{уст.}$= 3,7-5,1 при *I* = 0,1–0,15 и t = 20–25 ºС) [38, 40, 43] и $[ZnH_2P_3O_{10}]^{-}$ (lg $K_{уст.}$= 3,11 при *I* = 0,15 и t = 25 ºС) [43], а в сильнощелочных средах вероятно образование гидроксотриполифосфатных комплексов $[Zn(OH)(P_3O_{10})]^{4-}$ и переход их в гидроксокомплекс $[Zn(OH)_4]^{2-}$ по мере роста концентрации ионов OH^-.

Из водных растворов выделены кристаллические триполифосфатные комплексы цинка состава $Zn_5(P_3O_{10})_2 \cdot 17H_2O$ [45, 46], $Zn_2HP_3O_{10} \cdot 6H_2O$ [47], $NaZn_2P_3O_{10} \cdot 9H_2O$ [11, 48], $NH_4Zn_2P_3O_{10} \cdot 7H_2O$ [49, 52, 53], $LiZn_2P_3O_{10} \cdot 8H_2O$ [51, 53], $Na_3ZnP_3O_{10} \cdot 12H_2O$ [11, 50, 54] (табл. 2).

Таблица 1 – Кристаллографические параметры триполифосфатов щелочных металлов и аммония (Пр. гр. – пространственная группа симметрии, z – число формульных единиц в элементарной ячейке)

Table 1 – Crystal data for sodium, potassium and ammonium tripolyphosphates (Sp. gr. – space symmetry group, z – number of formula units)

Формула вещества	Сингония	Пр. гр.	z	a, Å b, Å c, Å	α, град β, град γ, град	Литература
$Na_5P_3O_{10} \cdot 6H_2O$	триклинная	P$\bar{1}$	2	7,572(1) 9,801(1) 10,308(1)	90,92(2) 94,48(2) 92,23(2)	[29]
				10,370(2) 9,848(4) 7,615(3)	92,24(7) 94,55(9) 90,87(6)	[30]
$Na_3K_2P_3O_{10}$	моноклинная	C2/c	4	9,8866(4) 5,6332(2) 18,6577(8)	90 96,199(3) 90	[31]
$Na(NH_4)_4P_3O_{10} \cdot 4H_2O$	моноклинная	C2/c	4	11,813(8) 7,292(3) 20,20(8)	90 105,19(5) 90	[32]
$Na_4HP_3O_{10} \cdot H_2O$	ромбическая	Pbcn	4	6,932(5) 12,033(4) 11,885(4)	90 90 90	[33]
$(NH_4)_5P_3O_{10} \cdot H_2O$	моноклинная	Pn	2	6,429(2) 10,326(3) 11,013(4)	90 90,0(3) 90	[34]

Таблица 2 − Кристаллографические параметры триполифосфатов цинка(+2) (Пр. гр. – пространственная группа симметрии, z – число формульных единиц в элементарной ячейке)

Table 2 – Crystal data for zinc(+2) tripolyphosphates (Sp. gr. – space symmetry group, z – number of formula units)

Формула вещества	Сингония	Пр. гр.	z	a, Å b, Å c, Å	α, град β, град γ, град	Литература
$Zn_5(P_3O_{10})_2 \cdot 17H_2O$	триклинная	P$\bar{1}$	1	10,766(8) 10,316(8) 8,525(5)	111,39(5) 115,08(5) 70,19(5)	[45, 46]
$Zn_2HP_3O_{10} \cdot 6H_2O$	триклинная	P$\bar{1}$	2	10,714(8) 10,658(8) 8,391(5)	114,51(1) 103,21(1) 74,31(1)	[47]
$LiZn_2P_3O_{10} \cdot 8H_2O$	триклинная	P$\bar{1}$	2	10,305(1) 10,505(1) 8,761(1)	101,79(1) 113,42(1) 94,24(1)	[51, 53]
$NaZn_2P_3O_{10} \cdot 9H_2O$	триклинная	P$\bar{1}$	2	10,454(5) 10,675(5) 8,629(4)	101,14(2) 109,85(2) 99,03(2)	[48]
$NH_4Zn_2P_3O_{10} \cdot 7H_2O$	триклинная	P$\bar{1}$	2	10,529(3) 10,737(3) 8,497(3)	102,93(2) 111,90(2) 96,01(2)	[52, 53]
		–	2	10,73(2) 8,474(8) 10,725(10)	65,03(10) 105,94(10) 102,90(12)	[49, 50]
$Na_3ZnP_3O_{10} \cdot 12H_2O$	моноклинная	$P2_1/n$	4	15,03(1) 9,241(3) 14,70(1)	90 90 90	[54]

Таблица 3 – Химический состав и некоторые технологические характеристики полифосфатных электролитов для получения покрытий цинком и сплавами цинка (t – рабочая температура электролита, $i_к$ – катодная плотность тока)

Table 3 – Chemical compositions and some technological characteristics of polyphosphate solutions for zinc and zinc alloys electrodeposition (t – temperature of operation, $i_к$ – cathode current density)

N	Компоненты электролита	Концентрация компонента	pH	$i_к$, А/дм^2	t, °C	Литература
1	Сульфат цинка Триполифосфат натрия	20 г/дм^3 100 г/дм^3		0,3–0,8	комнатная	[55]
2	Соль цинка Триполифосфат натрия	мольное соотношение 1 : 4	7–8	0,5–3	50	[56, 64]
3	Гидроксид цинка Триполифосфат натрия Декстрин	7 г/дм^3 100 г/дм^3 1 г/дм^3		0,3–0,8	комнатная	[55]
4	Сульфат цинка Триполифосфат натрия Ацетат аммония Декстрин	25–30 г/дм^3 180–190 г/дм^3 30 г/дм^3 1–2 г/дм^3				[7]
5	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ $Na_5P_3O_{10}$ трилон Б NH_4Cl NaOH	57,5 г/дм^3 58 г/дм^3 47 г/дм^3 30 г/дм^3 4,0 г/дм^3		0,5–3	50	[64]
6	Zn^{+2} полифосфат (в расчете на P_2O_5) NaOH фурфурол желатин	20 г/дм^3 100 г/дм^3 160 г/дм^3 1–3 см^3/дм^3 0,2 г/дм^3			22	[64]
7	$ZnSO_4$ $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ $Na_5P_3O_{10}$ желатин	20–23 г/дм^3 14–16 г/дм^3 200–300 г/дм^3 1–3 г/дм^3	7,5–8,5	1,5–3	55–65	[57, 58]
8	$ZnSO_4$ $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ $Na_5P_3O_{10}$ желатин	8,1 г/дм^3 34 г/дм^3 220–230 г/дм^3 1–2 г/дм^3		2–4		[59]
9	сульфат цинка сульфат меди триполифосфат натрия гидрофосфат натрия	40–46 г/дм^3 11–13 г/дм^3 224–230 г/дм^3 18–20 г/дм^3	7,4–8,0	0,8–1,2	30–40	[60, 61]
10	сумма Zn^{+2} и Cu^{+2} триполифосфат калия пирофосфат калия	0,30–0,45 моль/дм^3 0,9–1,1 моль/дм^3 0,15–0,45 моль/дм^3		2–7		[65]

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИФОСФАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ЦИНКОМ И СПЛАВАМИ ЦИНКА

Известны полифосфатные электролиты цинкования, покрытия сплавами цинк–олово, цинк–медь (табл. 3) [7, 55–66], большинство из которых содержит триполифосфат-ион в качестве лиганда для связывания катионов цинка(+2), олова(+2), меди(+2) в комплексы.

В электролитах 1–4, 7–10 (табл. 3) на 1 моль Zn^{+2} или суммы Zn^{+2}, Sn^{+2}, Cu^{+2} приходится 2,8–4,0 моль триполифосфат-ионов, pH электролитов 7–8,5, что предполагает нахождение в них катионов металлов в основном в форме $[MP_3O_{10}]^{3-}$ и, может быть, дополнительно $[M(P_3O_{10})_2]^{8-}$. По химическому составу электролиты 5, 10 (табл. 3) являются билигандными: кроме триполифосфат-ионов они включают этилендиаминтетраацетат- и дифосфат-ионы соответственно. Электролит 6, по существу, цинкатный: основные частицы в нем – это гидроксокомплекс $[Zn(OH)_4]^{2-}$ и, возможно, гидроксополифосфатные комплексы цинка(+2).

Рабочая температура электролитов (табл. 3) чаще повышенная (~ 50 ºС), катодная плотность тока обычно 0,5–4 А/дм^2, рассеивающая способность высокая, выход металла по току 35 % (2), 70–75 % (5), 60–70 % (7). На катоде образуются светлые, мелкозернистые (1, 3, 5), полублестящие (3), блестящие (6) осадки цинка или плотные (10), беспористые (7), хорошо сцепленные с основой (9) осадки сплавов цинка с мелкокристаллической структурой (7–9), которые содержат 20–40 % цинка [55–65].

При использовании триполифосфатных электролитов следует принимать во внимание гидролиз аниона $P_3O_{10}^{5-}$, скорость которого зависит от pH и растет с увеличением температуры электролита [67, 68].

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ТРИПОЛИФОСФАТНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ЦИНКОМ И СПЛАВАМИ ЦИНКА

Триполифосфатные электролиты цинкования готовят, используя растворимые в воде соли цинка: $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (CAS 7446-20-0, ГОСТ 4174-77, M = 287,54 г/моль); $ZnCl_2$ (CAS 7646-85-7, ГОСТ 4529-78, M = 136,29 г/моль); $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (CAS 10196-18-6, ГОСТ 5106-77, M = 297,48 г/моль), $Zn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ (CAS 13598-37-3, ТУ 6-09-01-424-77, M = 295,38 г/моль), $Zn(H_2NSO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (CAS 13770-90-6, ТУ 6-09-02-167-76, M = 329,61 г/моль), $Zn(BF_4)_2 \cdot 6H_2O$ (CAS 27860-83-9, ТУ 6-09-2551-77, M = 347,08 г/моль), $Zn(CH_3SO_3)_2 \cdot 4H_2O$

(CAS 33684-80-9, M = 327,63 г/моль), $Zn(CF_3SO_3)_2$ (CAS 54010-75-1, M = 363,53 г/моль), $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ (CAS 5970-45-6, ГОСТ 5823-78, M = 219,50 г/моль), $Zn(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$ (CAS 5970-62-7, ТУ 6-09-08-1238-77, M = 191,44 г/моль), а также триполифосфаты натрия $Na_5P_3O_{10}$ (M = 367,86 г/моль), $Na_5P_3O_{10} \cdot 6H_2O$ (M = 475,96 г/моль) и калия $K_5P_3O_{10}$ (M = 448,41 г/моль), подробно охарактеризованные в этой статье выше.

Обычно водные триполифосфатные электролиты для получения покрытий цинком и его сплавами готовят прибавлением частями при перемешивании растворов солей металлов (цинка, меди, олова, никеля, кобальта, железа, марганца) к водному раствору триполифосфата натрия или калия, затем вводят необходимые добавки, после чего устанавливают заданное значение pH прибавлением растворов кислот или щелочей и доводят водой до заданного объема [56–58, 60].

Пример 1.

В 90 см^3 воды при перемешивании растворяют 22 г дигидрата ацетата цинка ГОСТ 5823-78 марки «чда». В 850 см^3 воды при комнатной температуре при перемешивании растворяют 115 г триполифосфата натрия (содержание основного вещества 96 %) ГОСТ 31638-2012, 25 г гидрофосфата аммония ГОСТ 3772-74 марки «чда» и 1,0 г ванилина ГОСТ 16599-71. Первый раствор частями вливают во второй раствор и перемешивают до растворения осадка.

Состав электролита цинкования: ацетат цинка – 0,10 моль/дм^3, триполифосфат натрия – 0,30 моль/дм^3, гидрофосфат аммония – 0,19 моль/дм^3, ванилин – 0,0065 моль/дм^3.

Пример 2.

В 500 см^3 воды при комнатной температуре при перемешивании растворяют 250 г триполифосфата калия (93 %) ГОСТ 31638-2012, 17 см^3 этилендиамина (97 %) ТУ 2636-160-44493179-2013 марки «чда» и 1,5 г декстрина ГОСТ 6034-74. В 200 см^3 воды растворяют 40 г гептагидрата сульфата цинка ГОСТ 4174-77 марки «чда». Второй раствор при перемешивании вливают в первый раствор, перемешивают до растворения осадка, при необходимости фильтруют и доводят водой до объема 1,00 дм^3.

Состав электролита цинкования: сульфат цинка – 0,14 моль/дм^3, триполифосфат калия – 0,52 моль/дм^3, этилендиамин – 0,25 моль/дм^3, декстрин – 1,5 г/дм^3.

Пример 3.

В 400 см^3 воды растворяют 212 г триполифосфата калия (95 %) ГОСТ 31638-2012 и 15 г аминоуксусной кислоты ГОСТ 5860-75 марки «чда». В 300 см^3 воды при перемешивании растворяют 7,8 г сульфата гидразиния ГОСТ 5841-74 марки «чда», 29 г гептагидрата сульфата цинка ГОСТ 4174-77 марки «чда» и 7,5 г сульфата олова(+2) ТУ 6-09-1502-75 марки «чда». Второй раствор при перемешивании частями вливают в первый раствор, прибавляют 30 %-ный раствор гидроксида калия до достижения pH 8,0 и доводят водой до объема 1,00 дм^3.

Состав электролита для покрытия сплавом цинк–олово: сульфат цинка – 0,10 моль/дм^3, сульфат олова(+2) – 0,035 моль/дм^3, триполифосфат калия – 0,45 моль/дм^3, аминоуксусная кислота – 0,20 моль/дм^3, гидразин – 0,060 моль/дм^3.

Пример 4.

В 100 см^3 воды при комнатной температуре растворяют 29 г гептагидрата сульфата цинка ГОСТ 4174-77 марки «чда» и 6,3 г пентагидрата сульфата меди ГОСТ 4165-78 марки «чда». В 700 см^3 воды при комнатной температуре растворяют 154 г гексагидрата триполифосфата натрия (содержание основного вещества 93 %) ГОСТ 31638-2012 и 18 г додекагидрата гидрофосфата натрия ГОСТ 4172-76 марки «чда». Первый раствор частями при перемешивании вливают во второй раствор, перемешивают до растворения осадка, затем при перемешивании прибавляют раствор гидроксида натрия до pH 7,7 и доводят водой до объёма 1,00 дм^3.

Состав электролита латунирования: сульфат цинка – 0,10 моль/дм^3, сульфат меди – 0,025 моль/дм^3, триполифосфат натрия – 0,30 моль/дм^3, гидрофосфат натрия – 0,050 моль/дм^3.

Пример 5.

10,5 г моногидрата 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфоновой кислоты, очищенного перекристаллизацией реактива ТУ 6-09-6372-87 марки «ч» из 80 %-ной уксусной кислоты [69], растворяют в 100 см^3 воды, прибавляют 30 %-ный раствор гидроксида калия до pH примерно 8, разбавляют водой до объема примерно 500 см^3, вносят 236 г триполифосфата калия (95 %) ГОСТ 31638-2012 и перемешивают до растворения вещества. В 200 см^3 растворяют 20,3 г гептагидрата сульфата цинка ГОСТ 4174-77 марки «чда» и 37,5 г тетрагидрата ацетата никеля ТУ 6-09-3848-75 марки «хч». Этот раствор при перемешивании частями вливают в первый раствор, прибавляют 30 %-ный раствор гидроксида калия до достижения pH 8,0 и доводят водой до объёма 1,00 дм^3.

Состав электролита для покрытия сплавом цинк–никель: сульфат цинка – 0,070 моль/дм^3, ацетат никеля – 0,15 моль/дм^3, триполифосфат калия – 0,50 моль/дм^3, 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфонат калия – 0,050 моль/дм^3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая доступность, невысокую стоимость, удовлетворительную чистоту, низкую токсичность, высокую растворимость в воде исходных веществ (прежде всего триполифосфатов натрия и калия), хорошее качество покрытий, триполифосфатные электролиты для получения покрытий цинком и сплавами цинка заслуживают более пристального внимания исследователей. Представляется важным дополнительно изучить технологические возможности электроосаждения цинка и его сплавов с медью, оловом, никелем, кобальтом, железом, марганцем, сурьмой из полилигандных электролитов, содержащих, кроме основного лиганда – триполифосфата, дополнительный лиганд: полиамин (например этилендиамин, диэтилентриамин, триэтилентетрамин), аминоспирт (например моноэтаноламин, диэтаноламин, триэтаноламин), гидроксикарбоновую кислоту (например молочную, яблочную, винную, лимонную, D-глюконовую, салициловую), аминокарбоновую кислоту (например аминоуксусную, аминодиуксусную, аминотриуксусную), фосфоновую кислоту (например 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфоновую, аминотриметиленфосфоновую, этилендиаминтетраметиленфосфоновую), а также поверхностно-активные и иные необходимые добавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проскуркин Е.В., Попович В.А., Мороз А.Т. Цинкование. Справочник. Москва : Металлургия, 1988. 528 с.

2. Geduld H. Zinc plating. Teddington, Middlesex, England : Finishing publications, 1988. 360 p.

3. Окулов В.В. Цинкование. Техника и технология. Москва : Глобус, 2008. 252 с.

4. Winand R. Electrodeposition of zinc and zinc alloys // Modern electroplating. Edited by Schlesinger M., Paunovich M. 5th edition. Chapter 10. Hoboken : John Wiley & Sons, 2010. 736 p.

5. Пурин Б.А., Цера В.А., Озола Э.А., Витиня И.А. Комплексные электролиты в гальванотехнике. Рига : Лиесма, 1978. 267 с.

6. Ильин В.А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание. Ленинград : Машиностроение, 1983. 87 с.

7. Chandran M. Electrodeposition of zinc from different solutions – A review // Transactions of the society for advancement of electrochemical science and technology (SAEST). 2006. V. 41. № 2. P. 35–47.

8. Афонин Е.Г. D-Глюконатные электролиты цинкования // Труды XXII Российской межведомственной научно-технической конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления». Калуга : Изд-во «Ноосфера», 2023. С. 351–361.

9. Афонин Е.Г. Перхлоратные электролиты цинкования // Труды XXIII Российской межведомственной научно-технической конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления». Калуга : Изд-во «Ноосфера», 2024. С. 350–354. Электронный журнал: наука, техника, образование. 2024. № СВ2(49). С. 41–46. https://elibrary.ru/CDJHBI.

10. Ван Везер Дж.Р. Фосфор и его соединения. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1962. 687 с.

11. Продан Е.А., Продан Л.И., Ермоленко Н.Ф. Триполифосфаты и их применение. Минск : Наука и техника, 1969. 536 с.

12. Жданов Ю.Ф. Химия и технология полифосфатов. Москва: Химия, 1979. 240 с.

13. Momeni A., Filiaggi M.J. Synthesis and characterization of different chain length sodium polyphosphates // Journal of non-crystalline solids. 2013. V. 382. P. 11–17. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.003.

14. ГОСТ СССР 20291-80. Натрия полифосфат технический. Технические условия. Москва : Гос. комитет СССР по стандартам, 1981.

15. ГОСТ 13493-86. Межгосударственный стандарт. Натрия триполифосфат. Технические условия. Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1999.

16. ГОСТ 31638-2012. Межгосударственный стандарт. Добавки пищевые. Натрия и калия трифосфаты Е451. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2012.

17. ГОСТ 31686-2012. Межгосударственный стандарт. Добавки пищевые. Натрия полифосфат Е452(i). Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014.

18. ГОСТ 33773-2016. Межгосударственный стандарт. Добавки пищевые. Калия полифосфат Е452(ii). Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2016.

19. Gallistru O., Gallera A., Cavalli L. Preparation of sodium tripolyphosphate. U. S. Patent № 4146575. Publ. 1979.

20. Lutz C.W. Preparation of granular sodium tripolyphosphate hexahydrate with low friability. U. S. Patent № 4315898. Publ. 1982.

21. Кесоян Г.А., Доброскокина Н.Д., Никитин А.Б., Лере-Планд П.А. Способ получения триполифосфата калия. Патент РФ № 2036134. Опубл. 1995.

22. Шапкин М.А., Попов В.Л., Зинюк Р.Ю., Буксеев В.В., Мильбергер Т.Г., Орлов Е.П., Зубков В.Я., Павлов К.А. Способ получения гексагидрата триполифосфата натрия. Патент РФ № 2148011. Опубл. 2000.

23. Шапкин М.А., Горбачев Е.В., Кузнецов А.А., Терешенков В.Н., Мильбергер Т.Г., Карпов А.В., Барышников В.Н. Состав комплексообразователя на основе гидратируемого триполифосфата натрия и способ его получения. Патент РФ № 2263632. Опубл. 2005.

24. A kind of preparation method of potassium tripolyphosphate. China Patent № 100358801. Publ. 2008.

25. Власов П.П., Власова Г.И., Арлиевский М.П. Способ получения триполифосфата натрия. Патент РФ № 2375300. Опубл. 2009.

26. Дмитревский Б.А., Шапкин М.А., Горбачев Е.В., Мильбергер Т.Г., Треущенко Н.Н., Ярош Е.Б. Способ получения триполифосфата натрия пищевой квалификации. Патент РФ № 2378192. Опубл. 2010.

27. Corbridge D.E.C. The crystal structure of sodium triphosphate, $Na_5P_3O_{10}$, phase I // Acta crystallographica. 1960. V. 13. № 3. P. 263–269. https://doi.org/10.1107/S0365110X60000583.

28. Davies D.R., Corbridge D.E.C. The crystal structure of sodium triphosphate, $Na_5P_3O_{10}$, phase II // Acta crystallographica. 1958. V. 11. № 5. P. 315–319. https://doi.org/10.1107/S0365110X58000876.

29. Dyroff D.R. The crystal structure of sodium triphosphate hexahydrate. PhD Thesis. California institute of technology, Pasadena, California, USA, 1965. https://doi.org/10.7907/FT3A-YQ66.

30. Wiench D.M., Jansen M., Hoppe R. Kristallstruktur von $Na_5P_3O_{10}·6H_2O$ // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie. 1982. V. 488. № 1. P. 80–86. https://doi.org/10.1102/zaac.19824880110.

31. Moutataouia M., Lamire M., Saadi M., El Ammari L. Dipotassium trisodium triphosphate, $K_2Na_3P_3O_{10}$ // Acta crystallographica. E. 2012. V. 68. № 5. P. i31. https://doi.org/10.1107/S1600536812014894.

32. Averbuch-Pouchot M.T., Durif A. Structure of tetraammonium monosodium triphosphate tetrahydrate // Acta crystallographica. C. 1985. V. 41. № 11. P. 1553–1555. https://doi.org/10.1107/S0108270185008526.

33. Kindler N., Jansen M. Kristallstruktur von $Na_4HP_3O_{10}·H_2O$ // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie. 1997. V. 623. № 1–6. P. 55–58. https://doi.org/10.1002/zaac.19976230109.

34. Ляхов А.С., Палкина К.К., Селевич А.Ф. Кристаллическая структура моногидрата трифосфата аммония $(NH_4)_5P_3O_{10}·H_2O$ // Журнал неорганической химии. 1994. Т. 39. № 9. С. 1438–1442.

35. Andress K.R., Nachtrab R. Über die komplexbildung von natriumtriphosphat mit zweiwertigen metallionen. I. Die bestimmung Me(II)-triphosphatkomplexen // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie. 1961. V. 311. № 1–2. P. 1–12. https://doi.org/10.1002/zaac.19613110102.

36. Andress K.R., Nachtrab R. Über die komplexbildung von natriumtriphosphat mit zweiwertigen metallionen. III. Die komplexbildungsreaktionen zwischen natriumtriphosphat und zweiwertigen metallionen // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie. 1961. V. 311. № 1–2. P. 22–31. https://doi.org/10.1002/zaac.19613110104.

37. Johansson A., Wänninen E. The complexometric analysis of pyro- and triphosphates – I : Stability constants of the proton and metal complexes of the acids // Talanta. 1963. V. 10. № 7. P. 769–777. https://doi.org/10.1016/0039-9140(63)80107-1.

38. Ellison H., Martell A.E. Chelating tendencies of tripolyphosphate ions // Journal of inorganic and nuclear chemistry. 1964. V. 26. № 9. P. 1555–1560. https://doi.org/10.1016/0022-1902(64)80044-0.

39. Anderegg G. Entropiebedingte komplexbildung thermodynamische daten der komplexbildung mit dem tripolyphosphat-ion // Helvetica chimica acta. 1965. V. 48. № 7. P. 1712–1717. https://doi.org/10.1002/hlca.19650480730.

40. Taqui Khan M.M., Rabindra Reddy P. Metal chelates of tripolyphosphate // Journal of inorganic and nuclear chemistry. 1971. V. 33. № 5. P. 1427–1433. https://doi.org/10.1016/0022-1902(71)80438-4.

41. Taqui Khan M.M., Rabindra Reddy P. Thermodynamic quantities associated with the interaction of tripolyphosphoric acid with metal ions // Journal of inorganic and nuclear chemistry. 1973. V. 35. № 1. P. 179–186. https://doi.org/10.1016/0022-1902(73)80623-2.

42. Grzmil B.U., Kic B. Pyro- and tripolyphosphates and citrates as the complexing agents for micronutrients in liquid fertilizers // Industrial and engineering chemistry research. 2002. V. 41. № 2. P. 139–144. https://doi.org/10.1021/ie010223d.

43. Cigala R.M., Crea F., De Stefano C., Lando G., Manfredi G., Sammartano S. Quantitative study on the interaction of Sn^{2+} and Zn^{2+} with some phosphate ligands, in aqueous solution at different ionic strengths // Journal of molecular liquids. 2012. V. 165. P. 143–153. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2011.11.002.

44. Maki H., Tsujito M., Sakurai M., Yamada T., Nariai H., Mizuhata M. Stabilities of the divalent metal ion complexes of a short-chain polyphosphate anion and its imino derivative // Journal of solution chemistry. 2013. V. 42. № 11. P. 2104–2118. https://doi.org/10.1007/s10953-013-0099-2.

45. Averbuch-Pouchot M.T., Durif A. Données cristallographiques sur le tripolyphosphate de zinc heptadécahydraté $Zn_5(P_3O_{10})_2 \cdot 17H_2O$ // Journal of applied crystallography. 1975. V. 8. № 5. P. 564. https://doi.org/10.1107/S0021889875011284.

46. Averbuch-Pouchot M.T., Durif A., Guitel J.C. Structure crystalline du tripolyphosphate de zinc heptadécahydraté: $Zn_5(P_3O_{10})_2 \cdot 17H_2O$ // Acta crystallographica. B. 1975. V. 31. № 10. P. 2482–2486. https://doi.org/10.1107/S0567740875007832.

47. Averbuch-Pouchot M.T., Guitel J.C. Structure crystalline du tripolyphosphate acide de zinc hexahydraté: $Zn_2HP_3O_{10} \cdot 6H_2O$ // Acta crystallographica. B. 1976. V. 32. № 6. P. 1670–1673. https://doi.org/10.1107/S0567740876006213.

48. Averbuch-Pouchot M.T., Guitel J.C. Structure crystalline du tripolyphosphate mixte zinc-sodium nonahydraté $Zn_2NaP_3O_{10} \cdot 9H_2O$ // Acta crystallographica. B. 1977. V. 33. № 5. P. 1427–1431. https://doi.org/10.1107/S0567740877006220.

49. Красников В.В., Константа З.А., Продан Е.А., Галкова Т.Н. Синтез и рентгенографические данные двойного триполифосфата $NH_4Zn_2P_3O_{10} \cdot 7H_2O$ // Известия АН ЛатвССР. Серия химическая. 1980. № 2. С. 239.

50. Константа З.А., Диндуне А.П. Фосфаты двухвалентных металлов. Рига : Зинатне, 1987. 371 с.

51. Ляхов А.С., Люцко В.А., Продан Л.И., Палкина К.К. Кристаллическая структура октагидрата трифосфата литий-цинка $LiZn_2P_3O_{10} \cdot 8H_2O$ // Неорганические материалы. 1991. Т. 27. № 5. С. 1014–1018. https://elibrary.ru/ZISFPN.

52. Ляхов А.С., Люцко В.А., Галкова Т.Н., Палкина К.К. Кристаллическая структура $NH_4Zn_2P_3O_{10} \cdot 7H_2O$ // Журнал неорганической химии. 1991. Т. 36. № 12. С. 3053–3059. https://elibrary.ru/ZICTNR.

53. Ляхов А.С. Кристаллическая структура некоторых орто- и трифосфатов металлов : дисс. … канд. хим. наук. Минск, 1995. 125 с.

54. Rakotomahanina E., Averbuch-Pouchot M.-T., Durif A. Données cristallographiques sur les triphosphates du type $M^{II}Na_3P_3O_{10} \cdot 12H_2O$ pour M^{II} = Ni, Co, Mn, Zn et Cd // Bulletin de la société française minéralogy et de cristallographie. 1972. V. 95. № 4. P. 516–520.

55. Гинцберг С.А., Иванов А.Ф., Погребенский Л.А. Способ электроосаждения цветных металлов, например меди, цинка, бронзы. Авт. свид. № 159082. Опубл. 1963.

56. Галинкер В.С., Сапрыкин А.И. Электроосаждение цинка из триполифосфатного электролита // Украинский химический журнал. 1968. Т. 34. № 5. С. 461–465.

57. Галинкер В.С., Федоренко Г.А., Кудра О.К. Электроосаждение оловянно-цинкового сплава из триполифосфатного электролита // Известия Вузов. Химия и химическая технология. 1969. Т. 12. № 7. С. 928–932.

58. Кудра О.К., Галинкер В.С., Федоренко Г.А. Способ электроосаждения сплава олово–цинк. Авт. свид. СССР № 244060. Опубл. 1969.

59. Галинкер В.С., Федоренко Г.А., Кудра О.К. О влиянии хлористого аммония на электроосаждение сплава олово–цинк из триполифосфатного электролита // Известия Вузов. Химия и химическая технология. 1969. Т. 12. № 10. С. 1454–1456.

60. Галинкер В.С., Савенко П.В., Мацола М.В., Кудра О.К. Способ электролитического осаждения сплава медь–цинк. Авт. свид. СССР № 282879. Опубл. 1970.

61. Галинкер В.С., Мацола М.В., Савенко П.В., Кудра О.К. Исследование условий электроосаждения медноцинкового сплава из триполифосфатного электролита // Защита металлов. 1971. Т. 7. № 2. С. 210–212.

62. Галинкер В.С., Мацола М.В., Савенко П.В., Кудра О.К. Исследование катодной поляризации при электроосаждении медно-цинковых сплавов из триполифосфатных электролитов // Защита металлов. 1972. Т. 8. № 3. С. 350–352.

63. Мацола М.В., Галинкер В.С., Кудра О.К. Влияние некоторых добавок на катодный процесс при электроосаждении сплава медь–цинк из триполифосфатных электролитов // Известия Вузов. Химия и химическая технология. 1972. Т. 15. № 2. С. 264–269.

64. Кудрявцев Н.Т. Электролитические покрытия металлами. Москва : Химия, 1979. 352 с.

65. Харламов В.И., Глазунова Т.И., Смирнов К.Н., Бригаднов А.В., Вакка А.Б., Полещук Е.И., Ваграмян Т.А. Некоторые закономерности электроосаждения металлов и сплавов из полифосфатных электролитов // Физико-химические основы химической технологии. Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева. 1988. Вып. 150. С. 84–88.

66. Ameen T.J., Orloff G.L. Non-cyanide brass plating bath and a method of making metallic foil having a brass layer using the non-cyanide brass plating bath. U. S. Patent № 5762778. Patented 1998.

67. Shen C.Y., Dyroff D.R. Hydrolytic degradation of sodium tripolyphosphate in concentrated solutions and in presence of foreign ions // Industrial and engineering chemistry product research and development. 1966. V. 5. № 2. P. 97–100. https://doi.org/10.1021/i360018a001.

68. Emsley J., Niazi S. Rate of hydrolysis of $Na_4P_2O_7$ and $Na_5P_3O_{10}$ at 100 ºC and the effect of urea // Polyhedron. 1983. V. 2. № 5. P. 375–377. https://doi.org/10.1016/S0277-5387(00)83932-7.

69. Афонин Е.Г., Александров Г.Г. Рентгенографическая идентификация 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфоновой кислоты // Журнал общей химии. 2003. Т. 73. № 3. С. 367–369. https://elibrary.ru/OYTHUZ.

Информация об авторе

Е. Г. Афонин – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств.

REFERENCES

1. Proskurkin, E.V., Popovich, V.A., Moroz, A.T. (1988). Zinc plating. Reference book. Moscow: Metallurgy publ. 528 p. (In Russ.).

2. Geduld, H. (1988). Zinc plating. Teddington, Middlesex, England : Finishing publications. 360 p.

3. Okulov, V.V. (2008). Zinc plating. Technics and technology. Moscow: Globe publ. 252 p. (In Russ.).

4. Winand, R. (2010). Electrodeposition of zinc and zinc alloys // Modern electroplating. Edited by Schlesinger M., Paunovich M. 5th edition. Chapter 10. Hoboken: John Wiley & Sons. 736 p.

5. Purin, B.A., Tsera, V.A., Ozola, E.A., Vitinya, I.A. (1978). Complex electrolytes in galvanotechnics. Riga: Liesma. 265 p. (In Russ.).

6. Ilin, V.A. (1983). Zinc, cadmium, tin, and lead plating. Leningrad: Mechanical engineering publ. 87 p. (In Russ.).

7. Chandran, M. (2006). Electrodeposition of zinc from different solutions - A review // Transactions of the society for advancement of electrochemical science and technology (SAEST), 41(2), 35-47.

8. Afonin, E.G. (2023). D-Gluconate electrolytes for zinc plating // Proceedings of the 22th Russian interdepartmental scientific and technical conference «New information technologies in communication and control systems». Kaluga, Noosfera publ. 351-361. (In Russ.).

9. Afonin, E.G. (2024). Perchlorate electrolytes for zinc plating // Proceedings of the 23th Russian interdepartmental scientific and technical conference «New information technologies in communication and control systems». Kalu-

ga, Noosfera publ. 350-354. (In Russ.). Electronic journal: Science, technology and education. 2024.№ CB2(49), 41-46. (In Russ.). https://elibrary.ru/CDJHBI.

10. Van Wazer, J.R. (1958). Phosphorus and its compounds. Vol. I: Chemistry. New York: Interscience publicshers, 2046 p.

11. Prodan, E.A., Prodan, L.I., Ermolenko, N.F. (1969). Tripolyphosphates and its application. Minsk: Science and technics. 536 p. (In Russ.).

12. Zhdanov, Yu.F. (1979). Chemistry and technology of polyphosphates. Moscow: Chemistry publ. 240 p. (In Russ.).

13. Momeni, A., Filiaggi, M.J. (2013). Synthesis and characterization of different chain length sodium polyphosphates // Journal of non-crystalline solids, 382, 1-17. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.003.

14. GOST 20291-80. USSR. Sodium polyphosphate technical grade. Specifications. Moscow: USSR state committee on standards, 1981. (In Russ.).

15. GOST 13493-86. Interstate standard. Sodium tripolyphosphate. Specifications. Moscow: IPK Publishing standards, 1999. (In Russ.).

16. GOST 31638-2012. Interstate standard. Food additives. Sodium and potassium triphosphates E451. Specifications. Moscow: Standardinform publ., 2012. (In Russ.).

17. GOST 31686-2012. Interstate standard. Food additives. Sodium polyphosphate E452(i). General Specifications. Moscow: Standardinform publ., 2014. (In Russ.).

18. GOST 33773-2016. Interstate standard. Food additives. Potassium polyphosphate E452(ii). Specifications. Moscow: Standardinform publ., 2016. (In Russ.).

19. Gallistru, O., Gallera, A., Cavalli, L. Preparation of sodium tripolyphosphate. U. S. Patent № 4146575. Publ. 1979.

20. Lutz, C.W. Preparation of granular sodium tripolyphosphate hexahydrate with low friability. U. S. Patent № 4315898. Publ. 1982.

21. Kesoyan, G.A., Dobroskokina, N.D., Nikitin, A.B., Lere-Pland, P.A. Method of producing potassium tripolyphosphate. R. F. Patent № 2036134. Publ. 1995. (In Russ.).

22. Shapkin, M.A., Popov, V.L., Zinyuk, R.Yu., Bukseev, V.V., Milberger, T.G., Orlov, E.P., Zubkov, B.Ya., Pavlov, K.A. Method of producing sodium tripolyphosphate hexahydrate. R. F. Patent № 2148011. Publ. 2000. (In Russ.).

23. Shapkin, M.A., Gorbachev, E.V., Kuznetsov, A.A., Tereshenkov, V.N., Milberger, T.G., Karpov, A.V., Baryshnikov, V.N. Composition of complex-forming agent on base of hydratable sodium tripolyphosphate and method of production of such composition. R. F. Patent № 2263632. Publ. 2005. (In Russ.).

24. A kind of preparation method of potassium tripolyphosphate. China Patent № 100358801. Publ. 2008.

25. Vlasov, P.P., Vlasova, G.I., Arlievskij, M.P. Method of producing sodium tripolyphosphate. R. F. Patent № 2375300. Publ. 2009. (In Russ.).

26. Dmitrevskij, B.A., Shapkin, M.A., Gorbachev, E.V., Milberger, T.G., Treushchenko, N.N., Jarosh, E.B. Method of producing food grade sodium tripolyphosphate. R. F. Patent № 2378192. Publ. 2010. (In Russ.).

27. Corbridge, D.E.C. (1960). The crystal structure of sodium triphosphate, $Na_5P_3O_{10}$, phase I // Acta crystallographica, 13(3), 263-269. https://doi.org/10.1107/S0365110X60000583.

28. Davies, D.R., Corbridge, D.E.C. (1958). The crystal structure of sodium triphosphate, $Na_5P_3O_{10}$, phase II // Acta crystallographica, 11(5), 315-319. https://doi.org/10.1107/S0365110X58000876.

29. Dyroff, D.R. (1965). The crystal structure of sodium triphosphate hexahydrate. PhD Thesis. California institute of technology, Pasadena, California, USA. https://doi.org/10.7907/FT3A-YQ66.

30. Wiench, D.M., Jansen, M., Hoppe, R. (1982). Kristallstruktur von $Na_5P_3O_{10}·6H_2O$ // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, 488(1), 80-86. https://doi.org/10.1102/zaac.19824880110.

31. Moutataouia, M., Lamire, M., Saadi, M., El Ammari, L. (2012). Dipotassium trisodium triphosphate, $K_2Na_3P_3O_{10}$ // Acta crystallographica. E, 68(5), i31. https://doi.org/10.1107/S1600536812014894.

32. Averbuch-Pouchot, M.T., Durif, A. (1985).Structure of tetraammonium monosodium triphosphate tetrahydrate // Acta crystallographica. C, 41(11), 1553-1555. https://doi.org/10.1107/S01080270185008526.

33. Kindler, N., Jansen, M. (1997). Kristallstruktur von $Na_4HP_3O_{10}·H_2O$ // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, 623(1-6), 55-58. https://doi.org/10.1002/zaac.19976230109.

34. Lyakhov, A.S., Palkina, K.K., Selevich, A.F. (1994). Crystal structure of ammonium triphosphate monohydrate $(NH_4)_5P_3O_{10}·H_2O$ // Journal of inorganic chemistry, 39(9), 1438-1442. (In Russ.).

35. Andress, K.R., Nachtrab, R. (1961). Über die komplexbildung von natriumtriphosphat mit zweiwertigen metallionen. I. Die bestimmung Me(II)-triphosphatkomplexen // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, 311(1-2), 1-12. https://doi.org/10.1002/zaac.19613110102.

36. Andress, K.R., Nachtrab, R. (1961). Über die komplexbildung von natriumtriphosphat mit zweiwertigen metallionen. III. Die komplexbildungsreaktionen zwischen natriumtriphosphat und zweiwertigen metallionen // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie. 311 (1-2), 22-31. https://doi.org/10.1002/zaac.19613110104.

37. Johansson, A., Wänninen, E. (1963). The complexometric analysis of pyro- and triphosphates - I:Stability constants of the proton and metal complexes of the acids // Talanta, 10(7), 769-777. https://doi.org/10.1016/0039-9140(63)80107-1.

38. Ellison, H., Martell, A.E. (1964). Chelating tendencies of tripolyphosphate ions // Journal of inorganic and nuclear chemistry, 26(9), 1555-1560. https://doi.org/10.1016/0022-1902(64)80044-0.

39. Anderegg, G. (1965). Entropiebedingte komplexbildung thermodynamische daten der komplexbildung mit dem tripolyphosphat-ion // Helvetica chimica acta, 48(7), 1712-1717. https://doi.org/10.1002/hlca.19650480730.

40. Taqui Khan, M.M., Rabindra Reddy, P. (1971). Metal chelates of tripolyphosphate // Journal of inorganic and nuclear chemistry, 33(5), 1427-1433. https://doi.org/10.1016/0022-1902(71)80438-4.

41. Taqui Khan, M.M., Rabindra Reddy, P. (1973). Thermodynamic quantities associated with the interaction of tripolyphosphoric acid with metal ions // Journal of inorganic and nuclear chemistry, 35(1), 179-186. https://doi.org/10.1016/0022-1902(73)80623-2.

42. Grzmil, B.U., Kic, B. (2002). Pyro- and tripolyphosphates and citrates as the complexing agents for micronutrients in liquid fertilizers // Industrial and engineering chemistry research, 41(2), 139-144. https://doi.org/10.1021/ ie010223d.

43. Cigala, R.M., Crea, F., De Stefano, C., Lando, G., Manfredi, G., Sammartano, S. (2012). Quantitative study on the interaction of Sn^{2+} and Zn^{2+} with some phosphate ligands, in aqueous solution at different ionic strengths // Journal of molecular liquids, 165, 143-153. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2011.11.002.

44. Maki, H., Tsujito, M., Sakurai, M., Yamada, T., Nariai, H., Mizuhata, M. (2013). Stabilities of the divalent metal ion complexes of a short-chain polyphosphate anion and its imino derivative // Journal of solution chemistry, 42(11), 2104-2118. https://doi.org/10.1007/s10953-013-0099-2.

45. Averbuch-Pouchot, M.T., Durif, A. (1975). Données cristallographiques sur le tripolyphosphate de zinc heptadécahydraté $Zn_5(P_3O_{10})_2·17H_2O$ // Journal of applied crystallography, 8(5), 564. https://doi.org/10.1107/S0021889875011284.

46. Averbuch-Pouchot, M.T., Durif, A., Guitel, J.C. (1975). Structure crystalline du tripolyphosphate de zinc

heptadécahydraté: $Zn_5(P_3O_{10})_2 \cdot 17H_2O$ // Acta crystallographica. B, 31(10), 2482-2486. https://doi.org/10.1107/S0567740875007832.

47. Averbuch-Pouchot, M.T., Guitel, J.C. (1976). Structure crystalline du tripolyphosphate acide de zinc hexahydraté: $Zn_2HP_3O_{10} \cdot 6H_2O$ // Acta crystallographica. B, 32(6), 1670-1673. https://doi.org/10.1107/S0567740876006213.

48. Averbuch-Pouchot, M.T., Guitel, J.C. (1977). Structure crystalline du tripolyphosphate mixte zinc-sodium nonahydraté $Zn_2NaP_3O_{10} \cdot 9H_2O$ // Acta crystallographica. B, 33(5), 1427-1431. https://doi.org/10.1107/S0567740877006220.

49. Krasnikov, V.V., Konstant, Z.A., Prodan, E.A., Galkova, T.N. (1980). Synthesis and x-ray research data of double tripolyphosphate $NH_4Zn_2P_3O_{10} \cdot 7H_2O$ // Bulletin of the Latvia SSR academy of sciences. Chemistry, (2), 239. (In Russ.).

50. Konstant, Z.A., Dindune, A.P. (1987). Phosphates of divalent metals. Riga: Zinatne publ. 371 p. (In Russ.).

51. Lyakhov, A.S., Lyutsko, V.A., Prodan, L.I., Palkina, K.K. (1991). Crystal structure of lithium zinc triphosphate octahydrate $LiZn_2P_3O_{10} \cdot 8H_2O$ // Inorganic materials, 27(5), 845-849. https://elibrary.ru/ZISFPN.

52. Lyakhov, A.S., Lyutsko, V.A., Galkova, T.N., Palkina, K.K. (1991). Crystal structure of $NH_4Zn_2P_3O_{10} \cdot 7H_2O$ // Journal of inorganic chemistry, 36(12), 3053-3059. (In Russ.). https://elibrary.ru/ZICTNR.

53. Lyakhov, A.S. Crystal structure of some metals ortho- and triphosphates. Candidate of chemical sciences thesis. Minsk, 1995. 125 p. (In Russ.).

54. Rakotomahanina, E., Averbuch-Pouchot, M.-T., Durif, A. (1972). Données cristallographiques sur les triphosphates du type $M^{II}Na_3P_3O_{10} \cdot 12H_2O$ pour M^{II} = Ni, Co, Mn, Zn et Cd // Bulletin de la société française minéralogy et de cristallographie, 95(4), 516-520.

55. Gintsberg S.A., Ivanov A.F., Pogrebenskiy L.A. Method for electrodeposition of non-ferrous metals such as copper, bronze. USSR author's certificate № 159082. Published 1963. (In Russ.).

56. Galinker, V.S., Saprykin, A.I. (1968). Electrodeposition of zinc from a tripolyphosphate electrolyte // Ukrainian chemistry journal, 34(5), 461-465. (In Russ.).

57. Galinker, V.S., Fedorenko, G.A., Kudra, O.K. (1969). Electrodeposition of tin-zinc alloy from tripolyphosphate electrolyte // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya, 12(7), 928-932. (In Russ.).

58. Kudra, O.K., Galinker, V.S., Fedorenko, G.A. Method of electrodeposition tin-zinc alloy. USSR author's certificate № 244060. Published 1969. (In Russ.).

59. Galinker, V.S., Fedorenko, G.A., Kudra, O.K. (1969). Influence of ammonium chloride on electrodeposition of tin-zinc alloy from a tripolyphosphate electrolyte // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya, 12(10), 1454-1456. (In Russ.).

60. Galinker, V.S., Savenko, P.V., Matsola, M.V., Kudra, O.K. Method of electrodeposition copper-zinc alloy. USSR author's certificate № 282879. Published 1970. (In Russ.).

61. Galinker, V.S., Matsola, M.V., Savenko, P.V., Kudra, O.K. (1971). Investigation of the conditions for the electrodeposition of copper-zinc alloy from a tripolyphosphate electrolyte // Protection of metals, 7(2), 210-212. (In Russ.).

62. Galinker, V.S., Matsola, M.V., Savenko, P.V., Kudra, O.K. (1972). Cathode polarization study on electrodeposition of copper-zinc alloy from tripolyphosphate electrolytes // Protection of metals, 8(3), 350-352.

63. Matsola, M.V., Galinker, V.S., Kudra, O.K. (1972). Influence of some additives on cathode process of copper-zinc electrodeposition from tripolyphosphate electrolytes // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya, 15(2); 264-269. (In Russ.).

64. Kudryavtsev, N.T. (1979). Electrochemical metal coatings. Moscow: Chemistry publ. 352 p. (In Russ.).

65. Kharlamov, V.I., Glazunova, T.I., Smirnov, K.N., Brigadnov, A.V., Vakka, A.B., Poleshchuk, E.I., Vagramyan, T.A. (1988). Some patterns of metals and alloys electrodeposition from polyphosphate electrolytes // Physicochemical foundations of chemical technology. Proceedings of Mendeleev Moscow chemical technology institute, 150, 84-88. (In Russ.).

66. Ameen, T.J., Orloff, G.L. Non-cyanide brass plating bath and a method of making metallic foil having a brass layer using the non-cyanide brass plating bath. U. S. Patent № 5762778. Patented 1998.

67. Shen, C.Y., Dyroff, D.R. (1966). Hydrolytic degradation of sodium tripolyphosphate in concentrated solutions and in presence of foreign ions // Industrial and engineering chemistry product research and development, 5(2), 97-100. https://doi.org/10.1021/i360018a001.

68. Emsley, J., Niazi, S. (1983). Rate of hydrolysis of $Na_4P_2O_7$ and $Na_5P_3O_{10}$ at 100 ºC and the effect of urea // Polyhedron, 2(5), 375-377. https://doi.org/10.1016/S0277-5387(00)83932-7.

69. Afonin, E.G., Aleksandrov, G.G. (2003). X-Ray identification of 1-hydroxyethane-1,1-diphosphonic acid // Russian journal of general chemistry, 73(3), 340-343. https://doi.org/10.1023/A:1024989332249.

Information about the author

E.G. Afonin - candidate of chemical sciences, senior researcher, Kaluga research institute of telemechanical devices.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 195–198.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 195–198.

Научная статья
2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
УДК621.922.02
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.027 EDN: GATQLZ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА

Александр Леонидович Верещагин [1], Николай Сергеевич Алексеев [2]

[1]Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия
[2] Рубцовский индустриальный институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Рубцовск, Россия

[1] val@bti.secna.ru, https://orcid.org/0009-0002-6061-7064
[2] nikolay.alekseev.56@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8950-8229

Аннотация. *К высокоэффективным технологиям восстановления и упрочнения изношенных деталей машин относятся различные способы нанесения износостойких микропористых покрытий на никелевой основе. Высокая адгезионно-химическая активность и низкая теплопроводность этих покрытий создают трудности при их обработке шлифованием. Данные трудности обусловлены повышенным износом абразивного инструмента и интенсивным засаливанием его рабочей поверхности, что приводит к снижению производительности обработки и качества шлифованной поверхности (прижоги, огранка, трещины).*

В статье выражен взгляд авторов на проблему абразивной обработки микропористых покрытий восстановленных деталей. Рассмотрены возможности методов физико-химического анализа, а также возможности применения метода равновесной термодинамики для исследования процесса шлифования этих покрытий. Показана правомерность применения термодинамического подхода. Изложена методика выбора абразивных материалов на основе расчётных методов термодинамики. Авторы допускают, что при обработке металлов абразивным инструментом могут иметь место твердофазные процессы химической природы. В связи с этим в статье приводятся необходимые условия для протекания твердофазных реакций и, в частности, реакционная способность различных абразивных материалов и химическая совместимость. Использование установленных закономерностей позволит наметить пути уменьшения износа абразивов за счет снижения активности их взаимодействия с микропористыми покрытиями.

Ключевые слова: *микропористые покрытия, абразивная обработка, термодинамический подход, твердофазные реакции, реакционная способность, химическое сродство, механохимические процессы, самораспространяющийся высокотемпературный синтез.*

Для цитирования: Верещагин А. Л., Алексеев Н. С. Термодинамический подход к выбору абразивного материала // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 195–198. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.027. EDN: https://elibrary.ru/GATQLZ.

Original article

THERMODYNAMIC APPROACH TO CHOICE OF ABRASIVE MATERIAL

Alexander L. Vereshchagin [1], Nikolay S. Alekseev [2]

[1] Biysk Institute of Technology (branch) of Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia
[2] Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University, Rubtsovsk, Russia

[1] val@bti.secna.ru, https://orcid.org/0009-0002-6061-7064
[2] nikolay.alekseev.56@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-8950-8229

Abstract. *Highly efficient technologies for restoring and strengthening worn machine parts include various methods of applying wear-resistant microporous nickel-based coatings. The high adhesive - chemical activity and low thermal conductivity of these coatings create difficulties when they are processed by grinding. These difficulties are caused by increased wear of the abrasive tool and intensive salting of its working surface, which leads to a decrease in processing performance and the quality of the polished surface (cauterization, faceting, cracks). The article expresses the authors' view on the problem of abrasive treatment of microporous coatings of restored parts. The possibilities of methods of physico-chemical analysis, as well as the possibility of using the method of equilibrium thermodynamics to study the grinding process of these coatings are considered. The validity of the thermodynamic approach is shown. The method of selecting abrasive materials based on computational thermodynamic methods is described. The authors admit that when processing metals with an abrasive tool, solid-phase processes of a chemical nature may occur. In this*

© Верещагин А. Л., Алексеев Н. С., 2026

regard, the article provides the necessary conditions for the course of solid-phase reactions and, in particular, the reactivity of various abrasive materials and chemical compatibility. The use of established patterns will make it possible to identify ways to reduce the wear of abrasives by reducing the activity of their interaction with microporous coatings.

Keywords: *microporous coatings, abrasive treatment, thermodynamic approach, solid-phase reactions, reactivity, chemical affinity, mechanochemical processes, self-propagating high-temperature synthesis.*

For citation: Vereshchagin, A. L. & Alekseev, N. S. (2026). Thermodynamic approach to choice of abrasive material. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 195-198. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.027. EDN: https: //elibrary.ru/GATQLZ.

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление изношенных деталей тракторов, автомобилей, сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники имеет большое народнохозяйственное значение, так как оно позволяет существенно экономить металл и трудовые затраты [1].

Одним из наиболее эффективных методов восстановления деталей является газотермическое напыление микропористых покрытий на никелевой основе (далее просто покрытий). Основным методом размерной обработки данных покрытий является шлифование.

Однако специфические свойства этих покрытий (высокая пористость, наличие оксидов и шлаков, пониженная теплопроводность и др.) создают трудности при их шлифовании из-за повышенного износа абразивных кругов и их интенсивного засаливания.

Известно [2], что износ абразивных зёрен проявляется в виде раскалывания и истирания. Но если износ в виде раскалывания весьма желателен (самозатачивание), то износ в виде истирания приводит к росту сил резания и интенсивному засаливанию кругов, вследствие чего на зёрнах формируются адгезионные налипы.

Истирание зёрен происходит под воздействием трёх нагрузок [2]: импульсных силовых ударов, импульсных тепловых ударов и термохимического взаимодействия абразивных зёрен и заготовки. Величины первых двух нагрузок в основном зависят от режимов резания, а величина третьей – термохимическое взаимодействие – прежде всего от материала абразива.

Интенсивное термохимическое взаимодействие в контакте абразив–покрытие происходит под влиянием следующих причин: **во-первых,** имеется химическое сродство покрытий к абразивному материалу; **во-вторых,** возникают высокие локальные температуры и давления. В результате создаются благоприятные условия для протекания химических реакций.

Процесс шлифования покрытий можно усовершенствовать путём подбора абразивов, снижающих термохимическое взаимодействие в контакте абразив–покрытие. Однако до настоящего времени не существует научно обоснованных рекомендаций по выбору абразивных материалов для шлифования покрытий.

Поэтому **целью** настоящей работы является обоснование подхода к выбору абразивного материала кругов при шлифовании покрытий.

Прежде всего, рассмотрим возможности различных методов анализа применительно к процессам обработки металлов резанием.

Возможности методов физико-химического анализа для исследования процесса шлифования микропористых покрытий

Механическая обработка металлов резанием – это теплофизический процесс. Источником тепла здесь является работа, затрачиваемая на деформацию металла и на преодоление силы трения. При шлифовании металлов протекают следующие физико-химические явления:

- абразивные зёрна подвергаются интенсивному воздействию высоких контактных давлений и температур;
- стружка и контактные поверхности нагреваются в диапазоне 500...1000 ºС;
- протекают интенсивные физико-химические процессы в виде адгезии, диффузии, окисления и т.д;
- наличие гетерофазных систем, так как реагенты и продукты образуют самостоятельные фазы.

Apriori можно допустить, что при металлообработке абразивным инструментом в паре абразив–обрабатываемый материал, кроме различных видов механических воздействий, могут иметь место и такие твердофазные процессы химической природы, как механохимические и самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), в весьма специфических неравновесных температурно-временных режимах.

Механохимические процессы обусловлены переходом вещества в метастабильное химически активное состояние, а также интенсификацией массопереноса в результате поглощения механической энергии [3].

Отмечают также влияние механических напряжений на реакционную способность металлов – так металлы в напряженном состоянии в большей степени подвергаются процессам коррозии [4].

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез

В ряде случаев, когда взаимодействие между абразивным элементом и обрабатываемым металлом термодинамически предпочтительно, то возможно и протекание реакции между ними в самоподдерживающем режиме – режиме СВС [5] и даже в случае металлов [6]. Так, например, взаимодействуют металлы в паре медь–алюминий или никель–алюминий.

К СВС-процессам, например, можно отнести реакцию карбидообразования при обработке железоуглеродистых сплавов алмазным инструментом [7].

Необходимыми условиями для эффективного взаимодействия абразива с обрабатываемым материалом являются наличие поверхности контакта и экзотермичность (отрицательное значение энтальпии и изобарно-изотермического потенциала). Примером могут служить и реакции синтеза с образованием нитридных, карбидных или интерметаллидных фаз и реакции взаимодействия разлагающихся соединений с элементами матрицы [8].

Первопричиной перечисленных выше процессов является химическое сродство материалов, которое в какой-то мере усиливается при механическом напряжении, но реальны только разрешенные реакции с позиций термодинамики. Возможность протекания таких реакций будет возрастать по мере увеличения площади контакта между абразивным элементом и обрабатываемым материалом.

Одной из характерных особенностей твердофазных реакций в случае металлообработки является небольшой размер реакционной зоны, что

осложняет применение традиционных методов физико-химического анализа для исследования процесса. При этом следует обратить внимание и на то обстоятельство, что массовая доля абразивного материала в стружке составляет доли процента. Это не позволяет применить стандартные методы физико-химического анализа (рентгенофазовый, эмиссионный спектральный, рентгенофотоэлектронную спектроскопию) для исследования фазового и химического состава продуктов взаимодействия абразивного материала с обрабатываемым металлом, порог чувствительности которых составляет не менее 5 %.

Можно также определять температуру в точке контакта абразива и обрабатываемого металла по спектру излучения. Дополнительным фактором является скорость резания, которая определяет температуру в зоне контакта и давление под влиянием механической нагрузки. Осложняет предсказание состава продуктов взаимодействия и кинетические факторы, обуславливающие скорость превращения за счет диффузии и взаимодействие с атмосферой (в том числе окисление, образование нитридов и т.д.) [9, 10].

Поэтому применение методов физико-химического анализа для выбора абразивного материала кругов при шлифовании покрытий можно считать нецелесообразным.

Возможности применения метода равновесной термодинамики к процессу шлифования микропористых покрытий

Предсказуемость термодинамических расчетов твердофазных реакций осложняется гетерофазностью системы, так как реагенты и продукты образуют самостоятельные фазы, состоящие из очень большого числа структурно упорядоченных частиц. Любая твердофазная реакция совершается в виде существенно большего набора промежуточных состояний, энергетически мало отличающихся одно от другого [9].

Соответственно энтальпия реакции очень мала по сравнению с изменением энтальпии реакций, в которых хотя бы один из реагентов или продуктов не является твердой фазой.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что чисто твердофазное взаимодействие сопровождается и малым изменением энтропии. Этого следовало ожидать, учитывая высокую степень порядка в твердых фазах реагентов и продуктов по сравнению с газо- и жидкофазными.

Особенности твердофазных реакций. Реакционная способность

Согласно принципу Хедвалана, большей реакционной способностью обладает фаза в момент образования или фазового перехода [9, 10]. С учетом этого положения можно оценить химическое сродство основных абразивных материалов к обрабатываемым металлам (табл. 1).

Таблица 1 – Химическая совместимость абразивных неметаллических материалов с металлами [11]
Table 1 – Chemical compatibility of abrasive non-metallicmaterials with metals [11]

Абразивный материал	Имеет сродство
Алмаз	к карбидообразующим металлам (IV–VII побочных подгрупп Периодической системы и подгруппа железа)
Кубический нитрид бора	к образующим тугоплавкие бориды металлам IV–VII побочных подгрупп Периодической системы
Корунд	к металлам, образующим тугоплавкие оксиды (IV–VII побочных подгрупп Периодической системы) с температурой плавления выше температуры плавления корунда 2050 ºС
Карбид кремния	к силицид образующим металлам: большинству d-элементов (кроме Ag, Au, Zn, Cd, Hg) и всех f-элементов; p-*металлы силициды* не *образуют*. и к карбидообразующим металлам (IV-VII побочных подгрупп Периодической системы и подгруппа железа) с температурой плавления выше температуры плавления карбида кремния 2730 ºС
Нитрид кремния	к силицид образующим металлам: большинству d-элементов (кроме Ag, Au, Zn, Cd, Hg) и всех f-элементов; p-*металлы силициды* не *образуют*. с температурой плавления выше температуры плавления нитрида кремния 1900 ºС
Карбид бора	к металлам, образующим тугоплавкие карбиды и бориды с температурой плавления выше температуры плавления карбида бора 2350 ºС в неокислительной среде

Исследованиями [12] была доказана возможность протекания диффузионных процессов в зоне контакта режущего инструмента с обрабатываемым металлом. Протекание указанных процессов в зоне контакта абразива и шлифуемого материала возможно лишь при наличии химического сродства между ними. Чем больше химическое сродство, тем интенсивнее протекают диффузионные процессы.

Химическая совместимость

Необходимо также принимать во внимание и состав газовой атмосферы: нейтральная (аргон, СОЖ, вакуум), восстановительная (водород) или окислительная (воздух), что также окажет влияние на термостойкость режущего инструмента. В таблице 2 представлена термохимическая оценка окисляемости абразивных материалов.

Таблица 2 – Термохимическая оценка окисления абразивных керамических материалов кислородом воздуха
Table 2 – Thermochemical assessment of the oxidation of abrasive ceramic materials by atmospheric oxygen

Абразивный материал	Термохимическое уравнение реакции окисления	$\Delta_r H^{298}$, кДж	$\Delta_r G^{298}$, кДж/моль
Алмаз	$C_{(алм)} + O_2(г) = CO_2(г)$	-395,7 кДж/моль или -8,95 кДж/г	-397,21
Кубический нитрид бора	$2BN(куб) + 1{,}5O_2(г) = B_2O_3(т) + N_2(г)$	-1006,1 кДж/моль или -10,27 кДж/г	-984,97
Корунд	$Al_2O_3(т) + O_2(г) \neq$	Не окисляется	
Карбид кремния	$SiC(т,куб) + 2O_2(г) = SiO_2(т) + CO_2(г)$	-1234,2 кДж/моль или -11,87 кДж/г	-1182,29
Нитрид кремния	$Si_3N_4(т) + 3O_2(г) = 3SiO_2(т) + 2N_2(г)$	-1960,47 кДж/моль или - 8,30 кДж/г	-1904,43
Карбид бора	$B_4C(т) + 4O_2(г) = 2B_2O_3(т) + CO_2(г)$	-2876,83 кДж/моль или -15,70 кДж/г	-2720,21

Во всех рассмотренных случаях имеют место экзотермические реакции с высоким удельным тепловыделением и отрицательным изобарно-изотермическим потенциалом, что может приводить к повышенному износу абразивного инструмента за счет реакции окисления за исключением чистого корунда.

Возможность применения расчетных методов классической равновесной термодинамики к процессу резания металлов ограничивается высокими положительными и отрицательными градиентами температуры, зависящими от режимов резания металла, т.е. неравновесностью процесса. Это вносит неопределенность в возможность проведения расчетов методами классической равновесной термодинамики.

Таким образом, на основании приведённых данных процесс резания металла при механической обработке следует отнести к закрытым термодинамическим системам, и наилучшим вариантом их рассмотрения является метод неравновесной термодинамики [13], применение которого весьма проблематично из-за отсутствия необходимых данных.

Пример выбора абразивных материалов

С экономической точки зрения выбор абразивных материалов целесообразно производить из наиболее дешёвых абразивов – корундов (**Al_2O_3**) и карбидов кремния (**SiC**).

Для выбора абразивных материалов для контактов Ni/SiC и Ni/Al_2O_3 в условиях высокотемпературной эксплуатации и для изучения закономерностей протекания твёрдофазных реакций никеля с карбидом кремния и оксидом алюминия и связанных с ними изменений фазового состава структуры воспользуемся методикой, предложенной в работе [14].

Применение данной методики ограничивается следующими допущениями и предположениями:

- взаимной растворимостью и диапазоном гомогенности фаз можно пренебречь;
- сублимация и жидкие фазы в системе отсутствуют;
- тройные соединения в системе отсутствуют;
- реакции, в продуктах которых более двух веществ, исключаются из анализа как маловероятные.

Анализ литературных данных [15, 16] подтверждает правомерность применения этих предположений для тройных систем «никель–кремний–углерод» и «никель–алюминий–кислород» в диапазоне температур формирования и эксплуатации контактов (300…1300 К).

ВЫВОДЫ

1. На основании вышеизложенного можно считать целесообразным использование термодинамического подхода для выбора абразивного материала кругов при шлифовании покрытий.

2. Применение термодинамического метода для предсказания взаимодействия абразивного материала с обрабатываемым металлом представляет весьма сложную задачу и требует использования предварительных допущений в расчетах и одинаковых условий температурно-временных режимов обработки нанесенных покрытий.

3. Для проведения термодинамических расчетов процесса резания в системе абразив–обрабатываемый материал система рассматривается закрытой, и соответствующие расчеты производятся до температуры 1300 К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноиванов В.И. Организация и технология восстановления деталей машин. 2-е изд., доп. и перераб. / В.И. Черноиванов, В.П. Лялякин. М. : ГОСНИТИ, 2003. 488 с.

2. Корчак С.Н. Виды разрушения абразивных зерен при шлифовании и методы их определения / С.Н. Корчак, А.А. Кошин, В.И. Клочко, П.П. Переверзев // Абразивные инструменты с полимерными и керамическими связующими: процессы получения и применение. Свердловск : Академия наук СССР, Уральский научный центр, 1982. С. 34–44.

3. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Новосибирск : Наука, 1986. 306 с.

4. Ангал Р. Коррозия и защита от коррозии : учеб. пособие / Р. Ангал ; перевод с английского А.Д. Калашникова. 2-е изд. Долгопрудный : Интеллект, 2014. 343 с.

5. Мержанов, А.Г. Процессы горения и взрыва в физико-химии и технологии неорганических материалов / А.Г. Мержанов // Успехи химии. 2003. Т. 72, № 4. С. 323–345.

6. Итин В.И. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. Томск : ТГУ, 1989. 209 с.

7. Ухина А.В. Структурно-морфологические особенности формирования металл-алмазных композиций : автореф. дис. … к.х.н : 02.00.21 / Ухина Арина Викторовна. Новосибирск, 2019. 22 с.

8. Федоров С.В., Марков А.Б., Веснин В.С. Инновационное оборудование для формирования износостойких поверхностных сплавов на обрабатывающем инструменте: научные аспекты и коммерциализация // Инновации, 2015, № 8 (202). С. 72–75.

9. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции / Ю.Д. Третьяков. М. : Химия, 1978. 360 с.

10. Вест А. Химия твердого тела: Теория и приложения / А. Вест. Т. 1. М. : Мир, 1988. 556 с.

11. Справочник конструктора-инструментальщика / под ред. В.А. Гречишникова и С.В. Кирсанова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2006. 542 с.

12. Лоладзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. М. : Машиностроение, 1967. 112 с.

13. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Термодинамический анализ адаптации поверхностей трения при резании металлов // Вестник Уфимского гос. авиац.техн. университета, т. 12, №. 4, 2009, С. 20–23.

14. Агеев О.А. Термодинамический анализ твердофазных взаимодействий в контактах Ni/SiC // Известия вузов. Электроника, № 2, 2005. С. 42–48.

15. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. М. : Металлургия, 1976. 560 с.

16. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Термодинамические расчёты в металлургии. М. : Металлургия, 1993. 304 с.

Информация об авторах

А. Л. Верещагин – д.х.н., профессор, профессор кафедры «Химической технологии энергонасыщенных материалов и изделий» ФГБОУ ВО «Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ».

Н. С. Алексеев – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Техника и технологии машиностроения и пищевых производств» ФГБОУ ВО «Рубцовский индустриальный институт (филиал) АлтГТУ».

Information about the authors

A.L. Vereshchagin - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of Chemical Technology of Energy-Saturated Materials and Products, Biysk Technological Institute (branch), Polzunov Altai State Technical University.

N.S. Alekseev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering and Technology of Mechanical Engineering and Food Production, Rubtsovsky Industrial Institute, Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 199–205.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 199–205.

Научная статья
2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 66.017-577.114
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.028 EDN: HRFWPH

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИКАТОРОВ С КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ГЕТЕРОЦИКЛАМИ НА СТАБИЛЬНОСТЬ СВОЙСТВ И СОРБЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ НАБУХАЮЩИХ РЕЗИН

Абдиракым Муратулы Накып [1], Елена Николаевна Черезова [2], Юлия Сергеевна Карасева [3]

[1, 2, 3] Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия
[1] abdirakym1994@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7189-9928
[2] cherezova59@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6743-1097
[3] karaseva_j@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6531-4252

Аннотация. *Работа направлена на выявление влияния пластификаторов с кислородсодержащими гетероциклами на стабильность физико-механических свойств и набухающую способность высоконаполненных резин на основе бутадиен-нитрильного каучука. В качестве набухающего наполнителя использован промышленный продукт – натрий карбоксиметилцеллюлоза (NaKMЦ) с размером частиц 0,5÷1 мм в количестве 150 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. В качестве пластификаторов использованы соединения с кислородсодержащими гетероциклами, различающимися по реакционной способности, Оксаль Т-92 (смесь замещенных диоксановых спиртов) и эпоксидированное соевое масло (ЭСМ). Расчетным методом Хансена показано, что исследуемые пластификаторы хорошо совместимы с каучуковой матрицей и набухающим наполнителем. Установлено, что использованные пластификаторы снижают вязкость резиновой смеси по Муни, понижают максимальный и минимальный крутящие моменты, а также увеличивают время достижения оптимума вулканизации. Показано, что введение 30 мас.ч. пластификаторов снижает прочностные характеристики резин при растяжении на 20 %, что связано с ослаблением межмолекулярных взаимодействий. Выявлено различие влияния количества пластификатора Оксаль Т-92 и ЭСМ на прочность резины при растяжении, заключающееся в том, что с увеличением количества ЭСМ прочность резины возрастает, это связано со способностью эпоксидных групп вступать во взаимодействие с гидроксильными группами набухающего наполнителя, в то время как с увеличением количества Оксаль Т-92 прочность резины снижается. Экспозиция резин в нефти и водной средах с различной минерализацией (пластовая вода, щелочной и кислый растворы) показала, что набухающая способность резин зависит как от природы среды, так и типа пластификатора. Более выраженная способность к набуханию зафиксирована для резин, включающих Оксаль Т-92. Оптимальная дозировка пластификаторов для проявления максимального эффекта как по набуханию, так и по технологическим характеристикам, составляет 30 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука.*

Ключевые слова: *пластовая вода, бутадиен-нитрильный каучук, набухающая резина, совместимость, растворимость полимеров.*

Для цитирования: Накып А. М., Черезова Е. Н., Карасева Ю. С. Влияние пластификаторов с кислородсодержащими гетероциклами на стабильность свойств и сорбционную способность высоконаполненных набухающих резин // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 199–205. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.028. EDN: https://elibrary.ru/HRFWPH.

Original article

INFLUENCE OF PLASTICIZERS WITH OXYGEN-CONTAINING HETEROCYCLES ON STABILITY OF PROPERTIES AND SORPTION CAPACITY OF HIGHLY FILLED SWELLABLE RUBBERS

Abdirakym M. Nakyp [1], Elena N. Cherezova [2], Yuliya S. Karaseva [3]

[1, 2, 3] Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
[1] abdirakym1994@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7189-9928
[2] cherezova59@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6743-1097
[3] karaseva_j@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6531-4252

Abstract. *The study is aimed at elucidating the influence of plasticizers containing oxygen-bearing heterocycles on the stability of physicomechanical properties and the swelling behavior of highly filled rubbers based on butadiene-nitrile rubber. As a swelling filler, an industrial product - sodium carboxymethylcellulose (NaCMC) with a particle size of 0.5-1.0 mm - was employed in an amount of 150 phr per 100 phr of rubber. Compounds with oxygen-containing heterocycles of different reactivity, namely Oxal T-92 (a compoud of substituted dioxane alcohols) and epoxidized soybean oil (ESO), were used as plasticizers. Hansen solubility parameter calculations demonstrated that the studied plasticizers exhibit good compatibility with both the rubber matrix and the swelling filler. It was estab-*

© Накып А. М., Черезова Е. Н., Карасева Ю. С., 2026

lished that the plasticizers reduce the Mooney viscosity of the rubber compound, lower both maximum and minimum torque values, and increase the time required to reach optimum vulcanization. The introduction of 30 phr of plasticizers was shown to reduce the tensile strength of the rubbers by approximately 20 %, which is attributed to the weakening of intermolecular interactions. A difference in the effect of Oxal T-92 and ESO dosage on the tensile strength of rubbers was revealed: with increasing ESO content, tensile strength improves due to the ability of epoxy groups to interact with hydroxyl groups of the swelling filler, whereas with increasing Oxal T-92 content, tensile strength decreases. Exposure of rubbers to oil and aqueous media of various mineralization levels (formation water, alkaline, and acidic solutions) demonstrated that the swelling behavior depends both on the nature of the medium and on the type of plasticizer. A more pronounced swelling tendency was observed for rubbers containing Oxal T-92. The optimal dosage of plasticizers, providing the maximum effect in terms of both swelling capacity and processing characteristics, was found to be 30 phr per 100 phr of rubber.

Keywords: *formation water, butadiene-nitrile rubber, swelling rubber, compatibility, polymer solubility*.

For citation: Nakyp, A. M., Cherezova, E. N., Karaseva, Yu. S. (2026). Influence of plasticizers with oxygen-containing heterocycles on stability of properties and sorption capacity of highly filled swelling rubbers. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 199-205. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.028. EDN: https: //elibrary.ru/HRFWPH.

ВВЕДЕНИЕ

Востребованным эластомером, применяемым в рецептурах для набухающих резин, является маслобензостойкий бутадиен-нитрильный каучук [1–4], совместно с которым в качестве набухающей составляющей описывают полиакрилаты, сополимеры акриламида, поливиниловый спирт, целлюлозу и её производные [5–12].

Наиболее часто в качестве водонабухающего наполнителя в резинах предлагают использовать NaКМЦ и ее композиции с другими набухающими полимерами [13, 14]. Для обеспечения достаточной степени набухания содержание NaКМЦ в резиновых смесях достигает 200 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука. Высокая степень наполнения резиновых смесей приводит к повышению их вязкости [15], что затрудняет равномерное распределение ингредиентов, негативно влияя на прочность конечного продукта.

Для улучшения технологических свойств в состав резиновых композитов вводят пластификаторы. Роль пластификаторов состоит в повышении гибкости макромолекулярных цепей, выравнивании напряжений в полимере, облегчении ориентации молекул наполнителя при растяжении, что должно привести к улучшению их физико-механических свойств [16–18].

В качестве пластификаторов, используемых в БНК, хорошо изучены эфиры фталевой кислоты диоктилфталат (ДОФ) и диоктилтерефталат (ДОТФ) [19, 20]. Учитывая прямую и косвенную угрозу фталатных пластификаторов для человека и окружающей среды, актуальным является поиск альтернативных структур пластификаторов [21]. Поскольку БНК относится к полярным каучукам, в качестве альтернативных структур следует рассматривать соединения с полярными группами. Анализ данных литературы показал, что в качестве пластификатора в ПВХ-композитах предлагается использовать смесь замещенных диоксановых спиртов (ЭДОС, Оксаль Т-92), эпоксидированные растительные масла [22–25]. Однако информация об использовании данных пластификаторов в составе набухающих резин единична.

Цель данной работы состояла в исследовании влияния пластификаторов с кислородсодержащими гетероциклами на физико-механические и сорбционные свойства набухающих резин на основе бутадиен-нитрильного каучука, наполненных карбоксилированнной целлюлозой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ингредиенты базовой резиновой смеси: каучук БНКС-28 АМН (ТУ 38.30313-2006), вулканизующий агент – сера техническая S8, (ГОСТ 127.1-93), ускоритель вулканизации 2-меркаптобензотиазол (ГОСТ 739-74), активатор серной вулканизации ZnO (ГОСТ 202-84), вторичный активатор вулканизации – стеарин технический ($CH_3(CH_2)_{16}C(O)OH$) (ГОСТ 6484-96), высокодисперсный усиливающий наполнитель – технический углерод П 324 (ГОСТ 7885-86). Набухающий наполнитель – натрий-карбоксиметилцеллюлоза техническая (Полицелл КМЦ 9В) со степенью замещения 0,9 (ТУ 2231-017-32957739-09). NaКМЦ предварительно фракционировали ситовым методом. Использовали фракцию с размером частиц 0,5÷1 мм. Пластификатор Оксаль Т-92 (ТУ 2493-003-13004749-93), состав приведен в работе [26]. Пластификатор ЭСМ (ТУ 6-10-722-72) с количеством эпоксидных групп 6,5–7,5г O_2/100 г.

Приготовление композитов проводили в две стадии. На первой стадии на лабораторных вальцах марки ПД 320-320 (Полимермашгрупп, Россия) изготавливали базовые резиновые смеси (БРС), включающие ингредиенты 1–6 (таблица 1).

Таблица 1 – Состав резиновых смесей / Table 1 – Formulation of rubber compounds

№	Основные ингредиенты резиновой смеси	№ смеси, мас.ч.						
		1	2	3	4	5	6	7
1	БНКС-28 АМН	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2	Сера техническая	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
3	2-меркаптобензотиазол	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
4	Стеарин технический	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5	Белила цинковые	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
6	ТУ П 324	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0	45,0
7	NaКМЦ	150	150	150	150	150	150	150
8	Пластификатор Оксаль Т-92	–	10	20	30	–	–	–
9	Пластификатор ЭСМ	–	–	–	–	10	20	30

После выдержки в течение 1 суток БРС смешивали с набухающим наполнителем NaКМЦ и пластификатором в закрытом лабораторном резиносмесителе «Plasti-Corder Lab-Station» W50 E (Brabender, Германия) при температуре 60 ºС и скорости вращения роторов 60 об/мин.

Вулканизацию проводили на лабораторном вулканизационном прессе с индукционным нагревом плит 100-400-2Э (ЗАО «Завод им. Красина», Россия) при температуре 160 ºС согласно ГОСТ 269-66. Толщина пластин 2,0±0,2 мм.

Вязкость резиновых смесей по Муни определяли

с помощью вискозиметра Mooney Viscozimeter-UGT7080S2 (GOTECH, Тайвань) согласно ASTM D1646. Образец испытывали при температуре 100 ºС после предварительного нагрева в течение 1 мин. и нагревания в течение 4 мин. с помощью большого ротора.

Реометрические характеристики резиновых смесей определяли на вибрационном реометре «MDR GT-3000-A» согласно ГОСТ 12535-84 (GOTECH, Тайвань) при температуре 160 ºС в течение 30 мин.

Упруго-прочностные свойства вулканизатов (условная прочность при растяжении (fp), относительное удлинение при разрыве (ε) определяли на универсальной электромеханической испытательной машине ТРМ-П 50 С1 Tochline (НПО «Точприбор», Россия) согласно ГОСТ 270-81 при скорости растяжения 500 мм/мин, и температуре 23±2 ºС. Твердость по Шору А. измеряли на портативном твердомере ТН-200 (TIME Group, Китай) согласно ГОСТ 263-75. Эластичность по отскоку определяли на упругомере типа Шоба марки УМР-1 (ООО «Полимермаш групп», Россия) согласно ГОСТ 27110-86.

Расчет параметров совместимости каучука с пластификаторами и набухающим наполнителем проведен методом Хансена [27], используя уравнение (1):

$$\delta = \sqrt{\delta_D^2 + \delta_P^2 + \delta_h^2}, \quad (1)$$

где δ – интегральный параметр растворимости, (δD) дисперсионное взаимодействие, $\delta_D^2 = \frac{\sum \Delta V \delta^2 D}{\sum \Delta V}$; (δp) межмолекулярное диполь-дипольное взаимодействие, $\delta_P^2 = \frac{\sum \Delta V \delta^2 p}{\sum \Delta V}$; (δh) межмолекулярное водородное взаимодействие, $\delta_h^2 = \frac{\sum \Delta V \delta^2 h}{\sum \Delta V}$.

Параметр совместимости компонентов Δ δ определен в соответствии с формулой (2):

$$\Delta\delta = (\delta_1 - \delta_2)^2, \quad (2)$$

δ1 – параметр растворимости каучука, δ2 – параметр растворимости пластификатора и набухающего наполнителя.

Степень набухания резины в жидких средах определяли по изменению массы вулканизатов по формуле (3):

$$\alpha = \frac{m - m_0}{m_0} * 100\ \%\ , \quad (3)$$

где m – масса набухшего образца, m_0 – масса исходного образца.

Для испытаний использовали хлоридно-натриевую пластовую воду (Ромашкинское месторождение) содержание ионов г/л: $Na^+ + K^+$ - 70; Ca^{2+} – 11; Cl^- – 139; CO_3^{2-} – 0,2; SO_4^{2-} – 0,7; pH = 6,3), 10 %-ные водные растворы NaOH, H_2SO_4 и нефть (Краснооктябрьского нефтяного месторождения, %: Сера – 3,62; смолы – 12,65; асфальтены – 6,33; парафин – 2,06).

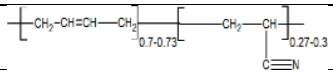
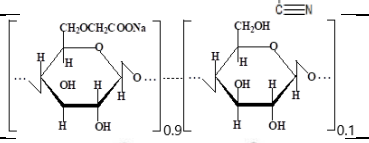
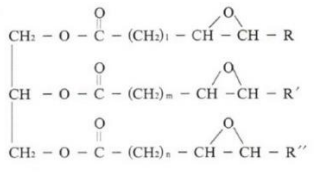
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве эластомерной матрицы использован каучук БНКС-28 АМН, который обладает сбалансированными механическими свойствами. Предварительно была проведена оценка совместимости пластификаторов (Оксаль Т-92, ЭСМ) и набухающего полимера (NaКМЦ) с каучуком расчётным методом Ч. Хансена [15]. Этот метод учитывает три типа межмолекулярных взаимодействий: дисперсионное, возникающее за счет межатомных сил притяжения (δ_D); межмолекулярное диполь-дипольное взаимодействие (δ_p); межмолекулярное водородное взаимодействие (δ_h) [28].

В таблице 2 приведены рассчитанные значения межмолекулярных взаимодействий (δ_D^2), (δ_P^2) и (δ_h^2) и интегральных параметров (δ), а также отклонений интегральных параметров (Δδ) пластификаторов и набухающего наполнителя относительно каучука БНКС-28 АМН. Анализ данных показал, что значение (δ) набухающего наполнителя достаточно близко к данному параметру эластомерной матрицы (Δδ = 0,24), что говорит о его высокой термодинамической совместимости с каучуком. Для пластификаторов ЭСМ и Оксаль Т-92 величины Δδ составляют 1,27 и 1,44 соответственно, что также свидетельствует о возможности их эффективного использования в составе резины на базе БНКС-28 АМН.

Таблица 2 – Значения составляющих параметров растворимости групп атомов по методу Хансена

Table 2 – Values of the constituent parameters of solubility of groups of atoms according to the Hansen method

Функциональная группа	Соединение	δ_D^2, МДж/м^3	δ_P^2 МДж/м^3	δ_h^2, МДж/м^3	δ, (МДж/м^3)	Δδ
БНКС-28 АМН		17,61	1,64	0,76	17,70	-
Na-КМЦ (0,9)		17,44	0,83	0,49	17,46	0,24
Эпоксидированное соевое масло ($C_{57}H_{106}O_9$)		16,22	0,73	0,94	16,26	1,44
Оксаль Т-92	Смесь замещенных диоксановых спиртов [26]	16,36	0,79	1,35	16,43	1,27

Таким образом, применение пластификаторов в композициях на основе БНКС-28 АМН, наполненных NaКМЦ, позволило существенно снизить вязкость по Муни, что позволяет улучшить перерабатываемость резиновых смесей. При этом пластифицирующая эффективность ЭСМ несколько выше по сравнению с Оксалем Т-92, что может быть связано с более высокой полярностью ЭСМ и более эффективным снижением межмолекулярных взаимодействий в полимерной матрице.

Полученные результаты полагали более детальное изучение корреляции между введением пластификатора и кинетикой вулканизации резиновых смесей (таблица 3). По сравнению с контрольной смесью без пластификатора все пластифицированные образцы характеризовались снижением минимального крутящего момента (ML), что указывало на понижение исходной вязкости смеси, максимального крутящего момента (MH) и ΔM, косвенно отражающих

вязкость и плотность образующейся сетки вулканизата. Однако при добавлении 30 мас.ч. Оксаля Т-92 снижение (ML) составило 12 % по сравнению с контролем, тогда как при использовании ЭСМ снижение (ML) достигло 32 %. Это подтверждает вывод о более сильном пластифицирующем действии ЭСМ.

Кинетические параметры процесса вулканизации также изменились при добавлении пластификаторов: возросло время до начала вулканизации (t10) и достижения оптимума вулканизации (t_{90}). Применение ЭСМ ассоциируется с более выраженным пролонгированием временных показателей, что верифицирует его более существенное влияние на замедление процесса образования поперечных связей. Это можно связать с высокой реакционной способностью эпоксидных групп масла как следствие возможностью химического взаимодействия с компонентами вулканизующей системы.

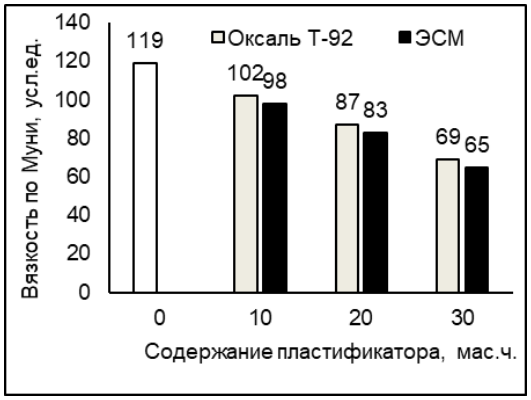


Рисунок 1 – Результаты вязкости по Муни высоконаполненных резиновых смесей

Figure 1 – Mooney viscosity results for highly filled rubber compounds

Таблица 3 – Параметры реометрических кривых вулканизации резиновых смесей (160 ºС, 30 мин)

Table 3 – Parameters of rheometric curves of vulcanization of rubber compounds (160°C, 30 min)

Показатели	Без пластификатора	Количество пластификатора, мас.ч. на 100 мас.ч. каучука					
		Оксаль Т-92			ЭСМ		
		10	20	30	10	20	30
	№ смеси						
	1	2	3	4	5	6	7
ML,*dN-m*	3,45	3,15	2,87	2,45	3,35	3,10	2,35
MH,*dN-m*	17,30	17,05	16,70	15,16	14,28	13,62	11,85
ΔM,*dN-m*	13,85	13,90	13,83	12,71	10,93	10,52	9,50
t_{10},*min*	0,95	1,01	1,04	1,08	1,04	1,22	1,54
t_{90}, *min*	10,36	10,63	10,75	10,99	11,09	12,41	13,36

В целом, оба исследованных пластификатора проявили типичное влияние на свойства, связанное со снижением вязкости, замедлением скорости вулканизации резиновых смесей, а также ослаблением пространственной сетки вулканизата. Последнее привело к понижению прочности резины при растяжении, её твердости. Однако в случае использования реакционноспособного ЭМС с увеличением его содержания отмечено возрастание прочности при растяжении. Вероятно, это связано с реакцией эпоксидных групп ЭСМ с гидроксильными группами целлюлозы с образованием эфирных связей. Протекание такого процесса весьма вероятно, поскольку, согласно литературным данным, взаимодействие целлюлозы с эпоксидными соединениями (схема 1) протекает в достаточно мягких условиях [29, 30].

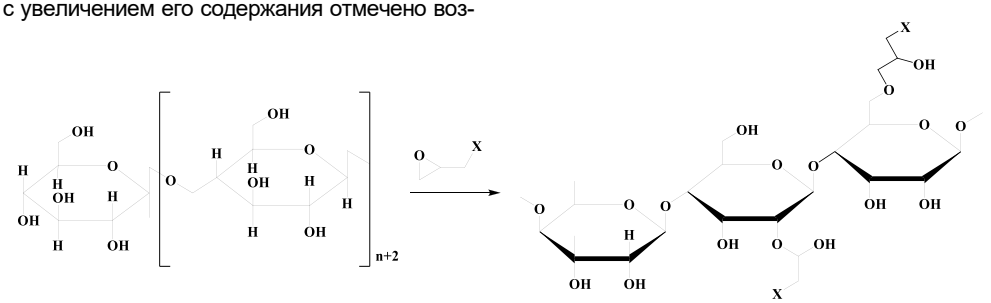


Схема 1 – Реакция взаимодействия эпоксидных групп с гидроксильными группами целлюлозы

Sheme 1 – Reaction of interaction of epoxy groups with hydroxyl groups of cellulose

Для набухающих резин важной характеристикой является стабильность эксплуатационных свойств при экспозиции в водных и органических средах. Согласно экспериментальным данным (таблица 4), после экспозиции в пластовой воде и нефти в течение 3 сут. прочность образца без пластификатора снизилась на 5–7 %, тогда как при использовании пластификаторов она снижалась на 15–20 %. Это обусловлено дополнительным ослаблением межцепных связей вследствие проникновения внешней фазы в поры менее плотной пространственной сетки вулканизата. Важно отметить, что при увеличении количества пластификатора Оксаль Т-92 прочность при растяжении резин при воздействии пластовой воды и нефти снижалась, тогда как при увеличении количества ЭСМ, наоборот, увеличивалась.

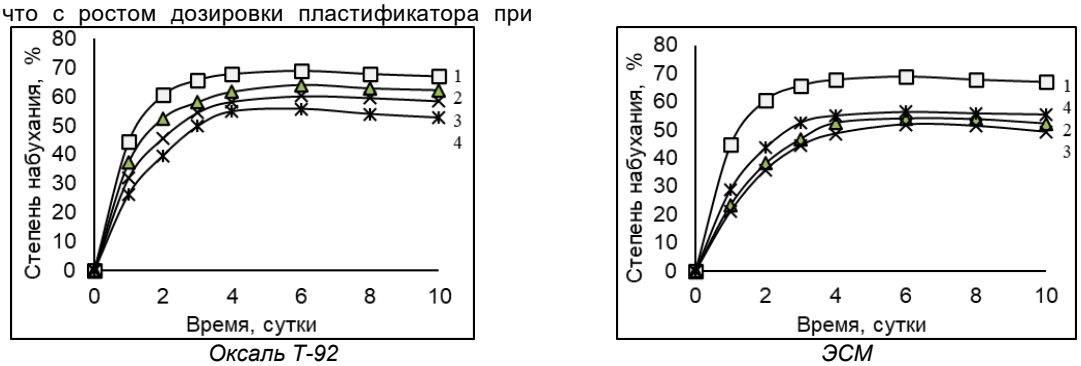
По-видимому, различия связаны с возможностью диоксановых спиртов, включенных в состав пластификатора Оксаль Т-92 диффундировать в жидкую фазу. Это сопровождается увеличением свободного объёма, усиливая проникновение жидкой фазы в объем полимерной сетки, ослабляя межцепные связи. Твёрдость по Шору А остаётся стабильной (86–92 усл. ед.), вне зависимости от состава и среды, что свидетельствует о сохранении модульных свойств.

Таблица 4 – Физико-механические свойства резин, наполненных NaКМЦ с различным количеством пластификаторов после экспозиции в пластовой воде и нефти

Table 4 – Physical and mechanical properties of rubbers filled with NaCMC with different amounts of plasticizers after exposure to formation water and oil

Показатели	Без пластификатора	Количество пластификатора, мас.ч. на 100 мас.ч. каучука					
		Оксаль Т-92			ЭСМ		
		10	20	30	10	20	30
	№ смеси						
	1	2	3	4	5	6	7
До экспозиции							
fp, МПа	4,4	4,0	3,8	3,5	3,0	3,2	3,4
HSA, усл.ед.	91	86	84	82	85	80	76
R, %	28	23	21	20	20	20	19
После экспозиции в пластовой воде							
fp, МПа	4,2	3,4	3,0	2,8	2,6	2,7	2,9
HSA, усл.ед.	89	89	90	91	86	89	90
R, %	46	46	46	41	44	42	41
После экспозиции в нефти							
fp, МПа	4,1	2,9	2,7	2,4	2,9	3,1	3,4
HSA, усл.ед.	90	90	92	91	87	89	89
R, %	39	39	39	36	34	32	32

Далее была изучена набухающая способность полученных резин в нефти, пластовой воде, щелочном и кислом водных растворах. Установлено, что с ростом дозировки пластификатора при экспозиции в пластовой воде наблюдается снижение степени набухания материала с 67 % до 53–50 % (рис. 2).

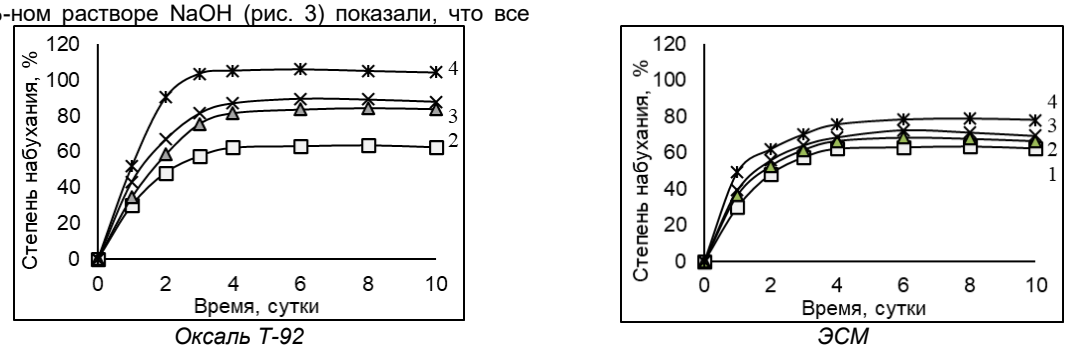


Оксаль Т-92 *ЭСМ*

Рисунок 2 – Влияние содержания пластификатора на набухающую способность резин в пластовой воде: 1 – без пластификатора; 2 – 10 мас.ч. пластификатора; 3 – 20 мас.ч. пластификатора; 4 – 30 мас.ч. пластификатора

Figure 2 – Effect of plasticizer content on the swelling capacity of rubbers in formation water: 1 – no plasticizer, 2 – 10 parts by weight of plasticizer, 3 – 20 parts by weight of plasticizer, 4 – 30 parts by weight of plasticizer

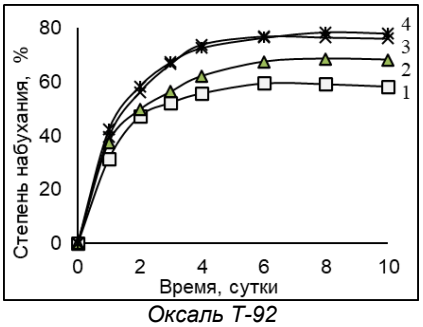
Вероятно, это связано со снижением доступности гидрофильных участков набухающего наполнителя. Результаты исследования набухания резин в 10 %-ном растворе NaOH (рис. 3) показали, что все образцы характеризуются быстрой сорбцией влаги в течение первых суток с выходом на равновесное состояние в последующие 3 суток.



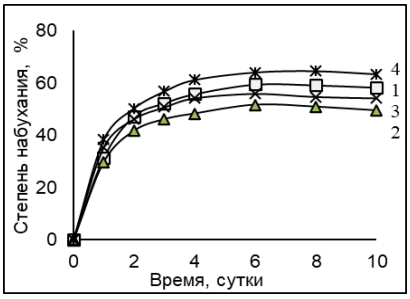
Оксаль Т-92 *ЭСМ*

Рисунок 3 – Влияние содержания пластификатора на набухающую способность в 10 % водном растворе NaOH: 1 – без пластификатора; 2 – 10 мас.ч. пластификатора; 3 – 20 мас.ч. пластификатора; 4 – 30 мас.ч. пластификатора

Figure 3 – Effect of plasticizer content on swelling capacity in a 10 % aqueous solution of NaOH: 1 – no plasticizer, 2 – 10 parts by weight of plasticizer, 3 – 20 parts by weight of plasticizer, 4 – 30 parts by weight of plasticizer



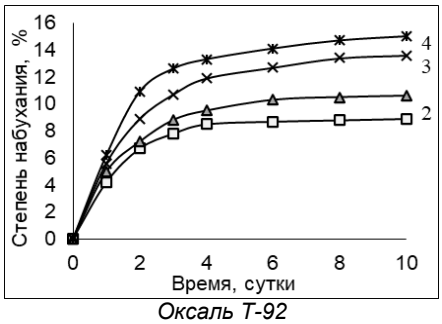
Оксаль Т-92



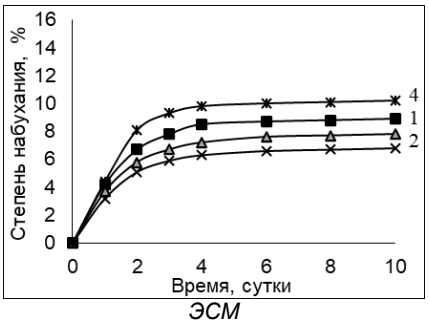
ЭСМ

Рисунок 4 – Влияние содержания пластификатора на набухающую способность в 10 % растворе H_2SO_4: 1 – без пластификатора; 2 – 10 мас.ч. пластификатора; 3 – 20 мас.ч. пластификатора; 4 – 30 мас.ч. пластификатора

Figure 4 – Effect of plasticizer content on swelling capacity in a 10 % H_2SO_4 solution: 1 – no plasticizer, 2 – 10 parts by weight of plasticizer, 3 – 20 parts by weight of plasticizer, 4 – 30 parts by weight of plasticizer



Оксаль Т-92



ЭСМ

Рисунок 5 – Влияние содержания пластификатора на набухающую способность в нефти: 1 – без пластификатора; 2 – 10 мас.ч. пластификатора; 3 – 20 мас.ч. пластификатора; 4 – 30 мас.ч. пластификатора

Figure 5 – Effect of plasticizer content on swelling capacity in oil: 1 – no plasticizer, 2 – 10 parts by weight of plasticizer, 3 – 20 parts by weight of plasticizer, 4 – 30 parts by weight of plasticizer

При этом степень набухания существенно зависит от типа и дозировки введённого пластификатора. Выраженный эффект влияния количества пластификатора наблюдается при применении Оксаль Т-92: при дозировке пластификатора 30 мас.ч. степень набухания достигает 110 %, что почти вдвое превышает значение образца без пластификатора (60 %). В случае ЭСМ влияние количества пластификатора выражен слабо: даже при дозировке 30 мас.ч. степень набухания составляет около 80 %. В отличие от Т-92, ЭСМ представляет собой гидрофобный триглицерид с эпоксигруппами, нерастворимый в воде. Его взаимодействие с водной средой ограничено. ЭСМ не создаёт условий для активного водопоглощения, в результате чего влияние количества пластификатора на набухание существенно ниже по сравнению с Оксаль Т-92.

Набухание резин в кислой среде по сравнению с щелочной средой (рис. 4) ниже. Это связано с меньшей ионизацией полярных групп набухающего полимера в кислых средах, что ограничивает сорбцию влаги.

Наиболее выраженный эффект набухания образцов отмечен для композитов с содержанием 30 мас.ч. пластификатора: степень набухания достигает 57–65 % для ЭСМ и 67–79 % при введении Т-92. Таким образом, несмотря на то, что оба пластификатора повышают набухающую способность резин как в кислой, так и щелочной среде, более выраженное действие проявляет Оксаль Т-92.

Оценка набухающей способности резиновых композиций в нефти (рис. 5) показала, что степень равновесного набухания образца без пластификатора составила 8–9 %, что указывает на невысокую чувствительность материала к воздействию углеводородной среды. Введение пластификаторов ЭСМ и Оксаль Т-92 приводит к умеренному увеличению сорбционной способности материала: зафиксирована степень набухания 9–15 % при использовании Т-92: степень; при применении ЭСМ степень набухания достигла значений 9–10 %.

ВЫВОДЫ

Расчетным методом Хансена проведена оценка растворимости пластификаторов с кислородсодержащими гетероциклами Оксаль Т-92 и ЭСМ с каучуком БНКС-28 АМН и набухающим наполнителем NaКМЦ, показавшая потенциальную возможность их эффективного совмещения.

Установлено, что исследованные пластификаторы эффективно снижают вязкость резиновых смесей по Муни пропорционально их количеству в композите. В частности, вязкость по Муни резиновых смесей без пластификатора составила 119 усл. ед., при введении 30 мас.ч. пластификатора на 100 мас.ч. каучука вязкость падает до 69 (Оксаль Т-92) – 65 (ЭСМ) усл. ед.

Выявлено влияние пластификаторов на реометрические характеристики, указавшее на снижение максимального и минимального крутящих моментов (MH и ML), что подтвердило пластифицирующую активность Оксаль Т-92 и ЭСМ. Однако при добавлении 30 мас.ч. Оксаля Т-92 снижение (ML) составило 12 % по сравнению с контролем, тогда как при использовании ЭСМ снижение (ML) достигло 32 %. Это указывает на более сильное пластифицирующее действие ЭСМ.

Показано, что введение 30 мас.ч. пластификаторов снижает прочностные характеристики резин при растяжении на 20 %, что связано с ослаблением межмолекулярных взаимодействий. Однако в случае использования реакционноспособного ЭМС с увеличением его содержания отмечено возрастание прочности при растяжении. Вероятно, это связано с реакцией эпоксидных групп ЭСМ с гидроксильными группами целлюлозы с образованием эфирных связей.

Экспозиция резин в нефти и водной средах с различной минерализацией (пластовая вода, щелочной и кислый растворы) показала, что набухающая способность резин зависит как от природы среды, так и типа пластификатора. Более выраженная способность к набуханию зафиксирована для резин, включающих Оксаль Т-92. Оптимальная дози-

ровка пластификаторов для проявления максимального эффекта как по набуханию, так и по технологическим характеристикам, составляет 30 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cherezova E.N., Karaseva Y.S., Momzyakova K.S. Hydrophilic rubber based on butadiene-nitrile rubber and phytogenic powdered cellulose // Polymer Science – Series D. 2022. № 15. С. 118–121. doi: 10.1134/s1995421222010075.

2. Properties of water-swellable compounds based on nitrile rubber with varied acrylonitrile content / M.A. Vaniev [и др.] // Rubber Chemistry and Technology. 2021. № 94. С. 591–599. doi: 10.5254/rct.21.79994.

3. Mechanical, water-swelling, and morphological properties of water-swellable thermoplastic vulcanizates based on high density polyethylene/chlorinated polyethylene/nitrile butadiene rubber/cross-linked sodium polyacrylate blends / D. Wei [и др.] // Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2015. № 54. С. 616–624. doi: 10.1080/03602559.2014.974191.

4. Накып А.М., Черезова Е.Н., Карасева Ю.С. Получение частично карбоксилированной порошковой целлюлозы из соломы льна и ее влияние на физико-механические свойства и степень набухания резины // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24, № 9. С. 49–52.

5. Mechanical Properties, Water-swelling Behavior, and Morphology of Water-swellable Rubber Prepared Using Crosslinked Sodium Polyacrylate / C. Liu [и др.] // Journal of Applied Polymer Science. 2006. № 102. С. 1489–1496. doi: 10.1002/app.24404.

6. Swelling Behavior of Semi-interpenetrating Polymer Network Hydrogels Composed of Poly(Vinyl Alcohol) and Poly(Acrylamide- Co -sodium Methacrylate) / Y. Mohan [и др.] // Journal of Applied Polymer Science. 2005. № 98. С. 302–314. doi: 10.1002/app.21849.

7. Zhang S.T. Preparation, Water Absorbent and Mechanical Properties of Water Swellable Rubber // Plastics, Rubber and Composites. 2012. № 41. С. 326–331. doi: 10.1179/1743289810Y.0000000012.

8. Порошковая карбоксилированная лигноцеллюлоза из соломы овса в качестве наполнителя ограниченно набухающих резин / А.М. Накып [и др.] // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26, № 8. С. 58–63. doi: 10.55421/1998-7072_2023_26_8_58.

9. Черезова Е.Н., Накып А.М., Карасева Ю.С. Использование порошковой целлюлозы, полученной из отходов хлопкового волокна, в составе гидронабухающей резины // Бутлеровские сообщения. 2021. Т. 68, № 11. С. 47–53. doi: 10.37952/ROI-jbc-01/21-68-11-47.

10. Efficiency of Application of Hydrolyzed Polyacrylamide and Copolymer Acrylamide with Potassium Acrylate as a Water-Swelling Agent in Rubbers / S.S. Lopatina [и др.] // Key Engineering Materials. 2019. № 816, С. 208–213. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.816.208.

11. Cherezova E.N., Karaseva Y.S., Nakyp A.M. Evaluation of the Durability of Limited Swelling Rubber Filled with Modified Powdered Cellulose from Cotton Waste // Polymer Science – Series D. 2023. Т. 16. № 3. С. 681–686. doi: 10.1134/S1995421223030073.

12. Influence of Partially Carboxylated Powdered Lignocellulose from Oat Straw on Technological and Strength Properties of Water-Swelling Rubber / E. Cherezova [et al.] // Polymers. 2024. Т. 16. № 2. С. 282. doi: 10.3390/polym16020282.

13. Impact of the Composition of Rubbers Filled with Carboxymethyl Cellulose on Their Properties / E.N. Cherezova [и др.] // Russian Journal of Applied Chemistry. 2023. Vol. 96. № 4. P. 462–467. doi: 10.1134/s1070427223040092.

14. Korte J.R., Thurston J.J., Goodson J.E. (2009). Water swelling rubber compound for use in reactive packers and other downhole tools: Пат. № 8181708; заявл. 30.09.2008; опубл. 02.04.2009.

15. Mohd H.H., Yong K.C., Lee S.Y. Evaluating the Efficacy of a Newly Developed Palm-Based Process Aid on Nitrile Rubber Composites // Journal of Rubber Research. 2021. № 24. С. 51–59. doi: 10.1007/s42464-020-00072-6.

16. Влияние пластификаторов на физико-механические свойства пленочных материалов на основе полиакриламида / Л.А. Зимагулова [и др.] // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, № 23. С. 67–71.

17. Bergmann C., Trimbach J. Influence of plasticizers on the properties of natural rubber-based compounds // Kgk-kautschuk gummi kunststoffe. 2014. Т. 67. № 7–8. С. 40–49.

18. Soybean oil plasticizers as replacement of petroleum oil in rubber / Petrović Z.S. [и др.] // Rubber chemistry and technology. 2013. Т. 86. № 2. С. 233–249.

19. Pavlova V.V., Sokolova M.D., Fedorova A.F. Influence of the Content and Nature of the Plasticizer on the Properties of Butadiene-Nitrile Rubber // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2021. Т. 14. № 2. С. 222–232. doi: 10.17516/1999-494X-0303.

20. Influence of bio-based plasticizers on the properties of NBR materials. M. Rahman [и др.]. Materials 2020. № 13. С. 2095. doi: 10.3390/ma13092095.

21. Giuseppe L., Claudio D.F., Alberto V. Plasticizers, infant nutrition and reproductive health // Reproductive Toxicology. 2004. Т. 19, № 1. С. 27–33. doi: 10.1016/j.reprotox.2004.05.011.

22. Flotator Oxal as the plasticizer for suspension PVC Trifonova I.P. [et al.] //Journal of the Serbian Chemical Society. 2022. Т. 87. № 3. С. 355–362.

23. Оценка совместимости пластификатора ЭДОС с поливинилхлоридом / Е.М. Готлиб [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2018. № 2. С. 137–145.

24. Влияние эпоксидной смолы Э-181 на свойства резин на основе бутадиен-нитрильного каучука / Д.С. Востриков [и др.] // Промышленное производство и использование эластомеров. 2020. № 1. С. 40–44. doi: 10.24411/2071-8268-2020-10106.

25. Application of epoxidized soybean oil in highly filled water-swelling rubbers / E. Cherezova [и др.] // Engineered Science. 2023. Т. 25. № 936. С. 10.30919.

26. Строение высококипящих побочных продуктов производства изопрена и химизм их образования / А.С. Дыкман [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. 2013. № 8. С. 27–34.

27. Hansen C.M. Hansensolubilityparameter. A User's Handbook / C.M. Hansen. 2nded. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. 520 c.

28. Krevelen D.W. Properties of polymers: their correlation with chemical structure: their numerical estimation and prediction from additive group contributions: D.W. van Krevelen, K. te Nijenhuis. 4 ed. Printed and bound in Slovenia, 2009. 1004 c.

29. Роговин З.А. Химия целлюлозы : Москва, Химия, 1972. 520 с.

30. Фрейдин А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений : Изд. 2, перераб и доп. 1981. 272 с.

Информация об авторах

А. М. Накып – кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры «Технологии синтетического каучука» Казанского национального исследовательского технологического университета.

Е. Н. Черезова – доктор химических наук, профессор кафедры «Технологии синтетического каучука» Казанского национального исследовательского технологического университета.

Ю. С. Карасева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химии и технологии переработки эластомеров» Казанского национального исследовательского технологического университета.

Information about the authors

A.M. Nakyp - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Synthetic Rubber Technology at Kazan National Research Technological University.

E.N. Cherezova - Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Synthetic Rubber Technologies at Kazan National Research Technological University.

Yu.S. Karaseva - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing at Kazan National Research Technological University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 206–210.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 206–210.

Научная статья
2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 661.762.3:615.47
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.029 EDN: JYIRQX

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВИСМУТ- И ОЛОВООРГАНИЧЕСКИХ КАТАЛИЗАТОРОВ В СИНТЕЗЕ БИОСОВМЕСТИМЫХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ОСТЕОПЛАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

Алия Рамилевна Вафина [1], Любовь Андреевна Зенитова [2]

[1, 2] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), Казань, Россия
[1] aliyshaa2811@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-5798-2730
[2] liubov_zenitova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-8531-8820

Аннотация. *В работе проведена сравнительная оценка эффективности трёх металлоорганических катализаторов – 2-этилгексаноата олова(II) (ЭГО), 2-этилгексаноата висмута(III) (CAT 22) и неодеканоата висмута(III) (CAT 20A) – при формировании остеопластических композитов на основе гидроксилсодержащего силоксанового каучука СКТН-Г и аэросила А-175. Установлено, что висмутовые катализаторы обеспечивают значительно более высокую скорость отверждения: при концентрации 4 мас. ч. и комнатной температуре время отверждения составило 7 мин 8 с для CAT 20A, 12 мин 52 с – для CAT 22 и 48 мин – для ЭГО. Повышение температуры до 40 °С ускоряет процесс в 2–4 раза, что подтверждает высокую термочувствительность систем. Наиболее сбалансированными характеристиками – по скорости отверждения, однородности структуры и термомеханической стабильности – обладает CAT 20A. Физико-химический анализ водных экстрактов показал, что все композиты имеют близкие значения pH (6,0) и показателя преломления (1,331–1,332), что свидетельствует об отсутствии выраженного выщелачивания компонентов и высокой химической стабильности материалов. Полученные результаты позволяют рекомендовать висмутовые катализаторы, особенно CAT 20A, для разработки технологичных, быстроотверждающихся и химически инертных остеопластических композитов, пригодных для дальнейших биомедицинских исследований.*

Ключевые слова: *висмуторганические катализаторы, оловянные катализаторы, СКТН-Г, аэросил А-175, холодное отверждение, аутогезия, термостабильность, биосовместимость, время отверждения.*

Благодарности: *автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.*

Для цитирования: Вафина А. Р., Зенитова Л. А. Сравнительная оценка висмут- и оловоорганических катализаторов в синтезе биосовместимых кремнийорганических остеопластических композитов // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 206–210. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.029. EDN: https://elibrary.ru/JYIRQX.

Original article

COMPARATIVE EVALUATION OF BISMUTH- AND TIN-BASED ORGANOMETALLIC CATALYSTS IN SYNTHESIS OF BIOCOMPATIBLE SILICONE-BASED OSTEOPLASTIC COMPOSITES

Aliya R. Vafina [1], Liubov A. Zenitova [2]

[1, 2] Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia
[1] aliyshaa2811@gmail.com, https://orcid.org/0009-0002-5798-2730
[2] liubov_zenitova@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-8531-8820

Abstract. *The study compared the effectiveness of three organometallic catalysts-tin(II) 2-ethylhexanoate (EGO), bismuth(III) 2-ethylhexanoate (CAT 22), and bismuth(III) neodecanoate (CAT 20A) - in the formation of osteoplastic composites based on SKTN-G hydroxyl-containing siloxane rubber and Aerosil A-175. Bismuth catalysts were found to provide a significantly higher curing rate: at a concentration of 4 parts by weight and room temperature, the curing time was 7 min 8 sec for CAT 20A, 12 min 52 sec for CAT 22, and 48 min for EGO. Increasing the temperature to 40°C accelerates the process by 2-4 times, confirming the high thermal sensitivity of the systems. CAT 20A exhibits the most balanced characteristics - in terms of curing speed, structural homogeneity, and thermomechanical stability. Physicochemical analysis of aqueous extracts revealed that all composites have similar pH (6.0) and refractive index (1.331-1.332) values, indicating the absence of significant component leaching and high chemical stability of the materials. These results allow us to recommend bismuth catalysts, particularly CAT 20A, for the development of technologically advanced, fast-curing, and chemically inert osteoplastic composites suitable for further biomedical research.*

© Вафина А. Р., Зенитова Л. А., 2026

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВИСМУТ- И ОЛОВООРГАНИЧЕСКИХ КАТАЛИЗАТОРОВ В СИНТЕЗЕ БИОСОВМЕСТИМЫХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ОСТЕОПЛАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

Keywords: *bismuth-based catalysts, tin-based catalysts, SKTN-G silicone rubber, Aerosil A-175, room-temperature curing, autoghesion, thermal stability, biocompatibility, curing time.*

Acknowledgements: *the author expresses gratitude to his / her colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.*

For citation: Vafina, A. R., Zenitova, L. A. Comparative evaluation of bismuth- and tin-based organometallic catalysts in synthesis of biocompatible silicone-based osteoplastic composites (2026). *Polzunovskiy vestnik*, (2), 206-210. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.029. EDN: https: //elibrary.ru/JYIRQX.

ВВЕДЕНИЕ

Современная регенеративная медицина сталкивается с необходимостью разработки биоматериалов нового поколения, способных не только замещать повреждённые ткани, но и активно участвовать в процессах их восстановления. Одной из центральных задач в этой области является создание остеопластических материалов, сочетающих в себе биосовместимость, адекватные механические свойства, технологичность формования и контролируемую деградацию in vivo [1, 2]. Такие материалы должны обеспечивать структурную поддержку в зоне дефекта на протяжении всего периода регенерации костной ткани (обычно от нескольких недель до нескольких месяцев), одновременно не вызывая воспалительных или токсических воздействий со стороны организма [3].

В последние годы внимание уделяется полимерным матрицам на основе низкомолекулярных кремнийорганических соединений, в частности гидроксилсодержащим силоксановым каучукам, таким как СКТН-Г. Эти материалы имеют следующие важные свойства: высокую химическую инертность, термостабильность, прозрачность, а также возможность отверждения при солнечной энергии путем конденсационной поликонденсации [4, 5]. Наличие терминальных гидроксильных групп позволяет СКТН-Г эффективно взаимодействовать с катализаторами и сшивающими агентами без использования повышенных температур или ультрафиолетового излучения. Это представляется особенно важным при разработке имплантатов, содержащих биологические активные компоненты – такие, как клетки или факторы роста, чувствительные к агрессивным условиям обработки [6].

Выбор СКТН-Г в качестве полимерной основы обусловлен его относительно низкой молекулярной массой (~20 000 г/моль), что обеспечивает в первые моменты использования подвижность макромолекул и возможность использования значительного количества неорганического наполнителя – до 20 массовых частей на 100 массовых частей каучука. Это важно для формирования композитов с остеокондуктивными явлениями, поскольку наполнитель не только изменяет механические характеристики, но и может служить основанием для биоактивных ионов, стимулирующих остеогенез [7]. В качестве наполнителя в настоящей работе использован аэросил А-175 – высокодисперсный диоксид кремния с удельной поверхностью до 220 м²/г. Его применение позволяет достичь высокого уровня наполнения композиции при сохранении контролируемой (или приемлемой) вязкости, для последовательного инъекционного введения, а также улучшить прочностные и реологические свойства конечного материала [8, 9]. Кроме того, SiO_2, входящий в состав аэросила, известен своей способностью стимулировать экспрессию остеогенных маркеров (например, остеокальцина и щелочной фосфатазы) в клетках мезенхимического происхождения [10].

Процесс отверждения состава происходит по механизму конденсационного сшивания, инициируемого металлорганическими катализаторами. Традиционно в любом случае применяются соединения олова, в частности 2-этилгексаноат олова (ЭГО), обладающего высокой каталитической активностью [11]. Однако оловянные катализаторы проявляют выраженную цитотоксичность даже в низких концентрациях, что ограничивает их применение в медицинских биоматериалах [12]. В связи с этим всё большее внимание уделяется нетоксичным альтернативам – в первую очередь, соединениям висмута, таким как 2-этилгексаноат висмута (CAT 22) и неодеканоат висмута (CAT 20A). Висмут считается одним из наименее стойких тяжёлых металлов и даже используется в фармацевтике (например, в препаратах для лечения язвенной болезни) [13]. При этом висмутовые катализаторы сохраняют биологические свойства, аналогичные катализаторам олова по идентичному механизму: они активируют функциональные группы каучука, способствуя образованию связей Si–O–Si и выделению низкомолекулярных продуктов (например, этанола) [14].

Контроль времени отверждения является обязательным условием при разработке остеопластических композитов. С одной стороны, материал должен сохранять достаточную целостность (рабочее время или «время жизни») – период, в течение которого состав остается пластичным для формования или введения в костный дефект. С другой стороны, слишком длительное время нахождения в неотвержденном состоянии может привести к вымыванию компонентов материала из зоны имплантации, сохранению его недостаточной стабильности на начальных стадиях регенерации [15]. Оптимальное время гелеобразования и полного отверждения должно быть ограничено с учетом требований комфортности: от 5–10 минут до 1–2 часов в зависимости от способа применения [16]. Кроме того, скорость отверждения напрямую влияет на микроструктуру материала, показатели наполнителя и, как полагают, на его биодеградацию и остеоинтеграцию [17].

Таким образом, цель настоящей работы – провести комплексное сравнение эффективности трёх металлорганических катализаторов (ЭГО, CAT 22 и CAT 20A) в системе СКТН-Г/аэросил А-175 по следующим параметрам:

1) кинетика отверждения (полное время отверждения);
2) термостабильность получаемых эластомеров;
3) физико-химический анализ экстрактов.

Полученные данные способствуют обоснованию выбора наиболее перспективного катализатора для создания безопасных остеопластических материалов на основе силоксановых каучуков, пригодных для клинического применения.

МЕТОДЫ

Материалы:

- Полимерная матрица: СКТН-Г (мол. масса 20 000 г/моль, ТУ 2226-001-47595433–2002) – АО «Казанский завод синтетического каучука».
- Наполнитель: аэросил А-175 (удельная поверхность 175 м²/г) – ООО «РоссПолимер».

Катализаторы:

- 2-этилгексаноат олова (ЭГО) – ООО «Синотех»;
- 2-этилгексаноат висмута (CAT 22) – ООО «Синотех»;
- неодеканоат висмута (CAT 20A) – ООО «Синотех».

Приготовление композитов

Композиты готовили при соотношении:

- СКТН-Г – 100 мас. ч.;
- Аэросил А-175 – 20 мас. ч.;
- Катализатор – 1, 2, 4 мас. ч.

Композиционные смеси получали путем растирания компонентов в фарфоровой ступке до достижения однородной структуры. Время отверждения определяли по времени «отлипа» (время, когда поверхность перестаёт липнуть). Для термического анализа использовали термогравиметрический анализатор (TGA) в атмосфере азота (скорость нагрева 10 ºС/мин. в интервале 20–300 ºС).

В рамках настоящей работы биологическая оценка биосовместимости не проводилась. Однако физико-химический анализ водных экстрактов (pH, показатель преломления) показал отсутствие выраженного выщелачивания компонентов, что позволяет рассматривать разработанные композиты как надежно пригодные для биологических испытаний в соответствии с ISO 10993.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние типа и концентрации катализатора на время отверждения

Экспериментальные данные по составу композиций и времени их отверждения при нормальных условиях (н.у.) представлены в виде гистограммы (рис. 2) и линейного графика (рис. 1). Анализ позволил оценить эффективность трёх типов катализаторов – ЭГО, CAT 22 и CAT 20 A – при фиксированных концентрациях (1, 2 и 4 мас.ч.) и выявить закономерности изменения времени отверждения в зависимости от концентрации.

Сравнительный анализ времени отверждения

На рисунке 1 представлено влияние концентрации катализатора на время отверждения при комнатной температуре (н.у.) и 40 ºС.

Рисунок 1 – Зависимость времени отверждения от концентрации катализатора при н.у.: 1 – ЭГО, 2 – CAT 22, 3 – CAT 20A

Figure 1 – Curing time dependence on catalyst concentration at standard conditions: 1 – EGO, 2 – Catalyst 22, 3 – Catalyst 20A

На рисунке 2 изображено сравнение времени отверждения при фиксированных концентрациях (1, 2 и 4 мас.ч.) для тех же катализаторов.

Данные гистограммы (рис. 2):

При концентрации 1 мас.ч.:

- - ЭГО: 95 мин
- - CAT 22: 90,2 мин
- - CAT 20 A: 42 мин → в 2,26 раза быстрее ЭГО

При концентрации 2 мас.ч.:

- - ЭГО: 69 мин
- - CAT 22: 68,8 мин
- - CAT 20 A: 22 мин → в 3,14 раза быстрее ЭГО

При концентрации 4 мас.ч.:

- - ЭГО: 48 мин
- - CAT 22: 23,3 мин → в 2,06 раза быстрее ЭГО
- - CAT 20 A: 7,13 мин → в 6,73 раза быстрее ЭГО.

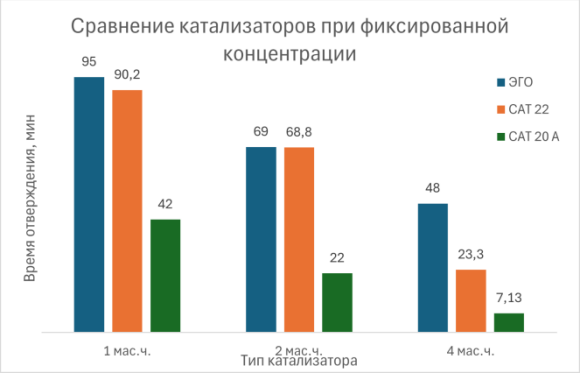


Рисунок 2 – Сравнение времени отверждения при фиксированных концентрациях (1, 2 и 4 мас.ч.)

Figure 2 – Comparison of curing time at fixed concentrations (1, 2, and 4 parts by weight)

Влияние температуры:

Как показывают дополнительные эксперименты (не отражены в данных графиков, но упомянуты в предыдущих результатах), при повышении температуры до 40 ºС время отверждения всех систем снижается в 2–4 раза, что согласуется с общими законами кинетики химических реакций.

Для практического использования, где важна скорость отверждения, рекомендуется применять CAT 20 A в концентрации 4 мас.ч. – это обеспечит минимальное время отверждения без потери качества материала.

Использование ЭГО целесообразно при необходимости контролируемого, плавного отверждения или при ограниченной доступности других катализаторов.

CAT 22 занимает промежуточное положение – он эффективнее ЭГО, но уступает CAT 20 A по скорости.

Кинетика отверждения

Наиболее быстрое отверждение наблюдалось при использовании неодеканоата висмута (CAT 20A) – при содержании 2–4 мас. ч. время отверждения составляло 20–30 минут. При увеличении концентрации катализатора свыше 4 мас. ч. время отверждения увеличивалось, что объясняется избыточным количеством активных центров, приводящим к дестабилизации растущих полимерных цепей и снижению эффективности сшивания [5].

Катализатор CAT 22 показал схожие результаты, но с небольшим замедлением (30–40 мин). Применение ЭГО потребовало 60–90 мин для полного отверждения, что соответствует литературным данным о более медленной активности оловянных систем в холодновулканизируемых композициях.

Термическая стабильность

На рисунке 3 представлены термограммы композитов с различными катализаторами.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВИСМУТ- И ОЛОВООРГАНИЧЕСКИХ КАТАЛИЗАТОРОВ В СИНТЕЗЕ БИОСОВМЕСТИМЫХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ОСТЕОПЛАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

Анализ термогравиметрических кривых показывает, что интенсивная потеря массы фиксируется у композиции, содержащей катализатор CAT 20A при 310 ºС (кривая 1), далее следует образец 2 с катализатором CAT 22при температуре 295 ºС.

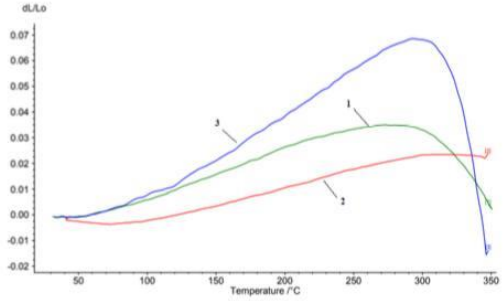


Рисунок 3 – Термогравиметрические кривые композиты СКТН-Г/аэросил А-175, отвержденные различными катализаторами при содержании катализатора 4 мас.ч.: 1 – CAT 20A, 2 – CAT 22, 3 – ЭГО

Figure 3 – Thermogravimetric curves of composites SKTN-G/aerosil A-175 cured with different catalysts at catalyst content of 4 wt parts 1 – CAT 20A, 2 – CAT 22, 3 – EGO

Завершает этот ряд образец 3 с катализатором ЭГО, у которого наивысшая скорость потери массы начинается при температуре 285 ºС. При этом ход кривых скорости потери массы не одинаков. Так, наивысшая скорость потери массы наблюдается для образца 3 с катализатором ЭГО пик при 285 ºС, далее следует образец 1, содержащий катализатор CAT 20A пик при 310 ºС, завершает этот ряд образец 2, содержащий катализатор CAT 22 пик при 295 ºС. Это указывает на более высокую термическую стабильность полимерной сетки при использовании неодеканоата висмута, что может быть обусловлено более полным протеканием процесса конденсационного сшивания, а также меньшей летучестью продуктов или элементов катализатора. Максимальная потеря массы для всех образцов наблюдается в диапазоне 250–350 ºС, что соответствует деструкции органической массы матрицы, а остаточная часть, содержащая фрагменты кремния, деградирует при 800 ºС (~20–25 %).

Физико-химический анализ экстрактов

В рамках настоящей работы биологическая оценка биосовместимости композитов не проводилась. Однако в целях предварительной оценки химической стабильности и потенциального риска выщелачивания активных или токсичных компонентов был выполнен физико-химический анализ водных экстрактов, полученных после 24-часовой инкубации образцов при температуре 37 ºС. В качестве ключевых параметров были измерены показатель pH и показатель преломления – они отражают степень изменения состава среды под воздействием материала и могут косвенно свидетельствовать об его биологической инертности.

Таблица 1 – Характеристика водных экстрактов ПКМ / Table 1 – Characteristics of Aqueous Extracts of PCM

ПКМ с катализатором:	Катализатор, мас.ч.	pH	n
CAT-20A	1	6,0	1,331
	2,5	6,0	1,332
	4	6,0	1,331
CAT-22	1	6,0	1,332
	2,5	6,0	1,332
	4	6,0	1,331
ЭГО	1	6,0	1,331
	2,5	6,0	1,331
	4	6,0	1,331
Дистиллированная вода	–	7,0	1,331

ОБСУЖДЕНИЕ

Все три катализатора демонстрируют обратную зависимость времени отверждения от концентрации – с ростом содержания катализатора время отверждения снижается.

Однако характер этой зависимости различен:

• ЭГО и CAT 22 наблюдается монотонное снижение времени отверждения вплоть до 7 мас.ч., что указывает на отсутствие оптимального предела активности в исследованном диапазоне.

• CAT 20 A наблюдается экстремум: минимальное время отверждения достигается при 4 мас.ч. (7,13 мин), после чего при дальнейшем увеличении концентрации (5 и 7 мас.ч.) время отверждения начинает расти. Это может свидетельствовать о насыщении системы, деградации активных центров или изменении реологических свойств композиции при избытке катализатора.

CAT 20 A является наиболее эффективным катализатором – он обеспечивает минимальное время отверждения при оптимальной концентрации 4 мас.ч., что делает его предпочтительным для применения в условиях, где требуется высокая скорость процесса.

Тип материала

Все композиции, включая образец 3 (ЭГО), были приготовлены с одинаковым содержанием аэросила А-175 – 20 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Несмотря на это, образец, отверждённый ЭГО, продемонстрировал менее однородную структуру и пониженную упругость по сравнению с композитами, отверждёнными в присутствии висмутовых катализаторов CAT 22 и CAT 20A. Это свидетельствует о том, что применение висмутовых катализаторов обеспечивает не только биосовместимость, но и сохраняет технологичность процесса формирования – получаемые материалы обладают однородной текстурой, прозрачностью и хорошей пластичностью перед отверждением, что существенно важно для клинического применения.

Как следует из данных таблицы 1, все экстракты исследуемых композитов (ПКМ с CAT-20A, CAT-22 и ЭГО) при различных концентрациях катализатора (1, 2,5 и 4 мас. ч.) демонстрируют идентичные значения pH = 6,0, что соответствует слабокислой среде. Для сравнения, контрольный образец – дистиллированная вода – имеет pH = 7,0. Несущественное снижение pH до 6,0 может быть связано с незначительным выделением продуктов конденсационного отверждения (например, этанола или уксусной кислоты), однако это значение находится в пределах физиологически допустимого диапазона для водных сред (pH 5,5–7,5) и не представляет опасности для клеточных культур или тканей.

Показатель преломления всех экстрактов варьируется в узком диапазоне: 1,331–1,332, что практически совпадает со значением для дистиллированной воды (1,331). Это указывает на отсутствие значительного выщелачивания низкомолекулярных органических веществ, ионов металлов или других растворимых компонентов из полимерной матрицы. Отсутствие зависимости показателя преломления от содержания катализатора также свидетельствует о высокой степени сшивки полимерной сетки и стабильности композита в водной среде.

Таким образом, полученные данные позволяют заключить, что разработанные композиты характеризуются высокой химической стабильностью в водной среде, а их экстракты не создают условий, способных вызвать раздражение или повреждение тканей. Эти результаты являются необходимым, но все еще недостаточным основанием для их дальнейшего применения как потенциально пригодных для медицинских материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что применение висмутсодержащих катализаторов – неодеканоата висмута (CAT 20A) и 2-этилгексаноата висмута (CAT 22) – значительно ускоряет отверждение силоксановой композиции на основе СКТН-Г/аэросил А-175 по сравнению с продолжительностью действия 2-этилгексаноатома олова (ЭГО). Наиболее эффективным оказался CAT 20A: при дозировке 4 мас. ч. на 100 мас.ч. СКТН-Г. Время отверждения составило 7 минут при температуре нагрева 40 ºС, что в 7 раз быстрее, чем у ЭГО. Дальнейшее увеличение содержания CAT 20A приводит к замедлению процесса, что, вероятно, является причиной нарушения баланса между скоростью сшивания и вязкости системы на ранних стадиях гелеобразования.

Все полученные композиты характеризуются высокой эффектностью и технологичностью формования. Физико-химический анализ водных экстрактов (pH и показатель преломления) не выявил различий между образцами, отверждёнными различными катализаторами, что свидетельствует об отсутствии выраженного выщелачивания компонентов в водную среду. Эти данные согласуются с литературными данными о низкой интенсивности висмутовых связей в полимерных матрицах и позволяют рассматривать обработанные материалы как перспективные материалы для биологических испытаний.

Учитывая сочетание высокой скорости отверждения, технологичности и химической стабильности, композиты на основе CAT 20A представляют особый интерес для применения в качестве остеопластических материалов, особенно с учетом требований быстрого интраоперационного формования и минимизации токсикологических рисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 1. Петров А.А., Кузнецов В.И. Кремнийорганические полимеры в биомедицине // Успехи химии. 2020. Т. 89, № 5. С. 456–470.

2. Сазонов В.В., Ермаков А.Ю. Аэросил в полимерных композитах // Вестник КНИТУ-КХТИ. 2021. № 3. С. 88–94.

3. Wang Y. [et al.]. Bismuth-based catalysts in silicone curing: A green alternative // Green Chem. 2020. V. 22. P. 5890–5898.

4. Харитонов А.П., Смирнов А.В. Низкотоксичные катализаторы гидросилилирования // Журнал прикладной химии. 2022. Т. 95, № 4. С. 601–608.

5. Миронов А.Н. [и др.]. Механизмы отверждения силоксановых каучуков // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25, № 8. С. 112–115.

6. Decker T. [et al.]. Cytotoxicity of organotin compounds in dental materials // J. Biomed. Mater. Res. B. 2018. V. 106, № 3. P. 1021–1028.

7. Вафина А.Р., Фазылова Д.И., Дулмаев С.Э. Современные методы отверждения силоксановых композиций (обзорная статья) // Вестник технологического университета. Казань : Изд-во Казанского национального исследовательского технологического университета. 2021. Т. 24, № 9. С. 42–4.

8. Smith J. [et al.]. Biocompatibility testing of silicone implants // Biomaterials. 2020. V. 232. P. 119701.

9. ГОСТ 270-75. Резины. Метод определения прочности при разрыве и относительного удлинения при разрыве.

10. Казакова Е.Н. [и др.]. Металлоорганические соединения в полимерной химии // Вестник КНИТУ-КХТИ. 2023. № 1. С. 45–52.

11. Архиреева В.В., Холодков В.В. Вестник МИТХТ, 2018 Катализ отверждения силоксанов.

12. Вырва Р. [и др.]. *Дж. Биомед. Матер. Рез. А* , 2013. Цитотоксичность оловянных катализаторов.

13. Шекель К.Г. [и др.]. *Окружающая среда*, 2009. Токсикология висмута.

14. Архиреева В.В. [и др.]. *Полимеры*, 2020. Механизм действия висмутовых катализаторов.

15. Вафина А.Р., Фазылова Д.И., Дулмаев С.Э., Зенитова Л.А. Исследование влияния катализатора на свойства силоксановых композиций медицинского назначения // Вестник технологического университета. Казань : Изд-во Казанского национального исследовательского технологического университета. 2022. Т. 25, № 8. С. 111–115. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_8_111.

16. Бонер М. *Acta Biomater.*, 2010. Постепенное время схватывания в костных цементах.

17. Чжан Ю. [и др.]. *Матер. наук. англ. С*, 2019. Связь микроструктуры и биодеградации

Информация об авторах

А. Р. Вафина – аспирант 4 курса кафедры «Технология синтетического каучука», ассистент кафедры «Инноватики в химической технологии» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»).

Л. А. Зенитова – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии синтетического каучука» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»).

Information about the authors

A.R. Vafina - 4th-year PhD student of the Department of Synthetic Rubber Technology, assistant of the Department of Innovation in Chemical Technology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University" (FSBEI HE "KNRTU").

L.A. Zenitova - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Synthetic Rubber Technology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University" (FSBEI HE "KNRTU").

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 211–216.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 211–216.

Научная статья
2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 678: 625.7/8
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.030 EDN: UBOGSM

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО И ЛАБОРАТОРНОГО СТАРЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРНЫЙ СОСТАВ И ПОКАЗАТЕЛИ БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

Дмитрий Юрьевич Небратенко [1], Егор Олегович Прокудин [2], Андрей Валерьевич Харпаев [3], Анатолий Александрович Новиковский [4], Владимир Анатольевич Петров [5]

[1] Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), Москва, Россия
[1, 5] Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ), Москва, Россия
[2] Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия
[3] Автономная некоммерческая организация «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса» (АНО «НИИ ТСК»), Москва, Россия
[4] ООО «ПИДЖИ», Москва, Россия

[1] nebratenko@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3607-8876
[2] prokudin.egor2112@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0005-8419-1725
[3] bitumbinder@mail.ru, https://orcid.org/0000-0004-2793-6148
[4] novikovskyi@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-7891-6661
[5] petrov.v.an@muctr.ru, https://orcid.org/0000-0003-4292-2575

Аннотация. *В статье представлены данные по термическому и термоокислительному старению битумов нефтяных дорожных вязких окисленных, полученные в ходе их как естественного, так и лабораторного старения с применением исследовательских и стандартизованных методов. Анализ рассмотренных в процессе старения характеристик позволил оценить закономерности изменения химической структуры, элементного состава, молекулярной массы, а также макроскопических и микроскопических характеристик вяжущего. Показано, что естественное старение вызывало более значительные химические изменения битума, чем лабораторное краткосрочное старение, но проявило менее выраженное формирование макромолекулярных структур в ходе реакций окисления. Условия термоокислительного процесса определены основным фактором в ходе естественного старения.*

Ключевые слова: *битумы нефтяные дорожные вязкие окисленные, естественное старение, ИК-спектроскопия, термогравиметрический анализ, RTFOT, PAV.*

Для цитирования: Влияние естественного и лабораторного старения на микроструктурный состав и показатели битумных вяжущих / Д. Ю. Небратенко [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 211–216. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.030. EDN: https://elibrary.ru/UBOGSM.

Original article

EFFECT OF NATURAL AND LABORATORY AGING ON MICROSTRUCTURAL COMPOSITION AND PERFORMANCE OF BITUMEN BINDERS

Dmitry Yu. Nebratenko [1], Egor O. Prokudin [2], Andrey V. Kharpaev [3], Anatoly A. Novikovsky [4], Vladimir A. Petrov [5]

[1] Russian University of Transport (RUT MIIT), Moscow, Russia
[1, 5] D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RHTU), Moscow, Russia
[2] Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia
[3] Autonomous Non-profit Organization "Scientific Research Institute of the Transport and Construction Complex" (ANO "TSK Research Institute"), Moscow, Russia
[4] PIDZHI LLC, Moscow, Russia
[1] nebratenko@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3607-8876
[2] prokudin.egor2112@yandex.ru , https://orcid.org/0009-0005-8419-1725
[3] bitumbinder@mail.ru, https://orcid.org/0000-0004-2793-6148
[4] novikovskyi@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-7891-6661
[5] petrov.v.an@muctr.ru, https://orcid.org/0000-0003-4292-2575

© Небратенко Д. Ю., Прокудин Е. О., Харпаев А. В., Новиковский А. А., Петров В. А., 2026

Abstract. *The article presents data on the thermal and thermo-oxidative aging of petroleum road viscous oxidized bitumen obtained both during their natural and laboratory aging using research and standardized methods. The analysis of the characteristics considered in the aging process made it possible to evaluate the patterns of changes in the chemical structure, elemental composition, molecular weight, as well as macroscopic and microscopic characteristics of the binder. It was shown that natural aging caused more significant chemical changes in bitumen than laboratory short-term aging, but showed less pronounced formation of macromolecular structures during oxidation reactions. The conditions of the thermal oxidation process are determined by the main factor in the course of natural aging.*

Keywords: *petroleum bitumen, viscous, oxidized, natural aging, IR spectroscopy, thermogravimetric analysis, RTFOT, PAV.*

For citation: Nebratenko, D. Yu., Prokudin, E. O., Kharpaev, A. V., Novikovsky, A. A. & Petrov, V. A. (2026). Effect of natural and laboratory aging on microstructural composition and performance of bitumen binders. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 211-216. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.030. EDN: https: //elibrary.ru/UBOGSM.

ВВЕДЕНИЕ

Органические вяжущие материалы играют определяющую роль в обеспечении работоспособности дорожных покрытий на всей территории Российской Федерации и одновременно являются одной из основных причин недопустимо низких сроков службы асфальтобетонных одежд даже в тех случаях, когда обеспечена требуемая капитальность дорожной одежды, надежный водоотвод и устроена трещинопрерывающая прослойка под асфальтобетонным покрытием [1].

В России на дорожных объектах различного уровня подчинения разрешены к применению несколько типов вяжущих. Но, несомненно, наибольшее распространение имеют нефтяные дорожные битумы. Применяются они в подавляющем большинстве случаев для устройства слоев дорожных одежд [2, 3]. Областью применения полимерно-битумных вяжущих являются, прежде всего, верхние слои и слои износа. Модифицированные вяжущие чаще всего находят точечное применение на особо важных и грузонапряжённых объектах в южных регионах страны. Традиционные битумы существенно превосходят модифицированные и полимерно-битумные вяжущие по объемам производства и применения, при этом последние на текущий момент составляют порядка 15–20 % от общего объема вяжущих, применяемых в России.

Термопластичная природа битумов способствует достаточно быстрому накоплению в них необратимых деформаций, проявляющихся на покрытии в виде волн и колеи. Они образуются вследствие многократного воздействия знакопеременных нагрузок от колес автомобилей, что интенсифицируется в теплое время года, когда покрытие нагревается до 60 ºС и выше [4, 5, 6]. При этом необходимо осознавать, что по причине того, что теплостойкость окисленных битумов не превышает 50 ºС, а трещиностойкость – не ниже минус 20 ºС, продольные и поперечные трещины разного генезиса появляются на асфальтобетонных покрытиях практически всегда. Природно-климатические условия в различных регионах РФ различны, но температуры наиболее холодных суток на 96 % ее территории находятся в пределах от минус 25 ºС до минус 67 ºС [7, 8]. Обеспечить отсутствие поверхностных трещин при условии применения в качестве вяжущего такого достаточно хрупкого материала, каковым является битум нефтяной дорожный вязкий окисленный, и при таких жёстких условиях эксплуатации, как в России, практически невозможно.

Поэтому крайне важной представляется оценка возможности достоверного ускоренного лабораторного моделирования показателей вяжущих, в перспективе от нескольких месяцев до десятков лет, в сравнении с данными наблюдения указанных процессов в естественных природно-климатических условиях различных регионов Российской Федерации.

В настоящее время в мире продолжается поиск наиболее совершенных методик, способных в лаборатории ускоренно моделировать изменения свойств битумных вяжущих материалов, которые происходят как на стадии приготовления асфальтобетонных смесей и асфальтобетона, так и в процессе эксплуатации дорожного покрытия [9]. Учитывая длительность процессов старения во время эксплуатации автомобильных дорог, были разработаны методы испытания тонкой пленки во вращающейся печи (RTFOT) для имитации кратковременного старения во время производства, транспортировки и укладки асфальтобетонных смесей, а также метод старения под действием давления и температуры (PAV), воспроизводящий долговременное старение вяжущих в условиях эксплуатации автодорог.

При высоких температурах воздуха поверхность асфальтобетонного покрытия аккумулирует тепло вследствие низкой теплопроводности его компонентов. Например, при значении температуры воздуха в диапазоне от 30 ° до 40 ºС, температура дорожного покрытия способна подниматься до 60–70 ºС [10]. Это демонстрирует неоднородность условий естественного старения, что приводит к существенной разнице с условиями лабораторного моделирования, поскольку стандартные протоколы PAV-старения используют постоянное воздействие 100 ºС, что констатирует разницу температур на уровне 30–40 ºС от фактических тепловых режимов дорожного покрытия. Необходимо также учитывать, что лабораторные методологии старения не учитывают динамические колебания температур, присущие естественной среде из-за суточных и сезонных циклов. Еще более важно указать, этот протокол ускоренного PAV-старения фокусируется исключительно на условиях повышенной температуры и давления и вынуждено пренебрегает возможным синергетическим влиянием множества факторов окружающей среды, встречающихся во время реальной эксплуатации дорожного покрытия. Так, было обнаружено, что солнечный свет в широком диапазоне длин волн способствует ускоренному старению битума [11]. Кроме того, было показано, что под воздействием ультрафиолетового излучения происходит перестройка и разрыв химических связей компонентов битумного вяжущего, приводящих к реакциям окисления и деструкции [12, 13]. Очевидно, что, по сравнению с вариантами лабораторного моделирования процессов старения, факторы естественного старения фактически являются более сложными и многообразными. При этом важно отметить, что при разной интенсивности движения автотранспорта, экранирующего дорожную поверхность, воздействие указанных факторов оказывается весьма сложно прогнозируемым, что еще более усложнит задачу исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе использовались битумы

нефтяные дорожные вязкие марки БНД 70/100, крупнотоннажно выпускаемые АО «ГАЗПРОМНЕФТЬ – МОСКОВСКИЙ НПЗ», соответствующие ГОСТ 33133-2014 (табл. 1).

Таблица 1 – Показатели битума нефтяного дорожного вязкого БНД 70/100

Table 1 – Indicators of petroleum bitumen road viscous BND 70/100

Наименование показателя	Метод испытаний	Норма по ГОСТ	Факт. значение
Глубина проникания иглы при 25 ºС, 0,1 мм	ГОСТ 33136	От 71 до 100	81
Температура размягчения по кольцу и шару, ºС	ГОСТ 33142	не ниже 47	49,0
Растяжимость при ºС, см	ГОСТ 33138	не менее 37	3,7
Температура хрупкости, ºС	ГОСТ 33143	не выше –18	–19
Температура вспышки, ºС	ГОСТ 33141	не ниже 230	280
Изменение массы образца после старения, %	ГОСТ 33140	не более 0,6	0,3
Изменение температуры размягчения после старения, ºС	ГОСТ 33140	не более 7	6,8

Для лабораторного моделирования старения битума были использованы стандартные методики: ГОСТ 33140-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT)» и ГОСТ Р 58400.5-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод старения под действием давления и температуры (PAV)».

В соответствии с вышеуказанными стандартами, битум изначально заливался в стеклянные колбы, которые затем, при температуре 163 ºС, вращались в закрытой установке в течение 85 минут. Далее кратковременно состаренное в тонкой плёнке вяжущее помещалось в толстостенный металлический сосуд на 20 часов при 100 ºС и давлении 2,1 МПа.

Естественное старение битумов проводилось в Московской области на 55°37′41″ с. ш. В качестве подложки были использованы гладкие керамические плитки (рис. 1).

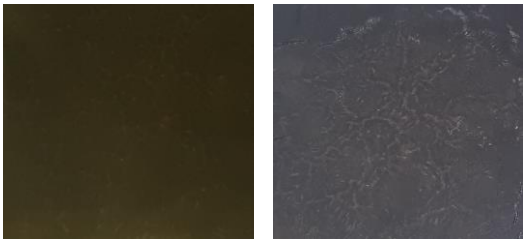


Рисунок 1 – Фотографии битумных пленок: слева – исходные, справа – после 91 дня естественного старения

Figure 1 – Photographs of bitumen films: on the left - initial, on the right - after 91 days of natural aging

Все образцы были установлены на стеллажах на высоте 5 м над уровнем земли. Толщина пленки битумных образцов составляла 3,0 мм, что соответствует толщине слоя в ходе лабораторных процедур старения. Все образцы для естественного старения располагались горизонтально на открытом воздухе, обеспечивая непосредственное воздействие прямых солнечных лучей и достаточное расстояние от строений, деревьев и других объектов, которые могли бы создавать затемнение или локальные микроклиматические эффекты. Такое расположение гарантировало, что процесс старения, прежде всего, обусловлен региональными климатическими условиями. Исходя из варьирующейся облачности [14], температурных условий, времени восхода и захода солнца [15] и в соответствии с методикой [16] длительность эффективного солнечного дня для расчета была принята равной 12 часам [17]. Таким образом, образцы непрерывно подвергались естественному солнечному старению 91 сутки или 1092 часа [13].

В ходе последующего анализа образцов вяжущего были применены современные инструментальные методы исследований: ИК-спектроскопия, гельпроникающая хроматография, ЯМР ^{1}H-спектрометрия, термогравометрический анализ. Использовался ИК-спектрометр «Bruker ALPHA II», «Bruker Corporation» (USA) [18], спектры ЯМР ^{1}H регистрировали на спектрометре «BrukerAFR-300» в $CDCl_3$, химические сдвиги определяли относительно тетраметилсилана. Среднечисленная молекулярная масса (M_n), среднемассовая молекулярная масса (M_w), а также индекс полидисперсности (D) рассчитывались известным образом [19]. Теплофизические характеристики исследуемых образцов определены на приборе DSC и TGA 840e с программным обеспечением STARe «Mettler Toledo». Калибровка модуля DSC проводилась по индию и цинку [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методология ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в последние годы все чаще используется при химическом анализе структурных компонентов битумных вяжущих, позволяя точно определять химическое окружение атомов водорода в исследуемых образцах.

Методом ЯМР-спектроскопии может быть получена информация о химических сдвигах, константах спин-спинового взаимодействия и интегральные значения, которые соответствуют положениям поглощения, характеру расщепления пиков и интенсивности поглощения соответственно. Эти спектральные характеристики позволили определить положения атомов водорода вдоль углеродных цепей, тем самым определить химическую структуру анализируемого образца [21]. Атомы водорода, непосредственно связанные с ароматическими атомами углерода, обозначаются как H_A. H_α обозначает водород, присоединенный к α-атомам углерода, соседствующим с ароматическими кольцами. H_β обозначает водород на β-атомах углерода ароматических колец, а также группы CH_2 и CH вне β-положений. H_γ представляет собой водород на γ-атомах углерода ароматических колец и группах CH_3 вне γ-положений. Путем интегрирования пиков в соответствующих спектральных областях H_A, H_α, H_β и H_γ было количественно определено содержание этих четырёх типов водорода (рис. 2).

Результаты анализа спектров показали, что значения H_A и H_α после завершения долговременного старения битума несколько снизились, что указывает на протекание дегидрогенизационных и конденсационных процессов на ароматических кольцах, при этом число заместителей ароматических колец уменьшается, что согласуется с ранее проведенными исследованиями [21]. После долгосрочного PAV-старения

содержание H_A и H_α в состаренном битуме, по сравнению с кратковременно состаренным вяжущим, снизилось на 11,8 % и 9,8 % соответственно, тогда как содержание H_β увеличилось на 16,4 %.

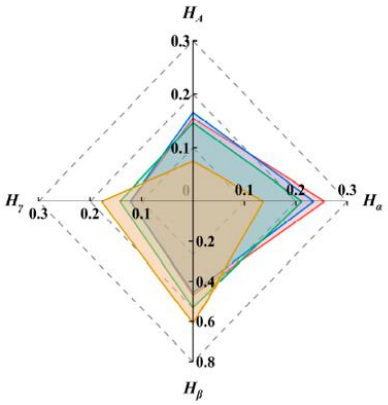


Рисунок 2 – Содержание типов атомов водорода в битумном вяжущем: красный – исходное, синий – после RTFOT, зеленый – после PAV, желтый – после естественного старения

Figure 2 – The content of hydrogen types in bitumen drying: red - initial, blue - after RTFOT, green - after PAV, yellow - after natural aging

Указанными данными проиллюстрировано, что в ходе естественного термоокислительного старения компоненты битума претерпевают заметно выраженные изменения, что существенно влияет на его макроскопические характеристики. Это в очередной раз подтверждает, что термоокислительное старение является основным фактором, приводящим к изменению химической структуры битумных вяжущих.

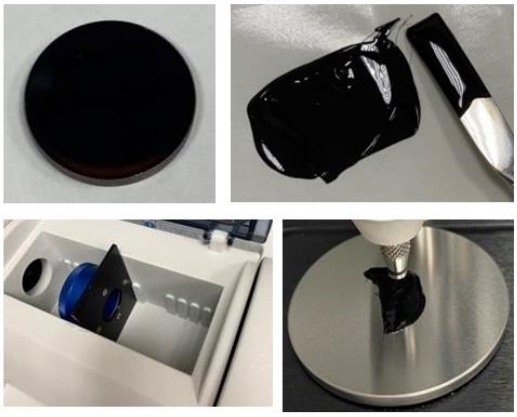


Рисунок 3 – Варианты пробоподготовки битумных образцов для исследования методом ИК-Фурье спектрометрии: верхние фото – растворный, нижние – пленочный (пояснения в тексте)

Figure 3 – Variants of sample preparation of bitumen samples for investigation by IR-Fourier spectrometry: upper photo - solution, lower - film (explanations in the text)

Для исследования изменений химической структуры применялся метод ИК-Фурье спектрометрии. Он позволил непосредственно фиксировать образование специфических химических функциональных групп, которые являются прямыми маркерами окислительного старения битума.

Для регистрации ИК-спектров образец битумного вяжущего может быть подготовлен одним из двух способов: в виде раствора битума в толуоле с последующим нанесением на окно из бромида калия или в виде тонкой пленки, наносимой на алмазную призму ИК-спектрометра (рис. 3).

ИК-спектры образцов битумного вяжущего снимались на разных стадиях лабораторного и естественного старения (рис. 4).

При анализе спектров ключевое внимание уделяется области поглощения карбонильных групп (C=O), которые образуются в результате реакций окисления. Аналитически это выражается в расчёте площади карбонильного пика в диапазоне частот от 1600 $см^{-1}$ до 1820 $см^{-1}$ [22].

Для количественной оценки процесса окисления использовался показатель роста площади карбонильного пика (CA), определяемый как разница между CA при конкретном состоянии старения и CA в эталонном состоянии, например после кратковременного старения (RTFOT). Помимо карбонилов, анализировались изменения в сульфоксидной области (υ ~1032 $см^{-1}$), что даёт более полную картину химических превращений [23].

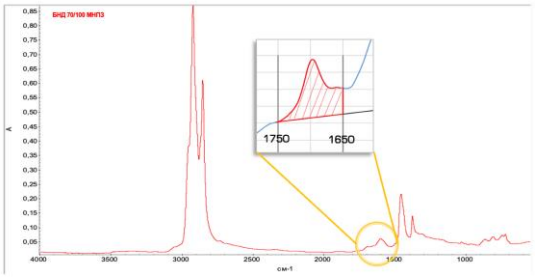


Рисунок 4 – Характерный ИК-спектр битум нефтяного дорожного вязкого окисленного БНД 70/100

Figure 4 – Typical IR spectrum of viscous oxidized petroleum road bitumen BND 70/100

В ходе расшифровки полученного ИК-спектра (рис. 4) установлено наличие характерных для битумов интенсивных полос поглощения в области 2852 и 2921 см-1 (валентные колебания CH в группах CH_2), свидетельствующих о значительном количестве в битуме предельных углеводородов, парафинов, масел. В области 1200–600 $см^{-1}$ отмечены полосы поглощения, характерные для ароматических углеводородов, а также внеплоскостные деформационные колебания C-H в области 800–650 $см^{-1}$ [24].

Существенной интенсивностью отличаются полосы пропускания в выделенном на рисунке 4 диапазоне 1650–1750 $см^{-1}$. Они характеризуют присутствие кислородсодержащих соединений. Так, например, это могут быть валентные колебания непредельных C=C связей в основном циклического строения, и прежде всего бензольных колец. Большая полуширина и сложная структура свидетельствуют о наличии в составе битума сложных многоатомных ароматических соединений – асфальтенов. Частотный пик при 1688 $см^{-1}$ характерен для карбонильных и карбоксильных C=O групп, возникающих при окислении органических компонентов битума как на стадии его производства, так и в ходе хранения и эксплуатации [24, 25].

Битумы, являясь многокомпонентной смесью углеводородов, состоят из соединений с различной молекулярной массой, что обуславливает широкое молекулярно-массовое распределение. Кроме того, в

ходе протекания термоокислительного старения, внешние факторы вызывают непрерывные химические реакции между этими соединениями и кислородом воздуха, что провоцирует образование в итоге относительно низкомолекулярных веществ и изменение молекулярно-массового профиля битумного вяжущего. Полученные данные гельпроникающей хроматографии битумов, подвергнутых различным типам старения, позволили проанализировать изменение молекулярных характеристик битумного вяжущего. Значения среднечисленных (M_n) и среднемассовых (M_w) молекулярных масс, а также индекс полидисперсности (D) приведены в таблице 2.

Анализ представленных в таблице 2 данных подтверждает известные зависимости изменения молекулярной массы органических веществ в ходе их окислительного старения. Переход низкомолекулярных масляных компонентов в смолы, а смол – в асфальтены проявляется в увеличении фактических значений молекулярных масс, которые достигают максимальных величин после долгосрочного лабораторного старения.

Важно отметить, что при долговременном лабораторном старении увеличение молекулярной массы битума заметно выше, чем в ходе естественного старения.

Можно отметить, что представленный в таблице 2 коэффициент полидисперсности увеличивается для битума состаренного, естественным, кратковременным и долгосрочным термоокислительным старением в сравнении с исходным на 2,9 %, 9,7 % и 7,5 % соответственно. Более высокий коэффициент полидисперсности соответствует снижению содержания мальтенов, что ухудшает коллоидную стабильность битумных вяжущих [21, 23].

Таблица 2 – Параметры битума при различных режимах старения

Table 2 – Bitumen parameters under different aging conditions

Наименование показателя	CA, у.е.	M_w	M_n	D
Исходный битум БНД 70/100	1,049	1489	532	2,80
Битум после краткосрочного старения (RTFOT)	1,287	1560	542	2,88
Битум после долговременного старения (PAV)	1,461	1872	610	3,07
Битум после старения в естественных условиях	1,312	1763	586	3,01

Термогравиметрический анализ образца битума нефтяного дорожного вязкого окисленного марки БНД 70/100 показывает, что основная фаза термоокислительной деструкции находится в интервале от 220 до 350 ºС и происходит в один этап [25, 26] (рис. 5).

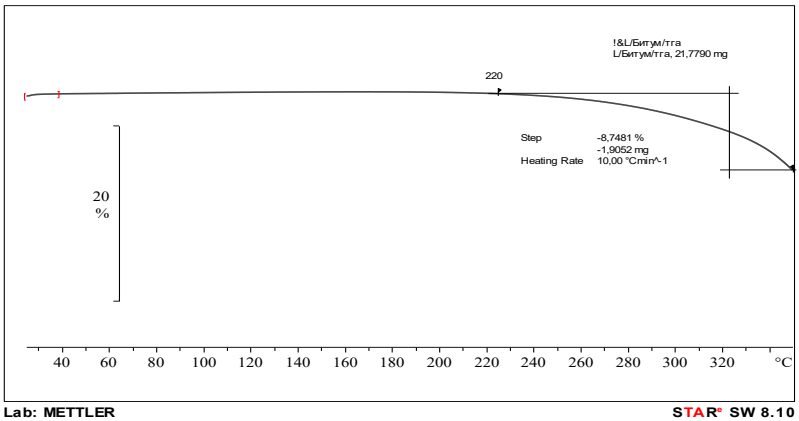


Рисунок 5 – ТГА термограмма исходного битума БНД 70/100 в среде азота

Figure 5 – TGA thermogram of used bitumen BND 70/100 in a nitrogen environment

Это свидетельствует о достаточно высокой термостабильности битума в температурном диапазоне, соответствующем нормируемому интервалу производства асфальтобетонных смесей (не выше 180–200 ºС) и эксплуатации автомобильных дорог на территории России (от минус 67 до плюс 80 ºС). Начало глубоких изменений химического состава с образованием новых конденсированных высокомолекулярных соединений, а также активном кислородном старении исследуемого образца (потеря массы 8,7 %) начинается после 220 ºС. При последующем нагревании до температуры 450 ºС образуется 16–18 % остатка, термостабильного в инертной атмосфере, что хорошо согласуется с данными ранее проведенных исследований [22]. При этом, как показывают данные многолетних наблюдений, указанные химические изменения начинают проявляться в виде ухудшений свойств покрытий только спустя значительно более продолжительные сроки эксплуатации дорог, чем период проведения данного исследования [9, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа полученных данных об изменении свойств битумов нефтяных дорожных вязких марки БНД 70/100 в ходе различных вариантов лабораторного и естественного старения установлено, что в течение первых 91 суток с момента укладки покрытия солнечная радиация провоцирует достаточные серьезные изменения химической структуры битума, вызванные термодеструкцией. Аналогичные изменения выявлены и для случаев кратковременного и долгосрочного термоокислительного старения, проведенных в лабораторных условиях.

Долгосрочное старение битума приводит к уменьшению содержания атомов водорода, непосредственно связанных с атомами углерода ароматического кольца, и атомов водорода, присоединенных к α-атомам углерода, по сравнению с кратковременно состаренным вяжущим, на 11,8 % и 9,8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кретов В.А. [и др.]. Анализ баланса рынка битумных вяжущих с учетом сырьевых ограничений // ДОРОГИ И МОСТЫ. 2025. № 2(54). С. 9–26. DOI: 10.70991/1815-896X-2025-2-54-09-26.

2. Быстров Н.В. Методы испытаний дорожных битумов: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся

по специальности "Автомобильные дороги и аэродромы" направления транспортное строительство / Н.В. Быстров. М. : Авторская книга, 2012. 159 с. ISBN 978-5-4431-0014-2.

3. Абдуллин А.И. Битумные вяжущие : учеб. пособие / А.И. Абдуллин, Е.А. Емельянычева, Т.Ф. Ганиева, М.Р. Идрисов. Казань : КНИТУ. 2012. 99 с.

4. Александров А.С. Анализ причин колееобразования на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления / А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л. Калинин // Вестник СибАДИ. 2019. № 6 (70). С. 718–745.

5. Поздняков М.К. Исследование сопротивляемости асфальтобетона колееобразованию // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2009. № 3. С. 16–20.

6. Mozhovyi V.V. Asphalt concrete pavement working conditions on ascents and descents of highways / V.V. Mozhovyi, O.V. Kushnir, L.V. Levkivska, O.M. Kutsman, I.I. Hrynchak // World science. 2024. № 3 (85). С. 1–12.

7. Печеный Б.Г. Битумы и битумные композиции / Б.Г. Печеный. М. : Химия, 1990. 256 с. : ил. ISBN 5-7245-0542-8.

8. Гохман Л.М. Особенности структуры компонентов дорожных битумов / Л.М. Гохман, Е.М. Гурарий // Химия и технология топлив и масел. 1991. № 12. С. 23–24.

9. Симчук Е.Н., Харпаев А.В., Рожков И.М. Современные подходы к моделированию старения битумных вяжущих материалов в лабораторных условиях // Дороги и мосты. 2022. № 2 (48). С. 274–306.

10. Исенбулатова Д.Х., Ефремов И.А., Лушников Н.А., Алексиков С.В., Небратенко Д.Ю. Влияние состава модифицированных и полимерно-битумных вяжущих на технические показатели щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей // Инженерно-строительный вестник Прикаспия 2024. № 4 (50). С. 39–44. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-50-4-39-44.

11. Guan M., Guo M., Liu X., Du X., Tan Y. Effect of Multifactor Coupling Aging on Rheological Properties of Asphalt Binders and Correlations between Various Rheological Indexes // Journal of Materials in Civil Engineering. 2024. Vol. 36. № 5. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-17116.

12. Zhao Y. [et al.]. Aging characteristics and microscopic mechanisms of SBS asphalt based on coupled light–heat–water aging // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 456. P. 139190.

13. Дужий П.А. [и др.]. О влиянии УФ-излучения на реологические свойства СБС-блоксополимеров для модификации вяжущих и асфальтобетонов // Южно-Сибирский научный вестник. 2025. № 5(63). С. 45–53.

14. Центральное УГМС – Федеральное государственное бюджетное учреждение [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://cugms.ru/.

15. Таблица восходов и заходов солнца, долгота дня в Москве [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://timewek.ru/citysun.php?vYR=2024&sID=77&sMOD=1&mID=8.

16. Оценка климатических условий : учеб.-метод. пособие / С.Н. Смирнова. Электронные данные. Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2024. 62 с. URL: https://science.volgatech.net/editorial-publishing-center/izdaniya/ uchebnye - posobiya/2024/ SmirnovaSN_oku.pdf ISBN 978-5-8158-2398-3.

17. Chairperson, Publications Board World Meteorological Organization (WMO), Guide to Meteorological Instruments and methods of Observation, accessed April 29 2025. https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf.

18. Сильверстейн Р. Спектрометрическая идентификация органических соединений / Р. Сильверстейн, Ф. Вебстер, Д. Кимл ; пер. с англ. проф., д.х.н. Н.М. Сергеева и к.х.н. Б.Н. Тарасевича. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 557 с.

19. Туторский И.А. Химическая модификация эластомеров / И.А. Туторский, Е.Э. Потапов, А.Г. Шварц. М. : Химия, 1993. 304 с.

20. Ситникова В.Е., Пономарева А.А., Успенская М.В. Методы термического анализа. СПб. : ИТМО. 2021. 152 с.

21. Zhang S. [et al.]. Investigation of anti-aging mechanism of multi-dimensional nanomaterials modified asphalt by FTIR, NMR and GPC // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 305. P. 124809.

22. Li P. [et al.]. FTIR quantitative analysis method and new exploration of rheological parameters of aged asphalt // Journal of Huazhong University of Science and Technology Natural Science Edition. 2018. Vol. 46. P. 34–39.

23. Yan Y. [et al.]. Application of Infrared Spectroscopy in Prediction of Asphalt Aging Time History and Fatigue Life // Coatings. 2020. Vol.10. P. 959. DOI: 10.3390/coatings10100959.

24. Аюпов Д.А. [и др.]. Исследование особенностей взаимодействия битумов с полимерами // Известия КазГАСУ. Казань. 2011. № 1 (15). С. 140–145.

25. Ren S. [et al.]. Chemo-physical characterization and molecular dynamics simulation of long-term aging behaviors of bitumen // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 302. P. 124437.

26. Фролов И.Н. [и др.]. Исследование битума методом дифференциальной сканирующей калориметрии: интерпретация тепловых эффектов // Нефтяная наука и технологии. 2019. № 37(4). С. 417–424. DOI: 10.1080/10916466.2018.1550499.

Информация об авторах

Д. Ю. Небратенко – к.х.н., доцент кафедры автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты, Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), доцент кафедры химии и технологии высокомолекулярных соединений, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ).

Е. О. Прокудин – магистрант кафедры «Дорожно-строительные материалы и химические технологии», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ).

А. В. Харпаев – руководитель лаборатории, Автономная некоммерческая организация «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса» (АНО «НИИ ТСК»).

А. А. Новиковский – директор по технологиям, ООО «ПИДЖИ».

В. А. Петров – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой химии и технологии высокомолекулярных соединений, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева (РХТУ).

Information about the authors

D.Y. Nebratenko - PhD, Associate Professor of the Department of Automobile Roads, Airfields, Foundations and Foundations, Russian University of Transport (RUT MI-IT), associate Professor of the Department of Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RHTU).

E.O. Prokudin - Master's student of the Department of Road Construction Materials and Chemical Technologies, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI).

A.V. Kharpaev - Head of the Laboratory, Autonomous Non-profit Organization Scientific Research Institute of Transport and Construction Complex (ANO NII TSK).

A.A. Novikovsky - Director of Technology, PIDZHI LLC.

V.A. Petrov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology high-molecular compounds, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RCTU).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 217–226.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 217–226.

Научная статья
2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 628.3
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.031 EDN: BFYPYR

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО НЕФТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПЛЕНОК УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Карина Ильдаровна Шайхиева [1], Земфира Талгатовна Санатуллова [2], Альберт Анасович Хубатхузин [3], Ринат Марсович Вахидов [4]

[1, 2, 3, 4] Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия
[1] shaykhievak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1188-7885
[2] my@3sanatullova.ru, https://orcid.org/0009-0005-1620-3616
[3] al_kstu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7494-8051
[4] wachidow@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2187-4650

Аннотация. *Исследована возможность использования нативной и модифицированной кожуры мандаринов в качестве альтернативных нефтесорбентов для удаления нефтяных пленок с водной поверхности. Определены некоторые физико-химические показатели нативной высушенной измельченной кожуры мандаринов и фракционный состав последней, используемой в дальнейших экспериментах. Вычислены значения максимального водопоглощения, а также максимальной нефтеемкости кожуры мандаринов по отношению к нефти девонского и карбонового отложений, определенные в статических и динамических условиях. Проведена обработка исследуемых альтернативных сорбционных материалов в потоке высокочастотной емкостной плазмы пониженного давления с варьированием мощности, подводимой к электродам плазмотрона. Приведены преимущества названного способа модификации перед другими методами. Определено, что обработка исследуемого сорбционного материала плазмой пониженного давления способствует некоторому увеличению значений максимальной нефтеемкости и снижению водопоглощения. Методами ИК-Фурье-спектроскопии и диэлектрической проницаемости показано увеличение гидрофобных характеристик корок мандарина за счет обработки плазмой пониженного давления в атмосфере метана, приводящее к увеличению количества метильных и метиленовых группировок на поверхности сорбционного материала. Проведены исследования по удалению нефтяных пленок с водной поверхности нативными и модифицированными образцами мандариновых корок. Показано, что обработка последних высокочастотной плазмой пониженного давления способствует увеличению эффективности удаления нефти с поверхности воды и снижению водопоглощения за счет гидрофобизации поверхности сорбционных материалов. Выявлено, что с увеличением мощности на электродах плазмотрона значения максимальной нефтеемкости и эффективности удаления пленок нефти с водной поверхности увеличиваются, а водопоглощение – уменьшается.*

Ключевые слова: *кожура мандаринов, высокочастотная емкостная плазма пониженного давления, модификация, нефть, разлив на водной поверхности, ликвидация.*

Благодарности: *Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение №10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).*

Для цитирования: Шайхиева К. И., Санатуллова З. Т., Хубатхузин А. А., Вахидов Р. М. Влияние плазменной обработки на сорбционные характеристики альтернативного сорбционного материала по нефти и эффективность извлечения пленок углеводородов с водной поверхности // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 217–226. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.031. EDN: https://elibrary.ru/BFYPYR.

Original article

EFFECT OF PLASMA TREATMENT ON SORPTION CHARACTERISTICS OF AN ALTERNATIVE SORPTION MATERIAL FOR OIL AND EFFECTIVENESS OF REMOVING HYDROCARBON FILMS FROM WATER SURFACES

Karina I. Shaikhieva [1], Zemfira T. Sanatullova [2], Albert A. Khubatkhuzin [3], Renat M. Vakhidov [4]

© Шайхиева К. И., Санатуллова З. Т., Хубатхузин А. А., Вахидов Р. М., 2026

[1, 2, 3, 4] Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
[1] shaykhievak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1188-7885
[2]my@3sanatullova.ru, https://orcid.org/0009-0005-1620-3616
[3] al_kstu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7494-8051
[4] wachidow@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2187-4650

Abstract. *The possibility of using native and modified tangerine peel as alternative oil sorbents for removing oil films from water surfaces was investigated. Some physicochemical properties of native dried crushed tangerine peel and the fractional composition of the latter, used in further experiments, were determined. The values of maximum water absorption, as well as the maximum oil capacity of tangerine peel in relation to oils of Devonian and Carboniferous deposits, determined under static and dynamic conditions, were calculated. The studied alternative sorption materials were processed in a flow of high-frequency capacitive plasma of low pressure with varying power supplied to the plasma torch electrodes. The advantages of this modification method over other methods are presented. It was determined that treatment of the studied sorption material with low-pressure plasma contributes to a slight increase in the values of maximum oil capacity and a decrease in water absorption. Using Fourier transform infrared spectroscopy and permittivity analysis, we demonstrated an increase in the hydrophobic properties of mandarin peels treated with low-pressure plasma in a methane atmosphere, leading to an increase in the number of methyl and methylene groups on the surface of the sorption material. Studies were conducted on the removal of oil films from water surfaces using native and modified mandarin peel samples. It was shown that treatment with high-frequency, low-pressure plasma increases the efficiency of oil removal from the water surface and reduces water absorption due to the hydrophobicity of the sorption material surface. It was found that with increasing plasma torch electrode power, the maximum oil capacity and oil film removal efficiency from the water surface increase, while water absorption decreases.*

Keywords: *mandarin peel, high-frequency, low-pressure capacitive plasma, modification, oil, water spill, cleanup*.

Acknowledgements: *The work was carried out at the expense of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to educational organizations of higher education, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and scientific-pedagogical work to defend doctoral dissertations and perform research (Agreement No. 10/2025-PD-KNRTU dated 12/22/2025).*

For citation: Shaikhieva, K. I., Sanatullova, Z. T., Khubatkhuzin, A. A. & Vakhidov, R. M. (2026). Effect of plasma treatment on sorption characteristics of an alternative sorption material for oil and effectiveness of removing hydrocarbon films from water surfaces. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 217-226. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.031. EDN: https: //elibrary.ru/BFYPYR.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из насущных экологических проблем современности является загрязнение земной и водной поверхности нефтью и продуктами ее переработки. Аварийные разливы углеводородов в результате добычи, транспортировки, переработки, хранения достигли ужасающих размеров. Согласно экспертным оценкам, от 3 до 7 % добываемых углеводородов теряется в результате техногенных аварий [1]. Особенно негативно разливы нефти и нефтепродуктов влияют на водные объекты [2]. В результате проливов нефти и продуктов ее переработки на водную поверхность на последней образуется пленка углеводородов различной площади и толщины в зависимости от количества попавших нефтепродуктов. Определено, что 1 тонна нефти способна загрязнить участок водной поверхности площадью 12 км^2 [3], а 1 дм^3 нефти – привести в негодность 10^6 дм^3 воды, используемой для водопотребления [4].

Кроме загрязнения поверхности и толщи воды, углеводороды нарушают естественный ход протекания биологических процессов в водной среде. Пленка углеводородов в больших количествах, облепляя кожные покровы макрогидробионтов и водоплавающих птиц, нарушают теплообмен последних с окружающей средой, приводя в большинстве случаев к летальным исходам [5]. Кроме того, пленка углеводородов на водной поверхности препятствует проникновению кислорода воздуха в поверхностные слои водоемов и выведению газообразных продуктов жизнедеятельности гидробионтов в атмосферный воздух, что усугубляет жизнедеятельность водных организмов [6].

Все вышесказанное требует безотлагательного извлечения углеводородов в водной поверхности в кратчайшие сроки после разлива углеводородов на водной поверхности. Для удаления пленок нефти с водной поверхности применяют различные группы методов: механический сбор с использованием скиммеров [7, 8], химический с нанесением на пленку углеводородов диспергентов [9], коагулянтов [10] и других химических реагентов; термический, основанный на сжигании пленки углеводородов [11, 12]; различные физико-химические и биологический, основанный на разложении нефтепродуктов консорциумами микроорганизмов [13]. Названным методам больше присущи недостатки, чем достоинства. Так, в частности, например, сбор нефти механическими сборщиками (скиммерами) и сжигание возможны только при наличии толстой пленки углеводородов на водной поверхности. Разложение нефтепродуктов микроорганизмами занимает долгое время, в течение которого легкие фракции углеводородов улетучиваются, загрязняя атмосферу, а тяжелые фракции опускаются в толщу или на дно водоемов. Химические способы лимитированы наличием реагентов в местах аварийных разливах.

Как показывает анализ литературных источников, наиболее эффективный метод, способный извлекать углеводороды с водной поверхности любой толщины является локализация пятна нефти боновыми заграждениями с последующим удалением с использованием нефтесорбентов [14–17]. В настоящее время в качестве последних в мире используются более 200 коммерческих марок. Однако сдерживающим фактором использования последних является высокая стоимость, зачастую в валюте, низкие нефтесорбционные характеристики, а также отсутствие в местах аварийных разливов, когда требуется срочная локализация и удаление углеводородов с водной поверхности.

В связи с вышеизложенным, в настоящее время в мировом пространстве интенсивно исследуются в качестве нефтесорбентов целлюлозосодержащие

отходы от переработки древесной биомассы и сельскохозяйственного сырья [18–20]. Многочисленными статьями и обзорными работами показано, что отходы от переработки сельскохозяйственного сырья, такие как солома [21, 22] и плодовые оболочки зерен [23, 24], сердцевина и обертки початков кукурузы [25, 26], жом сахарной свеклы [27, 28] и багасса сахарного тростника [29] и многие другие отходы проявляют себя как эффективные сорбционные материалы (СМ) для удаления углеводородов с водной поверхности.

Не менее эффективными нефтесорбентами зарекомендовали себя компоненты древесной биомассы, такие как кора [30, 31], листья [32, 33], иголки [33–35], шишки [35]. Высокие сорбционные характеристики по углеводородам нефти показали такие отходы от переработки плодов деревьев, как высушенная кожура бананов [36, 37], апельсинов [38, 39], помело [40] и др. Достоинством названных отходов от переработки фруктов является то, что, в основном, последние образуются в местах переработки фруктовой продукции на перерабатывающих предприятиях, недостатком – низкая эффективность вторичного использования в различных отраслях народного хозяйства, несмотря на широкий спектр биологически активных веществ в их составе. Как правило, кожура фруктов, образующаяся в результате промышленной переработки продукции и потребления населением в большинстве своем сгнивает на полигонах промышленных и бытовых отходов.

Одним из отходов от переработки фруктов деревьев является кожура мандаринов (КМ). Мякоть мандарина также используется для приготовления различных напитков, включая соки, джемы, мармелады, цукаты и другие продукты [41]. В 2025 году объем выращивания мандаринов в мире достиг более 52 млн. тонн и продолжает планомерно увеличиваться [42]. В результате отделения мякоти мандарина в мире ежегодно образуются миллионы тонн кожуры фрукта [41], которые не находят должного применения. В Российской Федерации мандарины выращиваются в южных регионах страны. В связи с вышеизложенным, проводились работы по исследованию КМ в качестве нефтесорбента для удаления пленок нефти с водной поверхности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе в качестве сорбатов применялась нефть девонского и карбонового отложений Тумутукского месторождения, добытых НГДУ «Азнакаевск нефть» ПАО «Татнефть» (Республика Татарстан) с показателями, приведенными в таблице 1.

Определение насыпной плотности, плавучести, влажности и зольности образцов КМ проводилось согласно методикам [43–46]. Определение фракционного состава измельченного СМ осуществлялось посредством ситового анализа через сита с размером отверстий 0,1, 0,5, 1 и 2 мм механическим встряхиванием в течение 10 мин. Начальная масса образца СМ составила 100 гр. Остаток на каждом сите взвешивался с точностью до 0,01 г на технических весах. Принимая сумму всех масс за 100 %, определялся выход каждой фракции делением их массы на общую массу.

Определение максимальной нефтеемкости в статических условиях проводилось по следующей методике. В чашки Петри помещались латунные сетки известной массы и наливалось по 50 см^3 нефти. Затем в каждую из них сплошным слоем наносились исследуемые образцы СМ массой 1 г. Через определенные промежутки времени (5; 15; 30; 45 и 60 мин) с помощью сетки снимался исследуемый образец СМ с сорбированной нефтью и давалось время стечь избыточному количеству сорбата, после чего сетки с сорбированной нефтью на СМ взвешивались на лабораторных весах. Нефтеемкость (статическая) определялась как отношение массы поглощенной нефти к массе СМ. Максимальное водопоглощение определялось аналогичным образом, только вместо нефти в чашки Петри наливалась водная среда.

Таблица 1 − Физико-химические показатели нефти Тумутукского месторождения

Table 1 – Physical and chemical properties of oil from the Tumutuk field

Наименование показателя	Значение	
	Девонская	Карбоновая
Плотность нефти при 15 ºС, кг/м^3	899,9	912,4
Плотность нефти при 20 ºС, кг/м^3	896,5	909,0
Массовая доля механических примесей, %	0,0046	0,0046
Массовая доля воды, %	0,06	0,06
Массовая доля серы, %	1,84	3,38
Массовая доля сероводорода, %	Менее 2	81,0
Давление насыщенных паров, кПа (мм. рт. ст.)	55,8 (419)	34,5 (259)

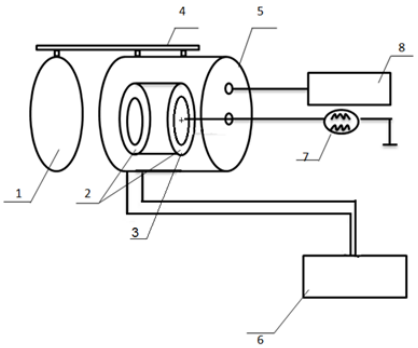
Определение нефтеемкости КМ в динамических условиях проводилось по следующей методике: в делительную воронку наливалось 50 см^3 нефти, устанавливался расход жидкости, равный 2 капли/сек и пропускался через слой исследуемого СМ массой 1 г, помещенного в стеклянную колонку. Эксперимент продолжался до завершения появления капель нефти после прохождения через слой СМ. Нефтеемкость (динамическая) определялась по разнице масс отработанного СМ с сорбированной нефтью и исходного реагента.

Удаление нефтяных пленок с водной поверхности осуществлялось по следующей методике: в чашки Петри помещались латунные сетки известной массы и наливалось 50 см^3 воды. Затем на водную поверхность приливалось 3 см^3, 5 см^3 или 7 см^3 нефти. Далее 1 г исследуемого образца СМ сплошным слоем наносился на поверхность загрязненной воды. Через 30 минут с помощью сита исследуемый образец СМ снимался, а после стекания избыточного количества нефти и воды с образца КМ производилось взвешивание последней на лабораторных весах.

Остаточное содержание нефти в воде определялось методом экстракции. В делительную воронку из чашек Петри сливался остаток воды, загрязненной нефтью после удаления СМ с сорбированной водой и нефтью, добавлялось 20 см^3 CCl_4. Содержимое воронки интенсивно встряхивалось в течение 1 минуты и отстаивалось в течение 5 минут. CCl_4 экстрагировал остатки нефти и по окончании отстаивания наблюдалось образование двух несмешивающихся слоев: нижний слой состоял из CCl_4 и экстрагированной нефти, а верхний – из воды. Нижний слой сливался в предварительно взвешенный бюкс и выпаривался при температуре 100 ºС до постоянной массы. Далее бюкс взвеши-

вался и по разнице масс определялось остаточное количество нефти в чашке Петри. Количество сорбированной нефти на поверхности исследуемых КМ определялось по разнице масс прилитой на поверхность воды нефти и ее остатком в чашке Петри.

а



б

Рисунок 1 – Плазмотрон: а) внешний вид; б) схема ВЧ плазменной установки: 1, 4 – система герметизации; 2 –электроды; 3 – плексигласовый барабан; 5 – вакуумная камера; 6 – вакуумный откачной пост; 7 – генератор; 8 – система подачи и регулировки газовой среды

Figure 1 – Plasmatron: a) appearance; b) diagram of an RF plasma installation (1, 4 – sealing system; 2 – electrodes; 3 – plexiglass drum; 5 – vacuum chamber; 6 – vacuum pumping station; 7 – generator; 8 – gas supply and regulation system

Таблица 2 – Технические характеристики плазменной установки

Table 2 – Technical specifications of the plasma unit

Показатель	Значение
Напряжение питающей сети, В	380
Число фаз питающей сети	3
Частота питающей сети, Гц	50
Частота, МГц	13,56
Мощность, потребляемая от сети, кВт, не более	10,0
Мощность колебательная, кВт	0,5–8
Коэффициент полезного действия генератора, %, не менее	75
Отклонение стабилизированного анодного напряжение при регулировании в пределах 6–9,5 кВ, при изменении напряжения питающей сети, не более	±0,1
Ток анодный при анодном напряжении 9,5 кВА не более	1
Напряжение анодное, стабилизированное, кВ, не более	9,5
Расход охлаждающей воды, дм^3/ч, не менее	1700

Обработка КМ осуществлялась в высокочастотной установке, предназначенной для получения высокочастотной емкостной (ВЧЕ) плазмы пониженного давления, внешний вид и схема которой приведены на рисунке 1. Технические характеристики плазменной установки приведены в таблице 2.

СМ определенной массы помещался в марлевые мешочки и загружался в камеру 3 плазмотрона, после чего приводился в движение плексигласовый барабан 2. Плазмообразующий газ (метан) нагревался под действием электромагнитного поля до состояния плазмы.

ИК-спектры снимались на ИК-Фурье спектрометре марки «Avatar-360» в диапазоне частот 400–4000 см$^{-1}$. Диэлектрические свойства нативной и модифицированной КМ определялись на широкополосном диэлектрическом спектрометре марки «Novcontrol Concept 80».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначально определялся фракционный состав сорбционного материала (СМ) посредством ситового анализа. Определено, что основной размер частиц КМ составляет 1,0–1,5 мм. В дальнейшем определялись некоторые физико-химические свойства КМ. Известно, что влажность исследуемого СМ составила 25 %, насыпная плотность – 0,355 г/см^3, плавучесть(72 часа) – 65,2 %, зольность – 4,13 %. Очевидно, что КМ обладает высоким значением плавучести, что предполагает его использование в качестве нефтесорбента.

В последующем определялись значения максимальной нефтеемкости нативной КМ по нефти девонского и карбонового отложений, которые составили 5,29 г/г и 5,74 г/г соответственно. Также определены значения максимальной нефтеемкости по указанной нефти в динамических условиях, которые составили по девонской нефти 4,11 г/г, по карбоновой нефти – 5,41 г/г. Значение максимального водопоглощения КМ в статических условиях составило 5,34 г/г. Очевидно, что значение максимального водопоглощения сопоставимо со значениями максимальной нефтеемкости, определенной в статических условиях. Данное обстоятельство негативно скажется при удалении пленок нефти с водной поверхности, уменьшая нефтепоглощение за счет вытеснения нефти водой из пор СМ.

Для увеличения гидрофобных характеристик КМ целесообразно провести модификацию последней. Для этого наиболее часто применяют различные гидрофобизирующие реагенты: силоксановые жидкости, жирные кислоты, полимерные материалы и др. Недостатком использования последних является необходимость наличия названных реагентов, осуществления операций растворения, отгонки растворителя, сушки СМ и т.д., усложняющих технологический процесс, и необходимость утилизации отработанных растворов. Гораздо более перспективным видится использование различных физико-химических методов. Ранее нами показана возможность использования плазмохимических методов для модификации поверхности различных полимерных материалов [47–49].

Классическая плазма представляет собой частично или полностью ионизированный газ, состоящий из фотонов, электронов, положительных и отрицательных ионов, атомов, свободных радикалов и возбужденных или невозбужденных молекул. Плазма представляет собой квазинейтральную систему частиц (в макроскопическом аспекте), проявляющую коллективное поведение из-за дальнодействующих кулоновских взаимодействий [50]. В зависимости от

температуры, плазму подразделяют на низкотемпературную (температура меньше 10^6 К) и высокотемпературную (температура выше 10^6 К). Низкотемпературная плазма, в свою очередь, подразделяется на термическую и нетермическую.

Основной особенностью генерирования нетермической плазмы является то, что электрическая энергия используется в основном для производства энергичных электронов без нагрева газовой среды. Для создания и поддержания нетермической плазмы необходим ввод электрической мощности, достаточной для диссоциации и возбуждения атомов и молекул с последующим образованием радикалов и метастабильных молекулярных состояний. Данное обстоятельство достигается за счет использования различных источников, работающих на переменном или постоянном токе, низкочастотные (~50 кГц) или высокой частоты. Кроме того, в зависимости от возможности возбуждения плазмы в широком диапазоне давлений газа, от низкого давления до атмосферного давления (0,1...10^5 Па) могут быть реализованы различные типы газовых разрядов [51].

Учитывая тот факт, что плазменную модификацию необходимо осуществлять с использованием целлюлозосодержащих материалов, наиболее подходящим методом для воздействия на исследуемые СМ является ВЧЕ плазма пониженного давления. Неоспоримым преимуществом названного метода является возможность гидрофилизировать или гидрофобизировать поверхность модифицируемого материала в зависимости от вида применяемого плазмообразующего газа.

Учитывая тот факт, что возникла необходимость увеличить сорбционные характеристики СМ по отношению к нефти, с целью гидрофобизации поверхности осуществлялась обработка КМ в среде ВЧЕ плазмы пониженного давления в среде метана. Оценивалось влияние некоторых параметров ВЧЕ плазмы пониженного давления на сорбционные характеристики КМ по отношению к нефти.

Обработка КМ ВЧЕ плазмой пониженного давления осуществлялась в плазмотроне, где в качестве плазмообразующего газа использовалась смесь метана с аргоном в соотношении 1 : 2. Аргон необходим для исключения взрывания газового потока. Режимы плазмообработки приведены в таблице 3.

Очевидно, что при плазмообработке образцов КМ варьировались мощность, подводимая к электродам плазмотрона – от 1,5 до 2,5 кВт, и время – от 1 до 10 минут. Модифицированные после воздействия плазмы образцы КМ исследовались на изменение максимальной нефтеемкости, значения которых приведены в таблице 4.

Таблица 3 – Параметры обработки КМ ВЧЕ плазмой пониженного давления

Table 3 – Parameters of processing KM VCHE by reduced pressure plasma

Режимы обработки	Параметры плазмообработки				
	Давление (P) Па	сила тока на аноде (I_a), А	Мощность, подводимая к электродам (W), кВт	Время плазмообработки (t), мин	Расход газа (Q), г/сек
1	26,6	0,6	1,5	1	0,06
2	26,6	0,6	2	5	0,06
3	26,6	0,6	2,5	10	0,06

Таблица 4 – Значения максимальной нефтеемкости плазмообработанных образцов КМ по нефти карбонового и девонского отложений

Table 4 – Values of the maximum oil-bearing capacity of plasma-treated KM samples for carboniferous and devonian oils

Вид нефти	Значение максимальной нефтеемкости			
	Режим плазмообработки			
	нативная КМ	1	2	3
статические условия				
девонская	5,29	6,86	7,10	7,13
карбоновая	5,74	6,92	7,27	7,43
динамические условия				
девонская	4,15	7,04	7,32	7,35
карбоновая	5,51	7,93	8,17	8,23

Как следует из значений, приведенных в таблице 4, с увеличением мощности, подводимой к электродам плазмотрона и времени плазмообработки, значения максимальной нефтеемкости образцов КМ в статических и динамических условиях увеличивались, достигая наибольшего значения при самом из использованных «жестком» режиме обработки СМ ВЧЕ плазмой пониженного давления. Значения максимального водопоглощения, наоборот, имели обратную тенденцию – с увеличением параметров плазмообработки названный показатель снижался по сравнению с нативной КМ. Так, образец КМ, обработанный плазмой в режиме 1, имел значение максимального водопоглощения 4,8 г/г, в режиме 2 – 4,2 г/г, в режиме 3 – 4,0 г/г. Данное обстоятельство объясняется гидрофобизацией поверхности СМ при обработке ВЧЕ плазмой пониженного давления в атмосфере метана. Атомы метана под действием ионов распадаются на свободные радикалы, обладающие высокой реакционной активностью. Полученные в результате разложения метана свободные радикалы $CH_3^{\bullet}$и $H^{\bullet}$вступают во взаимодействие с молекулами биополимеров матрицы КМ. Данное обстоятельство приводит к увеличению концентрации – CH_3 групп и протонированию поверхности СМ, что способствует гидрофобизации поверхности. Данное обстоятельство подтверждается изменением картины ИК-спектров нативной и плазмообработанных образцов КМ. В частности, в ИК-спектре плазмообработанного образца КМ наблюдается увеличение интенсивности пиков в области 2750–2850 $см^{-1}$, соответствующие колебаниям С–Н связям в метильных и метиленовых группировках.

В последующем исследовалось влияние плазмообработки на эффективность удаления нефти с водной поверхности. Для этого на поверхность воды в чашках Петри добавлялось по 3, 5 или 7 $см^3$ нефти девонского или карбонового отложений и наносился равномерным слоем 1 г КМ. Через 30 минут с помощью ситечка известной массы СМ с поглощенной нефтью и водой извлекался, определялись количество несорбированной нефти и значения поглощенной нефти и воды нативной и плазмообработанными образцами КМ. Полученные результаты приведены в таблице 5.

Как следует из приведенных в таблице 5 данных, с увеличением напряжения на аноде плазмотрона и времени плазмообработки СМ, значения эффективности нефтепоглощения увеличиваются, а водопоглощение уменьшается. Причем, с ужесточением параметров плазмообработки, количество поглощенной нефти с поверхности воды увеличивается, а количество поглощенной воды уменьшается, что вполне логично. Данное обстоятельство объясняется гидрофобизацией порошка

КМ в результате воздействия ВЧЕ плазмой пониженного давления в атмосфере метана. Данное обстоятельство подтверждается графиками зависимости диэлектрической проницаемости КМ от частоты (рисунок 2) и ИК-Фурье спектрами нативной и плазмообработанной в режиме 3 КМ.

Таблица 5 – Значения суммарного водопоглощения, нефте- и водопоглощения, эффективности извлечения нефти и изменения водопоглощения нативной и плазмообработанными образцами КМ

Table 5 – Values of total water absorption, oil and water absorption, oil recovery efficiency, and changes in water absorption of native and plasma-treated CNT samples

Образец СМ	∑ водо- и нефтепоглощение, г/г	Водопоглощение, г/г	Нефтепоглощение, г/г	Степень удаления нефти, %	Изменение водопоглощения, %
Нефть девонского отложений					
количество нефти на водной поверхности – 3 см³ (2,69 г)					
Нативная КМ	6,56	4,07	2,49	92,57	
1	5,51	2,91	2,60	96,82	-28,57
2	5,44	2,79	2,65	98,57	-31,45
3	5,57	2,91	2,66	98,71	-28,35
количество нефти на водной поверхности – 5 см³ (4,48 г)					
Нативная КМ	6,685	2,575	4,11	91,74	
1	5,95	1,58	4,37	97,56	-38,70
2	5,94	1,51	4,43	98,86	-41,35
3	5,77	1,33	4,44	99,03	-48,35
количество нефти на водной поверхности – 7 см³ (6,27 г)					
Нативная КМ	8,095	2,465	5,63	89,79	
1	7,45	1,26	6,19	98,75	-48,69
2	7,40	1,20	6,21	99,15	-51,43
3	7,25	1,03	6,22	99,20	-58,12
Нефть карбонового отложений					
количество нефти на водной поверхности – 3 см³ (2,73 г)					
Нативная КМ	5,98	3,45	2,53	92,70	
1	4,94	2,31	2,63	96,58	-33,02
2	4,66	1,99	2,67	97,70	-42,21
3	5,28	2,63	2,65	97,10	-23,76
количество нефти на водной поверхности – 5 см³ (4,54 г)					
Нативная КМ	6,31	2,21	4,10	90,30	
1	5,88	1,46	4,42	97,39	-33,99
2	5,75	1,27	4,48	98,75	-42,75
3	5,73	1,24	4,49	98,90	-43,67
количество нефти на водной поверхности – 7 см³ (6,36 г)					
Нативная КМ	8,01	2,28	5,73	90,03	
1	7,44	1,15	6,29	98,83	-49,50
2	7,32	1,03	6,29	98,97	-54,74
3	7,25	0,95	6,30	99,03	-58,36

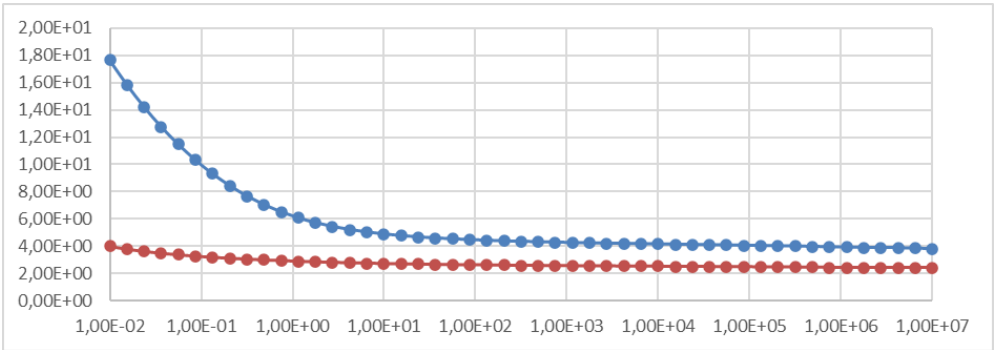


Рисунок 2 – Зависимость диэлектрической проницаемости мандариновой кожуры от частоты.
Синий цвет – нативный образец КМ; оранжевый – обработанный ВЧЕ плазмой пониженного давления в режиме 3

Figure 2 – Frequency dependence of the permittivity of tangerine peel.
Blue – native SM sample; orange – treated with low-pressure RF plasma in mode 3

Диэлектрическая проницаемость ε показывает, во сколько раз понижается напряженность электрического поля между электродами без образца и с образцом. Чем выше полярность молекул образца и чем больше концентрация полярных молекул, тем выше его диэлектрическая проницаемость. Увеличение диэлектрической проницаемости с уменьшением частоты связано с тем, что на высоких частотах полярная молекула практически неподвижна, она не успевает отреагировать на изменение направления электрического поля, при понижении частоты молекула уже успевает сместиться из положения равновесия по направлению поля, и чем меньше частота, тем на большее расстояние молекула перемещается.

Основным типом полярных молекул, способных к поступательному перемещению в материалах растительного происхождения являются кислородсодержащие группировки. Т.е. уменьшение значений диэлектрической проницаемости порошка КМ после воздействия ВЧЕ плазмы пониженного давления в атмосфере метана свидетельствует об увеличении гидрофобных характеристик СМ.

В ИК-Фурье спектрах данное обстоятельство подтверждается увеличением интенсивности колебаний, в частности, -CH- связей в метильных и метиленовых группах.

ВЫВОДЫ

Проведенными исследованиями показана возможность использования отхода пищевой перерабатывающей промышленности – измельченной кожуры мандаринов в качестве альтернативного нефтесорбента для удаления пленок нефти с водной поверхности. Определено, что обработка кожуры мандаринов ВЧЕ плазмой пониженного давления способствует увеличению значений максимальной нефтеемкости по нефти девонского и карбонового отложений и снижению максимального водопоглощения. Проведены исследования по удалению пленок нефтей с водной поверхности нативными и модифицированными образцами кожуры мандаринов. Показано, что обработка последних ВЧЕ плазмой пониженного давления способствует увеличению эффективности сорбционного извлечения нефти с поверхности воды и снижению водопоглощения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габдрахманов Т.Ф., Афанасьев И.А., Фролов Ю.А. Аварийные разливы нефти и особенности их ликвидации // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 1. С. 231–235.

2. Cohen M.A. Water pollution from oil spills // Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics (Second Edition). 2025. Vol. 3. P. 89–96. DOI: 10.1016/B978-0-323-91013-2.00039-3.

3. Захматов В.Д., Онов В.А., Щербак Н.В. Локализация и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 2. С. 64–73.

4. Караев С., Шыхалиев К. Экологические проблемы транспортировки нефти и нефтепродуктов и новые методы очистки водной поверхности от нефти и нефтепродуктов; Ганновер: ЕАЕН. 2014. С. 5–45.

5. Bhattacharjee S., Dutta T. An overview of oil pollution and oil-spilling incidents // Advances in Oil-Water Separation. 2022. P. 3–15. DOI: 10.1016/B978-0-323-89978-9.00014-8.

6. Anikiev V.V., Mishukov V.F., Moiseevsky G.N., Tkalin A.V. The effect of oil films on water evaporation and oxygen content in sea water // Geo Journal. 1988. Vol. 16. № 1. P. 19–24.

7. Đorđević M., Šabalja Đ., Mohović Đ., Brčić D. Optimisation methodology for skimmer device selection for removal of the marine oil pollution // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10. № 7. Article 925. P. 1–16. DOI: 10.3390/jmse10070925.

8. Balasubramani S., Raj G.A.S., Ragavan D.B., John J.J., Ramakrishnan T., Kumar S.D. Design and fabrication of oil skimmer and water waste collecting robot // AIP Conference Proceedings. 2025. Vol. 3204. № 1. Article 030014. DOI: 10.1063/5.0246711.

9. Adofo Y.K., Nyankson E., Agyei-Tuffour B. Dispersants as an oil spill clean-up technique in the marine environment: A review // Heliyon. 2022. Vol. 8. № 8. Article e10153. P. 1–19. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10153.

10. Yang Y., Li J., Liang Y., Zheng D., Jing G., Liu Y., Guo M. Application of flocculant and coagulant in treatment of oily pollutants: a mini review // Petroleum Science and Technology. 2025. Vol. 43. № 9. P. 913–929. DOI: 10.1080/10916466.2024.2307412.

11. Dave D.A.E.G., Ghaly A.E. Remediation technologies for marine oil spills: A critical review and comparative analysis // American Journal of Environmental Sciences. 2011. Vol. 7. № 5. P. 423–440.

12. Sharma V., Ramish A., Sahu O. Oil spill recovery techniques in petroleum industry: A review on treatment process // Journal of Oil, Gas and Petrochemical Sciences. 2021. Vol. 3. № 1. P. 1–5. DOI: 10.30881/jogps.00029.

13. Ветрова А.А., Иванова А.А., Филонов А.Е., Забелин В.А., Гафаров А.Б., Нечаева И.А., Пунтус И.Ф., Боронин А.М. Биодеструкция нефти отдельными штаммами и принципы составления микробных консорциумов для очистки окружающей среды от углеводородов нефти // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. № 2–1. С. 241–257.

14. Gote M.G., Dhila H.H., Muley S.R. Advanced synthetic and bio-based sorbents for oil spill clean-up: a review of novel trends // Nature Environment and Pollution Technology. 2023. Vol. 22. № 1. P. 39–61. DOI: 10.46488/NEPT.2023.v22i01.004.

15. Haridharan N., Sundar D., Kurrupasamy L., Anandan S., Liu C.H., Wu J.J. Oil spills adsorption and cleanup by polymeric materials: A review // Polymers for Advanced Technologies. 2022. Vol. 33. № 5. P. 1353–1384. DOI: 10.1002/pat.5636.

16. Chau M.Q., Truong T.T., Hoang A.T., Le T.H. Oil spill cleanup by raw cellulose-based absorbents: a green and sustainable approach // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2025. Vol. 47. № 1. P. 8269–8282. DOI: 10.1080/15567036.2021.1928798.

17. Hailan S.M., Krupa I., McKay G. Removal of oil spills from aqueous systems by polymer sorbents // International Journal of Environmental Science and Technology. 2025. Vol. 22. № 5. P. 3833–3854. DOI: 10.1007/s13762-024-05959-0.

18. Ouyang D., Lei X., Zheng H. Recent advances in biomass-based materials for oil spill cleanup // Nanomaterials. 2023. Vol. 13. № 3. Article 620. P. 1–37. DOI: 10.3390/nano13030620.

19. Olalekan A.A., Oluwatoyin A.O. Adsorption of crude oil spill from aqueous solution using agro-wastes as adsorbents // Journal of Scientific Research and Reports. 2021. Vol. 27. № 4. P. 27–52. DOI: 10.9734/JSRR/2021/V27I430376.

20. Wolok E., Barafi J., Joshi N., Girimonte R., Chakraborty S. Study of bio-materials for removal of the oil spill // Arabian Journal of Geosciences. 2020. Vol. 13. № 23. Article 1244. P. 1–11. DOI: 10.1007/s12517-020-06244-3.

21. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Дебердеев Т.Р. Использование отходов от переработки злаковых культур для удаления разливов углеводородов с водной поверхности. 1. Пшеничная и рисовая солома (обзор мировой литературы) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 9. С. 11–22. DOI: 10.31044/1994-6260-2024-0-9-11-22.

22. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Дебердеев Т.Р. Использование отходов от переработки злаковых культур для удаления разливов углеводородов с водной поверхности 2. Ячменная и кукурузная солома (обзор мировой литературы) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 10. С. 27–36. DOI: 10.31044/1994-6260-2024-0-10-27-36.

23. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Дебердеев Т.Р. Использование отходов от переработки злаковых культур для удаления разливов углеводородов с водной поверхности 3. Плодовые оболочки зерен пшеницы и риса (обзор мировой и отечественной литературы) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2025. № 2. С. 2–12. DOI: 10.31044/1994-6260-2025-0-2-2-12.

24. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Дебердеев Т.Р. Использование отходов от переработки злаковых культур для удаления разливов углеводородов с водной поверхности 4. Плодовые оболочки зерен ячменя, овса и гречихи (обзор мировой и отечественной литерату-

ры) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2025. № 3. С. 8–17. DOI: 10.31044/1994-6260-2025-0-3-8-17.

25. Шайхиев И.Г., Бадртдинова Г.М., Чаптарова Е.А., Санатуллова З.Т., Резапова Н.В. Влияние кислотной модификации сердцевины початков кукурузы (*Zea mays*) на удаление пленок нефти с водной поверхности // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2025. № 1. С. 1–20. DOI: 10.17122/ogbus-2025-1-6-25.

26. Шайхиев И.Г., Санатуллова З.Т., Шайхиева К.И., Замилова Д.А., Фадеева М.А. Альтернативный нефтесорбент для удаления разливов углеводородов с водной поверхности // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. № 6 (146). С. 146–158.

27. Шайхиев И.Г., Степанова С.В., Шайхиева К.И., Мавлетбаева А.И. Исследование отхода от переработки сахарной свеклы в качестве сорбционного материала минеральных масел // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 17. С. 258–261.

28. Шайхиев И.Г., Степанова С.В., Шайхиева К.И., Мавлетбаева А.И. Исследование возможности использования жома сахарной свеклы в качестве сорбционного материала легких нефтепродуктов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 13. С. 246–248.

29. Ferreira P.S., Scopel E., Pinto L.O., Rezende C.A. Hydrophobic and robust sugarcane bagasse-based biosorbents for oil spill cleanup: synergy of hydrothermal treatment and cellulose nanofibril reinforcement // ACS Sustainable Resource Management. 2025. Vol. 2. № 5. P. 853–863. DOI: 10.1021/acssusresmgt.5c00110.

30. Шайхиев И.Г., Хаматгалимова Д.Н., Дебердеев Т.Р., Свергузова С.В. Кора деревьев – перспективный сорбционный материал для извлечения углеводородов из водных сред (обзор мировой и отечественной литературы) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 2. С. 10–20. DOI: 10.31044/1994-6260-2024-0-2-10-20.

31. Зарипова А.Р., Хаматгалимова Д.Н., Шайхиев И.Г. Исследование коры дуба черешчатого (*Quercus robur*) в качестве сорбционного материала для удаления плёнок нефти с водной поверхности // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 4 (60). С. 50–62. DOI: 10.25686/2306-2827.2023.4.50.

32. Stepanova S.V., Alekseeva A.A., Khafizova L.Y. Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 791. № 1, Article 012076. P. 1–9. DOI: 10.1088/1757-899X/791/1/012076.

33. Svyatchenko A.V., Sverguzova S.V., Fomina E.V., Shaikhiev I.G. Using leaves and needles of trees as sorption materials for the extraction of oil and petroleum products from solid and water surfaces // Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 160. P. 299–306. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_40.

34. Шайхиев И.Г., Степанова С.В., Шайхиева К.И. Исследование хвои сосновых деревьев в качестве сорбционных материалов для удаления нефти и масел с водной поверхности // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 3. С. 183–186.

35. Мурашко Е.Э., Санатуллова З.Т., Шайхиев И.Г., Садыкова С.В. Влияние параметров обработки ВЧ плазмой пониженного давления на нефте- и водопоглощение компонентов *Larix sibirica* // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 17. С. 121–126.

36. El-Din G.A., Amer A.A., Malsh G., Hussein M. Study on the use of banana peels for oil spill removal // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57. № 3. P. 2061–2068. DOI: 10.1016/j.aej.2017.05.020.

37. Dawodu F.A., Abonyi C.J., Akpomie K.G. Feldspar-banana peel composite adsorbent for efficient crude oil removal from solution // Applied Water Science. 2021. Vol. 11. № 1. Article 3. P. 1–10. DOI: 10.1007/s13201-020-01335-8.

38. El Gheriany I.A., El Saqa F.A., Amer A.A.E.R., Hussein M. Oil spill sorption capacity of raw and thermally modified orange peel waste // Alexandria Engineering Journal. 2020. Vol. 59. № 2. P. 925–932. DOI: 10.1016/j.aej.2020.03.024.

39. Abubakar A.M., Diriki H.D., Umdagas L.B., Mukwana K.C., Bhutto A.A. Sigma XL optimisation of oil spill removal from water using orange peels bio-adsorbent // Malaysian Journal of Chemical Engineering and Technology. 2024. Vol. 7. № 2. P. 131–158. DOI: 10.24191/mjcet.v7i2.1357.

40. Zou J., Liu X., Chai W., Zhang X., Li B., Wang Y., Ma Y. Sorption of oil from simulated seawater by fatty acid-modified pomelo peel // Desalination and Water Treatment. 2015. Vol. 56. № 4. P. 939–946. DOI: 10.1080/19443994.2014.941302.

41. Kumar H., Bhardwaj K., Sharma R., Nepovimova E., Kuča K., Dhanjal D.S., Verma R., Bhardwaj P., Sharma S., Kumar D. Fruit and vegetable peels: utilization of high value horticultural waste in novel industrial applications // Molecules. 2020. Vol. 25. Article 2812. P. 1–21. DOI: 10.3390/molecules2.

42. Gonzatto M., Santos J.S. Introductory chapter: world fruit crops production and research // Fruit Crops Science – Ecophysiological and Horticultural Perspectives. 2025. Chapter 1. P. 3–10. DOI: 10.5772/intechopen.10060.17.

43. ГОСТ 16190-70. Адсорбенты. Метод определения насыпной плотности. М. : Издательство стандартов, 1970. 7 с.

44. Каменщиков Ф.А. Удаление нефтепродуктов с водной поверхности и грунта / Ф.А. Каменщиков, Е.И. Богомольный. М. : Институт компьютерных исследований; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2006. 525 с.

45. ГОСТ 12597-67. Адсорбенты. Метод определения массовой доли воды в активных углях и катализаторах на их основе. М. : Издательство стандартов, 1989. 6 с.

46. ГОСТ 11022-95. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. М. : Стандартинформ. 2006. 8 с.

47. Шайхиев И.Г., Низамов Р.Х., Абдуллин И.Ш., Фридланд С.В. Модификация альтернативного сорбента плазменной обработкой для увеличения нефтеемкости и гидрофобности // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 4. С. 24–27.

48. Шайхиев И.Г., Фазуллина З.Т., Абдуллин И.Ш., Гафаров И.Г. Влияние обработки ВЧ-плазмой пониженного давления на эффективность удаления отходом валяльно-войлочного производства с водной поверхности масла ТП-22 // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 19. С. 42–48.

49. Шайхиев И.Г., Хасаншина Э.М., Абдуллин И.Ш., Степанова С.В. Влияние плазменной обработки льняной костры на удаления розливов девонской нефти с водной поверхности и гидрофобные характеристики // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 8. С. 165–171.

50. Rutscher A., Lofhagen D., Sigeneger F. [et al.]. Low temperature plasmas – fundamentals, technologies and techniques. Weinheim : Wiley-VCH, Berlin, Germany, 2008. Vol. 1. 945 p.

51. Велихов Е.П. Физические явления в газоразрядной плазме: Учебное руководство / Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987. 159 с.

Информация об авторах

К. И. Шайхиева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная экология» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» в г. Казани.

З. Т. Санатуллова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная экология» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» в г. Казани.

А. А. Хубатхузин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Плазмохимические технологии наноматериалов и покрытий» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Ка-

занский национальный исследовательский технологический университет» в г. Казани.

Р. М. Вахидов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология твердых химических веществ» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» в г. Казани.

REFERENCES

1. Gabdrakhmanov, T.F., Afanasev, I.A., Frolov, Yu.A. (2017). Avariinie razlivi nefti i osobennosti ikh likvidatsii. *Neftegazovoe delo*. 15(1). S. 231-235. (In Russ.).

2. Cohen, M.A. (2025). Water pollution from oil spills. *Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics (Second Edition)*. 3. 89-96. DOI: 10.1016/B978-0-323-91013-2.00039-3.

3. Zakhmatov, V.D., Onov, V.A., Shcherbak, N.V. (2019). Lokalizatsiya i likvidatsiya avariinikh razlivov nefti i nefteproduktov. *Problemi upravleniya riskami v tekhnosfere.* (2). 64-73. (In Russ.).

4. Karaev, S., Shikhaliev, K. (2014). Ekologicheskie problemi transportirovki nefti i nefteproduktov i novie metodi ochistki vodnoi poverkhnosti ot nefti i nefteproduktov. *Gannover: YeAEN*. 5-45.

5. Bhattacharjee, S., Dutta, T. (2022). An overview of oil pollution and oil-spilling incidents. *Advances in Oil-Water Separation*. 3-15. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89978-9.00014-8.

6. Anikiev, V.V., Mishukov, V.F., Moiseevsky, G.N., Tkalin, A.V. (1988). The effect of oil films on water evaporation and oxygen content in sea water. *Geo Journal.* 16(1). 19-24.

7. Đorđević, M., Šabalja, Đ., Mohović, Đ., Brčić, D. (2022). Optimisation methodology for skimmer device selection for removal of the marine oil pollution. *Journal of Marine Science and Engineering*. 10(7). 925. 1-16. https://doi.org/10.3390/jmse10070925.

8. Balasubramani, S., Raj, G.A.S., Ragavan, D.B., John, J.J., Ramakrishnan, T., Kumar, S.D. (2025). Design and fabrication of oil skimmer and water waste collecting robot. *AIP Conference Proceedings.* 2025. 3204(1). 030014. https://doi.org/10.1063/5.0246711.

9. Adofo, Y.K., Nyankson, E., Agyei-Tuffour, B. (2022). Dispersants as an oil spill clean-up technique in the marine environment: A review. *Heliyon.* 8(8). e10153. 1-19. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10153.

10. Yang, Y., Li, J., Liang, Y., Zheng, D., Jing, G., Liu, Y., Guo, M. (2025). Application of flocculant and coagulant in treatment of oily pollutants: a mini review. *Petroleum Science and Technology.* 43(9). 913-929. https://doi.org/10.1080/10916466.2024.2307412.

11. Dave, D.A.E.G., Ghaly, A.E. (2011). Remediation technologies for marine oil spills: A critical review and comparative analysis. *American Journal of Environmental Sciences*. 7(5). 423-440.

12. Sharma, V., Ramish, A., Sahu, O. (2021). Oil spill recovery techniques in petroleum industry: A review on treatment process. *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Sciences.* 3(1). 1-5. https://doi.org/10.30881/jogps.00029.

13. Vetrova, A.A., Ivanova, A.A., Filonov, A.E., Zabelin, V.A., Gafarov, A.B., Nechaeva, I.A., Puntus, I.F., Boronin, A.M. (2013). Biodestruktsiya nefti otdelnimi shtammami i printsipi sostavleniya mikrobnikh konsortsiumov dlya ochistki okruzhayushchei sredi ot uglevodorodov nefti. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennie nauki.* 2-1. 241-257. (In Russ.).

14. Gote, M.G., Dhila, H.H., Muley, S.R. (2023). Advanced synthetic and bio-based sorbents for oil spill clean-up: a review of novel trends. *Nature Environment and Pollution Technology.* 22(1). 39-61. https://doi.org/10.46488/NEPT.2023.v22i01.004.

15. Haridharan, N., Sundar, D., Kurrupasamy, L., Anandan, S., Liu, C.H., Wu, J.J. (2022). Oil spills adsorption and cleanup by polymeric materials: A review. *Polymers for Advanced Technologies.* 33(5). 1353-1384. https://doi.org/10.1002/pat.5636.

16. Chau, M.Q., Truong, T.T., Hoang, A.T., Le, T.H. (2025). Oil spill cleanup by raw cellulose-based absorbents: a green and sustainable approach. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 47(1). 8269-8282. https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1928798.

17. Hailan, S.M., Krupa, I., McKay, G. (2025). Removal of oil spills from aqueous systems by polymer sorbents. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 22(5). 3833-3854. https://doi.org/10.1007/s13762-024-05959-0.

18. Ouyang, D., Lei, X., Zheng, H. (2023). Recent advances in biomass-based materials for oil spill cleanup. *Nanomaterials*. 13(3). 620. 1-37. https://doi.org/10.3390/nano13030620.

19. Olalekan, A.A., Oluwatoyin, A.O. (2021). Adsorption of crude oil spill from aqueous solution using agro-wastes as adsorbents. *Journal of Scientific Research and Reports.* 27(4). 27-52. https://doi.org/10.9734/JSRR/2021/V27I430376.

20. Wolok, E., Barafi, J., Joshi, N., Girimonte, R., Chakraborty, S. (2020). Study of bio-materials for removal of the oil spill. *Arabian Journal of Geosciences.* 13(23). 1244.1-11. https://doi.org/10.1007/s12517-020-06244-3.

21. Shaikhiev, I.G., Shaikhieva, K.I., Sverguzova, S.V., Deberdeev, T.R. (2024). Ispolzovanie otkhodov ot pererabotki zlakovikh kultur dlya udaleniya razlivov uglevodorodov s vodnoi poverkhnosti. 1. Pshenichnaya i risovaya soloma (obzor mirovoi literaturi). *Vse materiali. Entsiklopedicheskii spravochnik.* 9. 11-22. https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-9-11-22. (In Russ.).

22. Shaikhiev, I.G., Shaikhieva, K.I., Sverguzova, S.V., Deberdeev, T.R. (2024). Ispolzovanie otkhodov ot pererabotki zlakovikh kultur dlya udaleniya razlivov uglevodorodov s vodnoi poverkhnosti 2. Yachmennaya i kukuruznaya soloma (obzor mirovoi literaturi). *Vse materiali. Entsiklopedicheskii spravochnik.* 10. 27-36. https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-10-27-36. (In Russ.).

23. Shaikhiev, I.G., Shaikhieva, K.I., Sverguzova, S.V., Deberdeev, T.R. (2025). Ispolzovanie otkhodov ot pererabotki zlakovikh kultur dlya udaleniya razlivov uglevodorodov s vodnoi poverkhnosti 3. Plodovie obolochki zeren pshenitsi i risa (obzor mirovoi i otechestvennoi literaturi). *Vse materiali. Entsiklopedicheskii spravochnik.* 2. 2-12. https://doi.org/10.31044/1994-6260-2025-0-2-2-12. (In Russ.).

24. Shaikhiev, I.G., Shaikhieva, K.I., Sverguzova, S.V., Deberdeev, T.R. (2025). Ispolzovanie otkhodov ot pererabotki zlakovikh kultur dlya udaleniya razlivov uglevodorodov s vodnoi poverkhnosti 4. Plodovie obolochki zeren yachmenya, ovsa i grechikhi (obzor mirovoi i otechestvennoi literaturi). *Vse materiali. Entsiklopedicheskii spravochnik.* 3. 8-17. https://doi.org/10.31044/1994-6260-2025-0-3-8-17. (In Russ.).

25. Shaikhiev, I.G., Badrtdinova, G.M., Chaptarova, Ye.A., Sanatullova, Z.T., Rezapova, N.V. (2025). Vliyanie kislotnoi modifikatsii serdtsevini pochatkov kukuruzi (*Zea mays*) na udalenie plenok nefti s vodnoi poverkhnosti. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo».* 1. 1-20. https://doi.org/10.17122/ogbus-2025-1-6-25. (In Russ.).

26. Shaikhiev, I.G., Sanatullova, Z.T., Shaikhieva, K.I., Zamilova, D.A., Fadeeva, M.A. (2023). Alternativnii neftesorbent dlya udaleniya razlivov uglevodorodov s vodnoi poverkhnosti. *Problemi sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov*. 6(146). 146-158. (In Russ.).

27. Shaikhiev, I.G., Stepanova, S.V., Shaikhieva, K.I., Mavletbaeva, A.I. (2015). Issledovanie otkhoda ot pererabotki sakharnoi svekli v kachestve sorbtsionnogo materiala mineralnikh masel. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta.* 18(17). 258-261. (In Russ.).

28. Shaikhiev, I.G., Stepanova, S.V., Shaikhieva, K.I., Mavletbaeva, A.I. (2015). Issledovanie vozmozhnosti ispolzovaniya zhoma sakharnoi svekli v kachestve sorbtsionnogo materiala legkikh nefteproduktov. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta.* 18(13). 246-248. (In Russ.).

29. Ferreira, P.S., Scopel, E., Pinto, L.O., Rezende, C.A. (2025). Hydrophobic and robust sugarcane bagasse-based biosorbents for oil spill cleanup: synergy of hydrothermal treatment and cellulose nanofibril reinforcement. *ACS Sustainable Resource Management.* 2(5). 853-863. https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.5c00110.

30. Shaikhiev, I.G., Khamatgalimova, D.N., Deberdeev, T.R., Sverguzova, S.V. (2024). Kora derevev - perspektivnii sorbtsionnii material dlya izvlecheniya uglevodorodov iz vodnikh sred (obzor mirovoi i otechestvennoi literaturi). *Vse materiali. Entsiklopedicheskii spravochnik.* 2. 10-20. https://doi.org/ 10.31044/1994-6260-2024-0-2-10-20. (In Russ.).

31. Zaripova, A.R., Khamatgalimova, D.N., Shaikhiev, I.G. (2023). Issledovanie kori duba che-reshchatogo (Quercus robur) v kachestve sorbtsionnogo materiala dlya udaleniya plyonok nefti s vodnoi poverkhnosti. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie.* 4(60). 50-62. https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.4.50. (In Russ.).

32. Stepanova, S.V., Alekseeva, A.A., Khafizova, L.Y. (2020). Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 791(1). 012076.1-9. https://doi.org/10.1088/1757-899X/791/1/012076.

33. Svyatchenko, A.V., Sverguzova, S.V., Fomina, E.V., Shaikhiev, I.G. (2021). Using leaves and needles of trees as sorption materials for the extraction of oil and petroleum products from solid and water surfaces. *Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. Lecture Notes in Civil Engineering.* 160. 299-306. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_40.

34. Shaikhiev, I.G., Stepanova, S.V., Shaikhieva, K.I. (2017). Issledovanie khvoi sosnovikh derevev v kachestve sorbtsionnikh materialov dlya udaleniya neftei i masel s vodnoi poverkhnosti. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta.* 20(3). 183-186. (In Russ.).

35. Murashko, Ye.E., Sanatullova, Z.T., Shaikhiev, I.G., Sadikova, S.V. (2017). Vliyanie parametrov obrabotki VCh plazmoi ponizhennogo davleniya na nefte- i vodopogloshchenie komponentov Larix sibirica. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta.* 20(17). 121-126. (In Russ.).

36. El-Din, G.A., Amer, A.A., Malsh, G., Hussein, M. (2018). Study on the use of banana peels for oil spill removal. *Alexandria Engineering Journal.* 57(3). 2061-2068. https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.020.

37. Dawodu, F.A., Abonyi, C.J., Akpomie, K.G. (2021). Feldspar-banana peel composite adsorbent for efficient crude oil removal from solution. *Applied Water Science.* 11(1). 3. P. 1-10. https://doi.org/10.1007/s13201-020-01335-8.

38. El Gheriany, I.A., El Saqa, F.A., Amer, A.A.E.R., Hussein, M. (2020). Oil spill sorption capacity of raw and thermally modified orange peel waste. *Alexandria Engineering Journal.* 59(2). 925-932. https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.024.

39. Abubakar, A.M., Diriki, H.D., Umdagas, L.B., Mukwana, K.C., Bhutto, A.A. (2024). Sigma XL optimisation of oil spill removal from water using orange peels bio-adsorbent. *Malaysian Journal of Chemical Engineering and Technology.* 7(2). 131-158. https://doi.org/10.24191/mjcet.v7i2.1357.

40. Zou, J., Liu, X., Chai, W., Zhang, X., Li, B., Wang, Y., Ma, Y. (2015). Sorption of oil from simulated seawater by fatty acid-modified pomelo peel. *Desalination and Water Treatment.* 56(4). 939-946. https://doi.org/10.1080/19443994.2014.941302.

41. Kumar, H., Bhardwaj, K., Sharma, R., Nepovimova, E., Kuča, K., Dhanjal, D.S., Verma, R., Bhardwaj, P., Sharma, S., Kumar, D. (2020). Fruit and vegetable peels: utilization of high value horticultural waste in novel industrial applications. *Molecules.* 25. 2812. 1-21. https://doi.org/10.3390/molecules2.

42. Gonzatto, M., Santos, J.S. (2025). Introductory chapter: world fruit crops production and research. *Fruit Crops Science - Ecophysiological and Horticultural Perspectives. Chapter* 1. 3-10. https://doi.org/10.5772/intechopen.10060.17.

43. GOST 16190-70. (1970). *Adsorbenti. Metod opredeleniya nasipnoi plotnosti. M. : Izdatelstvo standartov*. 7. (In Russ.).

44. Kamenshchikov, F.A. (2006). Udalenie nefteproduktov s vodnoi poverkhnosti i grunta. *Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika*.525. (In Russ.).

45. . GOST 12597-67. (1989). *Adsorbenti. Metod opredeleniya massovoi doli vodi v aktivnikh uglyakh i katalizatorakh na ikh osnove. M. : Izdatelstvo standartov*. 6. (In Russ.).

46. GOST 11022-95. (2006). Toplivo tverdoe mineralnoe. Metodi opredeleniya zolnosti. M. : Standartinform. 8. (In Russ.).

47. Shaikhiev, I.G., Nizamov, R.Kh., Abdullin, I.Sh., Fridland, S.V. (2010). Modifikatsiya alternativnogo sorbenta plazmennoi obrabotkoi dlya uvelicheniya nefteemkosti i gidrofobnosti. *Zashchita okruzhayushchei sredi v neftegazovom komplekse.* 4. 24-27. (In Russ.).

48. Shaikhiev, I.G., Fazullina, Z.T., Abdullin, I.Sh., Gafarov, I.G. (2011). Vliyanie obrabotki vch-plazmoi ponizhennogo davleniya na effektivnost udaleniya otkhodom valyalno-voilochnogo proizvodstva s vodnoi poverkhnosti masla TP-22. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta.* 19. 42-48. (In Russ.).

49. Shaikhiev, I.G., Khasanshina, E.M., Abdullin, I.Sh., Stepanova, S.V. (2011). Vliyanie plazmennoi obrabotki lnyanoi kostri na udaleniya rozlivov devonskoi nefti s vodnoi poverkhnosti i gidrofobnie kharakteristiki. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta.* 8. 165-171. (In Russ.).

50. Rutscher, A., Lofhagen, D., Sigeneger, F. (2008). Low temperature plasmas - fundamentals, technologies and techniques. *Weinheim : Wiley-VCH, Berlin, Germany.* 1. 945.

51. Velikhov, Ye.P. (1987). Fizicheskie yavleniya v gazorazryadnoi plazme: Uchebnoe rukovodstvo / Moskva : Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literature. 159. (In Russ.).

Information about the Authors

K.I. Shaikhieva - is a Candidate of Technical Sciences and Associate Professor in the Department of Environmental Engineering at the Kazan National Research Technological University in Kazan.

Z.T. Sanatullova - is a Candidate of Technical Sciences and Associate Professor in the Department of Environmental Engineering at the Kazan National Research Technological University in Kazan.

A.A. Khubatkhuzin - is a Candidate of Technical Sciences and Associate Professor in the Department of Plasma-Chemical Technology of Nanomaterials and Coatings at the Kazan National Research Technological University in Kazan.

R.M. Vakhidov - is a Candidate of Technical Sciences and Associate Professor in the Department of Solid Chemical Engineering at the Kazan National Research Technological University in Kazan.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 227–234.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 227–234.

Научная статья
2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 678.01.53
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.032 EDN: EHVFWE

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

Марина Ивановна Губанова [1], Никита Сергеевич Баженов [2], Ирина Анатольевна Кирш [3], Ольга Анатольевна Банникова [4], Наталья Сергеевна Шмакова [5], Злата Владимировна Широхова [6]

[1, 2, 3, 4, 5, 6] ФГБОУ ВО «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)», Москва, Россия
[1] gubanovami@mgupp.ru, https://orcid.org/0000-0003-3547-716X
[2] bazhenovns@mgupp.ru, https://orcid.org/0000-0002-5193-524X
[3] irina-kirsh@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3370-4226
[4] BannikovaOA@mgupp.ru, https://orcid.org/0000-0003-0633-0003
[5] shmakovans@mgupp.ru, https://orcid.org/0000-0001-6758-7502
[6] zshirokhova@list.ru, https://orcid.org/0009-0000-0259-7056

Аннотация. *Анализ научной литературы позволил выявить данные о проведении научных исследований материалов на основе поливинилового спирта (ПВС), модифицированных с использованием ультразвука. Однако информация о влиянии ультразвукового воздействия на изменение свойств растворов и пленок на основе ПВС ограничена. Целью работы было изучение влияния ультразвуковой обработки на свойства материалов на основе ПВС. Были решены следующие задачи: ультразвуковая обработка растворов ПВС, сравнительная характеристика вязкости модифицированных растворов ПВС, оптимизация температурно-временных режимов формирования пленок на основе ПВС, исследование свойств растворов ПВС различной концентрации и пленок на их основе до и после ультразвуковой обработки. Растворы ПВС с различной концентрацией обрабатывались с использованием ультразвукового зонда. После проведения ультразвуковой модификации растворов ПВС не было выявлено значимых изменений вязкости. Установлено влияние ультразвуковой обработки на физико-механические свойства образцов пленок, полученных на основе растворов ПВС с концентрацией 7,5 и 10 %, – наблюдалось уменьшение относительного удлинения, у образца на основе раствора ПВС с концентрацией 5% удлинение изменялось линейно, в зависимости от продолжительности обработки. Данные показатели свидетельствуют об однородности растворов с меньшей концентрацией и с более упорядоченной структурой полимеризации. Таким образом, обработка ПВС ультразвуком является перспективным методом модификации растворов полимеров для придания пленке на основе ПВС более однородных структур, в том числе при введении в композицию модифицирующих компонентов, используемых в упаковке для пролонгации срока хранения пищевых продуктов.*

Ключевые слова: *поливиниловый спирт, модификация, ультразвук, зависимость вязкости.*

Для цитирования: Влияние воздействия ультразвука на свойства покрытий из поливинилового спирта / М. И. Губанова [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 227–234. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.032. EDN: https://elibrary.ru/EHVFWE.

Original article

EFFECT OF ULTRASOUND ON PROPERTIES OF POLYVINYL ALCOHOL COATINGS

Marina I. Gubanova [1], Nikita S. Bazhenov [2], Irina A. Kirsh [3], Olga A. Bannikova [4], Natalia S. Shmakova [5], Zlata V. Shirokhova [6]

[1, 2, 3, 4, 5, 6] Russian Biotechnological University (ROSBIO), Moscow, Russia
[1] gubanovami@mgupp.ru, https://orcid.org/0000-0003-3547-716X
[2] bazhenovns@mgupp.ru, https://orcid.org/0000-0002-5193-524X
[3] irina-kirsh@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3370-4226
[4] BannikovaOA@mgupp.ru, https://orcid.org/0000-0003-0633-0003
[5] shmakovans@mgupp.ru, https://orcid.org/0000-0001-6758-7502
[6] zshirokhova@list.ru, https://orcid.org/0009-0000-0259-7056

Abstract. *The analysis of scientific literature revealed data on the research of materials based on polyvinyl alcohol (PVA) modified using ultrasound. However, information on the effect of ultrasonic exposure on the change in the proper-*

© Губанова М. И., Баженов Н. С., Кирш И. А., Банникова О. А., Шмакова Н. С., Широхова З. В., 2026

ties of solutions and films based on PVA is limited. The aim of the work was to study the effect of ultrasonic processing on the properties of materials based on PVA. The following tasks were solved: ultrasonic treatment of PVA solutions, comparative analysis of the viscosity of modified PVA solutions, optimization of the temperature and time conditions for the formation of PVA-based films, and study of the properties of PVA solutions of different concentrations and the films based on them before and after ultrasonic treatment. PVA solutions with different concentrations were also treated using an ultrasonic probe. After the ultrasonic modification of PVA solutions, no significant changes in viscosity were observed. The effect of ultrasonic processing on the physical and mechanical properties of film samples based on PVA solutions with a concentration of 7.5 and 10 % was established.

A decrease in the relative elongation was observed, while the elongation of the sample based on a PVA solution with a concentration of 5 % changed linearly, depending on the duration of the processing. These indicators indicate the homogeneity of solutions with lower concentrations and a more correct polymerization structure. Thus, ultrasound treatment of PVA is a promising method for modifying polymer solutions to give PVA-based films more uniform structures, including when modifying components are added to the composition for prolonging the shelf life of food products.

Keywords: *polyvinyl alcohol, modification, ultrasound, viscosity dependence.*

For citation: Gubanova, M. I., Bazhenov, N. S., Kirsh, I. A., Bannikova, O. A., Shmakova, N. S. & Shirokhova, Z. V. (2026). Effect of ultrasound on properties of polyvinyl alcohol coatings. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 227-234. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.032. EDN: https: //elibrary.ru/EHVFWE.

Введение

Материалы для упаковки пищевых продуктов, распространенные в настоящее время на рынке, представляют собой небиоразлагаемые пластики на основе нефти [1]. В связи с тем, что данный вид материалов имеет длительный срок разложения, что вызывает ухудшение экологической обстановки, наиболее актуально использование полимеров с короткими сроками биоразложения. Одним из таких полимеров является поливиниловый спирт (ПВС). ПВС – биоразлагаемый полимер, имеет превосходные характеристиками биоразложения [2], а также высокую стойкость к маслам и химикатам, стабилен практически во всех органических растворителях и является перспективным полимером для создания биоразлагаемых материалов благодаря своей водорастворимости и биоразлагаемости [3]. Применение ПВС возможно вместе с бумажной продукцией, из-за наличия в структуре гидроксильных групп он имеет свойство высокого влагопоглощения, что положительно влияет на смешивание [4]. Проведены исследования, которые показали, что композит на основе ПВС демонстрирует пониженное влагопоглощение после добавления волокна из ананаса и нановолокна бактериальной целлюлозы к чистому ПВС [5]. Модификация ПВС возможна не только путем добавления других составляющих, а также воздействием волнами различной частоты. Этот вид модификации можно осуществить с помощью метода ультразвуковой обработки. В ультразвуковом оборудовании используется энергия колебаний, которая улучшает однородность в матрице ПВС и приводит к увеличению влагостойкости композитов. Многие исследователи использовали ультразвуковую обработку для повышения дисперсности модификаторов при введении в пленку на основе ПВС, однако в ходе исследования не рассматривались механические и физические характеристики чистой пленки ПВС [5–7].

По литературным данным, ультразвуковая обработка приводила к изменению структуры растворов ПВС, после структуризации изменялась прочность пленок на их основе, термические, барьерные и оптические свойства [8–10]. Некоторые исследования посвящены изучению воздействия ультразвука на композиционные материалы на основе ПВС, но информации по влиянию ультразвукового воздействия на растворы ПВС недостаточно для составления общих закономерностей по данному вопросу [11].

Цель данного исследования: изучение влияния ультразвукового воздействия на свойства растворов ПВС и пленок на их основе.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи: ультразвуковая обработка растворов ПВС, сравнительная характеристика вязкости модифицированных растворов ПВС, оптимизация температурно-временных режимов формирования пленок на основе ПВС, исследование свойств растворов ПВС различной концентрации и пленок на их основе до и после ультразвуковой обработки.

Основные свойства покрытий из поливинилового спирта

ПВС применяется в отраслях промышленности, известны различные способы его использования [12]. Производится ПВС в двух формах: полностью гидролизованной и частично гидролизованной, причем последняя обычно используется в технологии упаковки пищевых продуктов. За счет способности к водорастворимости поливиниловый спирт обладает высокой биоразлагаемостью и биосовместимостью, что делает его востребованным для производства пленок для упаковки пищевых продуктов. Благодаря своей гидрофильной природе ПВС можно легко смешивать с натуральными полимерами посредством межмолекулярных / внутримолекулярных водородных связей. Свойства этих смесей зависят от природы компонентов в составе композитной системы. Пленки для упаковки пищевых продуктов на основе ПВС обладают низкой газопроницаемостью. Таким образом, целесообразно использование ПВС для разработки пленочной упаковки на основе биокомпозита с высокими водо- и газобарьерными свойствами, что значительно продлевает срок годности пищевых продуктов [13].

Свойства композиций с ПВС описаны в ряде опубликованных научных работ. Например, проведены исследования композиций поливинилового спирта с крахмалом в разных соотношениях (от 0 до 60 %) в контексте их воздействия на адсорбцию воды, паропроницаемость, механические свойства (процент удлинения при разрыве и прочность на разрыв) и термические характеристики. Во всех рецептурах оба полимера показали хорошую совместимость во время обработки и в полученном материале [14].

Введение ПВС в композицию положительно повлияло на ее функциональные свойства, улучшило газопроницаемость и механические свойства пленок из картофельного крахмала. Рецептура, содержащая 60%

ПВС, показала лучший барьер для водяного пара, более низкую плотность и растворимость, а также лучшие механические характеристики. Пленки на основе ПВС и картофельного крахмала могут быть использованы в качестве биоразлагаемой упаковки как альтернатива синтетическим упаковочным материалам [15].

Проведены исследования композиционных материалов на основе смеси хитозана и поливинилового спирта. Межмолекулярное взаимодействие хитозан–ПВС исследовали с помощью FTIR. Влагосорбционные характеристики смеси хитозан–ПВС при 25 ºС были изучены для определения активности воды в диапазоне от 0,11 до 0,92. Установлено, что содержание влаги повышается с увеличением концентрации ПВС [16].

В исследованиях Агравалла и других в ПВС добавляли модифицированные частицы графита. Это привело к увеличению прочности по сравнению с чистым ПВС. Кроме того, полученные композиты являются более термостойкими по сравнению с ПВС [17].

Композиты на основе ПВС широко используются из-за их уникальных механических и химических свойств в таких областях, как фармацевтика (системы доставки лекарств), тканевая инженерия, биоразлагаемая упаковка и строительные материалы, также свойства данных композитов позволяют рекомендовать их для использования в 3D-печати [17].

Поливиниловый спирт вызывает значительный исследовательский интерес. Это связано с его исключительными свойствами, которые обусловили его широкое применение в самых разных областях, особенно в медицине и фармацевтике. Однако исследования показали, что биоматериалы на основе ПВС имеют некоторые ограничения, которые могут препятствовать их использованию или снижать их эффективность [18].

К ограничениям ПВС мы можем отнести его водорастворимость и низкую термоустойчивость. Но главными его положительными чертами являются его показатели барьерных свойств. Исходя из этого основной задачей использования ПВС как биоразлагаемого полимера – это модификация его для придания низкой растворимости.

Методы модификации свойств покрытий

Различные нетепловые методы, например, ультразвуковая обработка, обработка ионизирующим, гамма-излучениями и ультрафиолетом, могут эффективно изменять функциональные свойства пленок. Эти методы могут улучшать свойства пленок за счет уменьшения размера частиц, усиления межмолекулярного электростатического отталкивания и увеличения степени сшивки биополимеров. Обогащение наноматериалов в биополимерной матрице может повышать структурные и механические свойства пленок за счет образования новых водородных связей между наноматериалами и полимерами. Таким образом, использование нетепловых методов могут быть полезны для улучшения свойств пленок [19].

Использование технологий нетепловой обработки расширяется из-за постоянно растущего спроса на высококачественные и удобные в употреблении продукты с натуральным вкусом и ароматом, без химических добавок и консервантов, а также качественную упаковку с повышенными характеристиками прочности, относительного удлинения и барьерных свойств [20].

Ультразвуковое воздействие – это метод, который можно использовать как самостоятельно, так и в сочетании с другими стандартными методами для получения новых биомедицинских и экологичных инженерных материалов. Ультразвуковая модификация обладает рядом преимуществ, в том числе высокой эффективностью, чистотой и воспроизводимостью. По сравнению с традиционными физическими и химическими методами получения материалов ультразвук не вызывает химического загрязнения, что делает этот метод чрезвычайно ценным в области новых материалов, особенно для модификации полимеров природного происхождения. Исследования показали, что ультразвук совместим с существующими методами подготовки материалов, поскольку он играет важную роль в агломерации, морфологии, кристалличности, деградации и механических свойствах материалов [21].

Ультразвуковые методы обработки применяются во многих гомогенных и гетерогенных реакциях для перемешивания или гомогенизации растворов. Ультразвук может вызывать сильные термические, механические и суперсмешивающие эффекты, а также явление кавитации. Кавитация – это образование, рост и схлопывание пузырьков в жидкости, которые могут дополнительно гомогенизировать частицы в микроскопическом масштабе. Было подтверждено, что ультразвук может влиять на физико-химические свойства полимеров и повышать растворимость материала, что приводит к образованию компактных сетчатых структур внутри пленок.

Кроме того, ультразвук может вызывать химические изменения, которые используются во многих областях химического синтеза. Исследователи использовали ультразвуковое облучение для получения сочетания оксида графена, фосфоновой и фосфиновой кислот с ПВС с шестичленными лактоновыми кольцами и продемонстрировали, что межфазное взаимодействие между компонентами значительно улучшилось [22].

Во многих работах сообщалось о пленке на основе ПВС, полученной с использованием ультразвука, однако информация о влиянии этой обработки на изменение свойств ПВС ограничена. Например, в работе Абрала гель ПВС обрабатывали ультразвуком с использованием ультразвукового зонда мощностью 360 Вт в течение 2,5, 5, 7,5 и 10 мин. Длительность ультразвуковой обработки в течение 7,5 мин приводит к значительному эффекту ($p \leq 0,05$) на увеличение прочности на разрыв, но не на модуль упругости при растяжении и деформацию при разрыве пленки. После этой продолжительности вибрации прочность на разрыв увеличилась почти на 29 %, деформация при разрыве уменьшилась на 30 %, непрозрачность уменьшилась на 22 %, а проницаемость для водяного пара уменьшилась на 11 %. С другой стороны, влагостойкость значительно снизилась (почти на 12 %). Обработанная ультразвуком пленка претерпела большую деформацию решетки и имела более высокую кристаллическую структуру по сравнению с необработанной ультразвуком пленкой. Обработка геля ПВС ультразвуком является потенциальным методом для придания пленке ПВС некоторых свойств, необходимых для упаковки пищевых продуктов [23].

Полимерные покрытия на продуктах питания признаны альтернативным решением для сохранения качества и увеличения срока хранения. Пленки производятся из природных полимеров, таких как углеводы, белки, липиды и их комбинации, а также из синтетических, таких как ПВС, оксипропилцеллюлоза (ОПМЦ), карбоксиметил-целлюлоза (КМЦ). Применение пленок на основе биополимеров расширяется благодаря использованию передовых технологий для улучшения их структурных, физических, механических и барьерных свойств [19].

Анализ работ показал, что для модификации

наиболее часто используется ультразвуковая обработка полимеров. Также результаты, полученные в различных работах, показывают, что данная модификация положительно влияет на улучшение отдельных свойств полимеров.

Влияние ультразвуковой обработки на свойства полимеров

Ультразвук во многих случаях широко использовался с целью гомогенизации различных систем и является весьма выгодным методом деполимеризации макромолекул, поскольку снижает их молекулярную массу путем расщепления наиболее восприимчивой химической связи, не вызывая никаких изменений в химической природе полимера. Большинство эффектов, связанных с контролем молекулярной массы, можно отнести к большим градиентам сдвига и ударным волнам, генерируемым вокруг схлопывающихся кавитационных пузырьков. В целом для того, чтобы любой процесс деградации полимера стал приемлемым для производства, необходимо иметь возможность указать условия обработки ультразвуком, которые приводят к определенному относительному распределению молярной массы. Это требует определения соответствующей мощности обработки, температуры, концентрации и времени обработки [24].

В исследовании Лиу и других рассматривалось влияние ультразвуковой обработки на свойства пленок на основе крахмала батата. Ультразвук с низкой мощностью в 20 кГц использовали для обработки композиции. На термограммах энтальпии желатинизации крахмалов, обработанных ультразвуком, были ниже, чем у необработанного образца. При увеличении амплитуды ультразвука с 40 % до 70 % энтальпия плавления композиции постепенно уменьшалась [25].

Методом электронной микроскопии показано, что после обработки ультразвуком поверхность композитных пленок стала более гладкой. При проведении исследований с помощью атомно-силовой микроскопии установлено, что ультразвуковая обработка привела к снижению шероховатости поверхности пленки. Пленки с ультразвуковой обработкой показали более высокую светопропускаемость, меньшее удлинение при разрыве, более высокую прочность на разрыв и лучшие барьерные свойства для влаги, чем пленки без ультразвуковой обработки [25].

В другом исследовании Абрала и соавторов пленки на основе крахмала саго подвергались обработке ультразвуком во время желатинизации в течение 2,5, 5 и 10 минут. После обработки уменьшалась вязкость раствора, что приводило к получению более тонкой пленки с более низкой проницаемостью для паров влаги по сравнению с необработанной. Было доказано, что ультразвуковая обработка увеличила относительное удлинение пленки на 227 %, ее влагопоглощение снизилось на 29,83 %, а температуру плавления – на 7% [26].

Также воздействию ультразвука был подвергнут раствор из крахмала восковидной кукурузы в исследованиях Янга совместно с другими учеными. Они выявили, что поверхность гранул обработанного ультразвуком восковидного кукурузного крахмала стала более гладкой и наблюдался более низкий диаметр частиц. Было доказано, что ультразвуковое облучение повлияло на распределение длины цепи, двойные спирали, одинарные спирали и аморфное состояние восковидного кукурузного крахмала [27].

В работе Фалсафи с соавторами овсяный крахмал был подвергнут обработке ультразвуком 20 кГц в течение 10 и 20 мин. Проведенные исследования показали наличие трещин и пор на поверхности обработанных гранул крахмала. Очевидное уменьшение гранул крахмала наблюдалось при самой высокой интенсивности обработки ультразвуком. Ультразвуковая обработка также увеличивала содержание амилозы, набухаемость, растворимость, водо- и липидоудерживающую способность; в то время как твердость геля уменьшалась после обработки ультразвуком [28].

Применение ультразвуковой обработки также осуществлялось на пленках на основе белка. В работе Гуля исследовано покрытие на основе муки из лесного ореха с эфирным маслом гвоздики, обработанной в течение 2, 4 и 6 минут ультразвуком. Воздействие проводилось для гомогенизации и получения наноэмульсионных пленок. Доказано, что толщина и водорастворимость пленок значительно уменьшались с увеличением обработки ультразвуком. Также пленки становились более прозрачными при повышении времени обработки. Физико-механические свойства улучшались, а микроструктура пленок становилась более однородной, что приводило к снижению проницаемости водяного пара [29].

Анализ работ по изучению воздействия ультразвука на различные растворы полимеров и покрытий на их основе показал, что ультразвуковая обработка является относительно недорогим и экологически чистым процессом модификации, эффективен для модификации растворов биополимеров и покрытий на их основе. Модифицированные данным способом растворы полимеров и покрытия на их основе обладают лучшей влагостойкостью, большей гибкостью и прочностью. Поэтому приготовление растворов с использованием ультразвука в качестве предварительной обработки является улучшенной и удобной процедурой для улучшения многих свойств покрытий.

Материалы и методы

В качестве исходного материала использовали ПВС марки 098-10, производство Китай, регистрационный номер CAS: 9002-89-5, свойства представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства исходного ПВС

Table 1 – Properties of the initial PVS

Плотность	1,19–1,31 г/см³
t плавления	220–230 ºС
pH (4 % in water) :	5–7
Основное вещество	95,3 %
Гидролизное число	98,6 %
Температура разложения	160–200 ºС

Таблица 2 – Технические характеристики Волна УЗТА-0.2/22-ОМ

Table 2 – Technical characteristics of the UZTA wave-0.2/22- OM

Мощность, ВА	не более 60
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	24±2,4
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
Интенсивность ультразвукового воздействия, Вт/см^2	до 150
Время непрерывной работы, мин	60
Длинна рабочего инструмента, мм	45
Диаметр цилиндрической части, мм	1,5

Объектами исследования являлись растворы ПВС с различной концентрацией в дистиллированной воде и пленки на их основе.

Растворение ПВС в дистиллированной воде проводили на водяной бане при 90 ºС в течение 60 минут. Полученные растворы подвергали обработке УЗ аппаратом «Волна УЗТА-0.2/22-ОМ», технические характеристики которого представлены в таблице 2.

Определение динамической вязкости растворов η проводили по формуле 1 Пуазейля. Для определения использовался прибор ВЗ-246, ГОСТ 33-2016 «Межгосударственный стандарт нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости Определение кинематической и динамической вязкости».

$$\eta = \frac{\pi p r^4}{8LV} t, \quad (1)$$

где ρ – давление, при котором происходит истечение жидкости из капилляра;

r – радиус капилляра;

L – длина капилляра;

V – объем жидкости, протекающей через капилляр;

t – время истечения жидкости в постоянном объеме.

Пленки из растворов ПВС получали методом полива, отверждение пленок проводили при комнатных условиях в течение 24 часов, толщина пленок составляла 2,5–3мм.

Для определения толщины применяли толщиномер С640 (фирма Labthink).

Определение физико-механических свойств пленок проводилось в соответствии с ГОСТ 14236-81 «Пластмассы. Метод испытания полимерных пленок на растяжение». Прибор – разрывная машина РМ-50 при скорости растяжения 100 мм/мин.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследовали динамическую вязкость растворов ПВС с концентраций 5, 7,5 и 10 % при различном времени ультразвуковой обработки, результаты представлены на рисунке 1. Как видно на рисунке, значения вязкости растворов одной концентрации изменяются незначительно, что можно отнести к погрешности подсчетов в связи с методом измерения. Также можно заметить, что вязкость раствора при увеличении концентрации на 2,5 процента увеличивается в 3 раза, тем самым показывая непропорциональность роста вязкости в зависимости от концентрации.

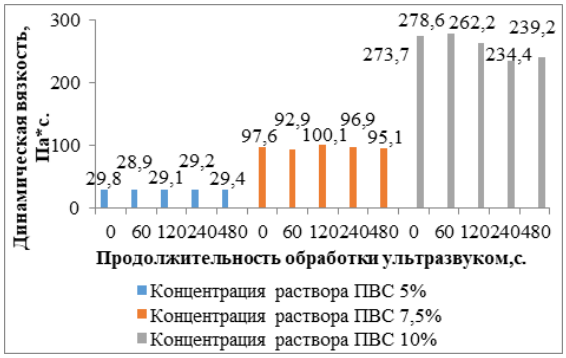


Рисунок 1 – Зависимость динамической вязкости Растворов ПВС с концентрацией 5 %, 7,5 % и 10 % от времени обработки ультразвуком

Figure 1 – Dependence of the dynamic viscosity of PVA solutions with concentrations of 5%, 7.5% and 10% on the time of ultrasound treatment

Ультразвуковая обработка способствовала кавитации раствора, но не изменяла значительно его вязкости. Вследствие этого можно предположить, что происходит частичная деструкция полимера в растворе, заключающаяся в дроблении полимерных цепей, то есть происходит снижение молекулярной массы макромолекул. Вероятно, это связано с тем, что обработка происходит в течение коротких промежутков времени и ультразвуковая обработка повлияла на разрыв водородных связей, тем самым высвободив межмолекулярные гидроксильные группы, активизировав образование новых связей.

На следующем этапе проводили исследования физико-механических характеристик пленок на основе растворов ПВС, обработанных УЗ. Результаты представлены на рисунках 2 и 3.

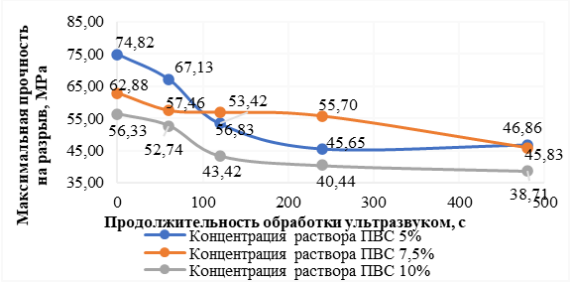


Рисунок 2 – Зависимость максимальной прочности на растяжении пленок на основе растворов ПВС от времени обработки УЗ

Figure 2 – Dependence of the maximum tensile strength of films based on PVA solutions on the time of ultrasonic treatment

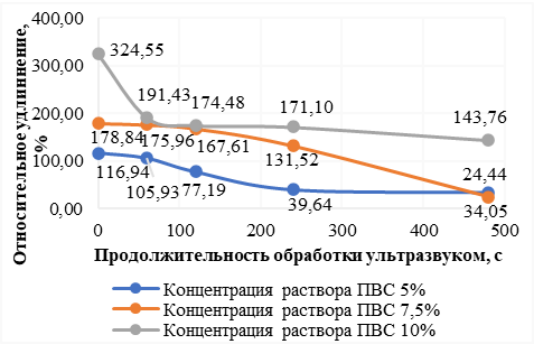


Рисунок 3 – Зависимость относительного удлинения пленок на основе растворов ПВС от времени обработки УЗ

Figure 3 – Dependence of the relative elongation of films based on PVA solutions on the time of ultrasonic treatment

Из представленных на графиках результатов видно, что при увеличении времени обработки УЗ максимальная прочность на разрыв и относительное удлинение уменьшаются. Можно предположить, что воздействие УЗ на растворы ПВС изменяет механизм его полимеризации, которая происходит с нарушением структуры кристаллической решётки, образуя множественные неструктурные соединения, без формирования единой цепочки. При дополнительном рассмотрении влияния обработки ультразвуком также установлена корреляция в сторону уменьшения как прочности, так и растяжения, что свидетельствует о разрушительном влиянии ультразвука на ПВС, связанной с разрушением цепочек на более короткие.

У образцов пленок, полученных из растворов с концентрацией ПВС 7,5 и 10 % при повышении времени обработки ультразвуком, удлинение уменьшается в несколько раз. У образца на основе раствора ПВС с концентрацией 5 % удлинение изменяется линейно. Это свидетельствует об однородности растворов с меньшей концентрацией и с более упорядоченной структурой полимеризации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении влияния ультразвукового воздействия на свойства растворов ПВС и пленок на их основе было установлено: динамическая вязкость неполимеризованного раствора практически не изменяется при увеличении продолжительности обработки УЗ до 480 с; УЗ воздействие влияет на физико-механические свойства пленок. При увеличении вдвое продолжительности УЗ обработки на графиках видно линейное уменьшение прочностных свойств материала.

Предположительно, воздействие ультразвуком повлияло на водородные связи, образованные между молекулами ПВС, что и привело к уменьшению прочностных свойств; при разрыве водородных связей были высвобождены межмолекулярные гидроксильные группы, что предоставляет возможность для создания других связей. Однако для подтверждения данного предположения и для более детального анализа процессов, происходящих при воздействии ультразвука на растворы ПВС и покрытий на их основе, необходимо провести их структурный анализ, например с использованием метода инфракрасной спектроскопии. Таким образом, обработка растворов ПВС ультразвуком является одним из возможных методов модификации для формирования более однородных структур полимерных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang, R., Wang, Y., Ma, D., Ahmed, S., Qin, W. & Liu, Y. (2019). Effects of ultrasonication duration and graphene oxide and nano-zinc oxide contents on the properties of polyvinyl alcohol nanocomposites. Ultrasonics Sonochemistry, 59, 104731. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104731.

2. Kaur, K., Jindal, R., Maiti, M. & Mahajan, S. (2019). Studies on the properties and biodegradability of PVA/Trapa natans starch (N-st) composite films and PVA/N-st-g-poly (EMA) composite films. International Journal of Biological Macromolecules, 123, 826–836. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.134.

3. Premkumar, P.S. (2019). Preparation and electrical studies on pure and oxygen plasma treated polyvinyl alcohol films. Journal of Materials Research and Technology, 8(2), 2232–2237. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.023.

4. Abdullah, Z.W., Dong, Y., Davies, I.J. & Barbhuiya, S. (2017). PVA, PVA Blends, and Their Nanocomposites for Biodegradable Packaging Application. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 56(12), 1307–1344. https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1275684.

5. Abral, H., Basri, A., Muhammad, F., Fernando, Y., Hafizulhaq, F., Mahardika, M., Sugiarti, E., Sapuan, S.M., Ilyas, R.A. & Stephane, I. (2019). A simple method for improving the properties of the sago starch films prepared by using ultrasonication treatment. Food Hydrocolloids, 93, 276–283. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.012.

6. Dong, Z., Dong, F., Dai, X., Mao, L. & Bai, Z. (2024). Development of polyvinyl alcohol based active inner coating reinforced with chlorogenic acid and functionalized layered clay for food packaging. Progress in Organic Coatings, 196, 108740. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108740.

7. Jamali, A.R., Shaikh, A.A. & Chandio, A.D. (2024). Influence of Ultrasonication Treatment on Mechanical, Optical, and Physiochemical Properties of Polyvinyl-alcohol/cornstarch Biocomposite Thin Films. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 13(5), 053009. https://doi.org/10.1149/2162-8777/ad458e.

8. Abral, H., Anugrah, A.S., Hafizulhaq, F., Handayani, D., Sugiarti, E. & Muslimin, A.N. (2018). Effect of nanofibers fraction on properties of the starch based biocomposite prepared in various ultrasonic powers. International Journal of Biological Macromolecules, 116, 1214–1221. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.067.

9. Bagal, M.V., Saini, R.R., Shaikh, A.R.I., Patil, S., Mohod, A.V. & Pinjari, D.V. (2022). Effect of additives on degradation of poly vinyl alcohol (PVA) using ultrasound and microwave irradiation. International Polymer Processing, 38(1), 30–41. https://doi.org/10.1515/ipp-2022-4232.

10. Singha, P., Rani, R. & Badwaik, L.S. (2022). Sweet lime peel-, polyvinyl alcohol- and starch-based biodegradable film: preparation and characterization. Polymer Bulletin, 80(1), 589–605. https://doi.org/10.1007/s00289-021-04040-x.

11. Abral, H., Atmajaya, A., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Kadriadi, Handayani, D., Sapuan, S.M. & Ilyas, R.A. (2020). Effect of ultrasonication duration of polyvinyl alcohol (PVA) gel on characterizations of PVA film. Journal of Materials Research and Technology, 9(2), 2477–2486. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.078.

12. Majeed, Z., Mubashir, M., Show, P.L. & Manzoor, E. (2023). Biodegradation Study of Polyvinyl Alcohol-Based Biocomposites and Bionanocomposites. Polyvinyl Alcohol-Based Biocomposites and Bionanocomposites, 31–58. Portico. https://doi.org/10.1002/9781119593218.ch2.

13. Panda, P.K., Sadeghi, K. & Seo, J. (2022). Recent advances in poly (vinyl alcohol)/natural polymer based films for food packaging applications: A review. Food Packaging and Shelf Life, 33, 100904. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100904.

14. Gómez-Aldapa, C.A., Velazquez, G., Gutierrez, M.C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J. & Aguirre-Loredo, R.Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. Materials Chemistry and Physics, 239, 122027. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027.

15. Gómez-Aldapa, C.A., Velazquez, G., Gutierrez, M.C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J. & Aguirre-Loredo, R.Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. Materials Chemistry and Physics, 239, 122027. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027.

16. Srinivasa, P.C., Ramesh, M.N., Kumar, K.R. & Tharanathan, R.N. (2003). Properties and sorption studies of chitosan–polyvinyl alcohol blend films. Carbohydrate Polymers, 53(4), 431–438. https://doi.org/10.1016/s0144-8617(03)00105-x.

17. Pawan Kumar Agrawal, Pragya Sharma, V.K. Singh, Sakshi Chauhan. (2023). A Comprehensive Review on the Engineering of Biocompatible Polyvinyl Alcohol Composites with Enhanced Properties Using Carbonaceous Fillers, J. Mater. Environ. Sci., 14(5), 560–581.

18. Teodorescu, M., Bercea, M. & Morariu, S. (2019). Biomaterials of PVA and PVP in medical and pharmaceutical applications: Perspectives and challenges. Biotechnology Advances, 37(1), 109–131. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.008.

19. Das, D., Panesar, P.S., Saini, C.S. & Kennedy, J.F. (2022). Improvement in properties of edible film through non-thermal treatments and nanocomposite materials: A review. Food Packaging and Shelf Life, 32, 100843. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100843.

20. Singla, M. & Sit, N. (2021). Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. Ultrasonics Sonochemistry, 73, 105506. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105506.

21. Cai, B., Mazahreh, J., Ma, Q., Wang, F. & Hu, X.

(2022). Ultrasound-assisted fabrication of biopolymer materials: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 209, 1613–1628. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.055.

22. Lan, W., Liang, X., Lan, W., Ahmed, S., Liu, Y. & Qin, W. (2019). Electrospun Polyvinyl Alcohol/d-Limonene Fibers Prepared by Ultrasonic Processing for Antibacterial Active Packaging Material. Molecules, 24(4), 767. https://doi.org/10.3390/molecules24040767.

23. Abral, H., Atmajaya, A., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Kadriadi, Handayani, D., Sapuan, S.M. & Ilyas, R.A. (2020). Effect of ultrasonication duration of polyvinyl alcohol (PVA) gel on characterizations of PVA film. Journal of Materials Research and Technology, 9(2), 2477–2486. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.078.

24. Gogate, P.R. & Prajapat, A.L. (2015). Depolymerization using sonochemical reactors: A critical review. Ultrasonics Sonochemistry, 27, 480–494. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.019.

25. Liu, P., Wang, R., Kang, X., Cui, B. & Yu, B. (2018). Effects of ultrasonic treatment on amylose-lipid complex formation and properties of sweet potato starch-based films. Ultrasonics Sonochemistry, 44, 215–222. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.029.

26. Abral, H., Hartono, A., Hafizulhaq, F., Handayani, D., Sugiarti, E. & Pradipta, O. (2019). Characterization of PVA/cassava starch biocomposites fabricated with and without sonication using bacterial cellulose fiber loadings. Carbohydrate Polymers, 206, 593–601. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.054.

27. Yang, Q.-Y., Lu, X.-X., Chen, Y.-Z., Luo, Z.-G. & Xiao, Z.-G. (2019). Fine structure, crystalline and physicochemical properties of waxy corn starch treated by ultrasound irradiation. Ultrasonics Sonochemistry, 51, 350–358. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.001.

28. Falsafi, S.R., Maghsoudlou, Y., Rostamabadi, H., Rostamabadi, M.M., Hamedi, H. & Hosseini, S.M.H. (2019). Preparation of physically modified oat starch with different sonication treatments. Food Hydrocolloids, 89, 311–320. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.046.

29. Gul, O., Saricaoglu, F.T., Besir, A., Atalar, I. & Yazici, F. (2018). Effect of ultrasound treatment on the properties of nano-emulsion films obtained from hazelnut meal protein and clove essential oil. Ultrasonics Sonochemistry, 41, 466–474. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.10.011.

Информация об авторах

М. И. Губанова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

Н. С. Баженов — ассистент кафедры «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

И. А. Кирш — доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

О. А. Банникова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

Н. С. Шмакова — кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

З. В. Широхова — студент кафедры «Химия, технология полимеров и упаковочных решений» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский Биотехнологический Университет (РОСБИОТЕХ)».

REFERENCES

1. Zhang, R., Wang, Y., Ma, D., Ahmed, S., Qin, W. & Liu, Y. (2019). Effects of ultrasonication duration and graphene oxide and nano-zinc oxide contents on the properties of polyvinyl alcohol nanocomposites. Ultrasonics Sonochemistry, 59, 104731. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104731.

2. Kaur, K., Jindal, R., Maiti, M. & Mahajan, S. (2019). Studies on the properties and biodegradability of PVA/Trapa natans starch (N-st) composite films and PVA/N-st-g-poly (EMA) composite films. International Journal of Biological Macromolecules, 123, 826-836. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.134.

3. Premkumar, P.S. (2019). Preparation and electrical studies on pure and oxygen plasma treated polyvinyl alcohol films. Journal of Materials Research and Technology, 8(2), 2232-2237. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.023.

4. Abdullah, Z.W., Dong, Y., Davies, I.J. & Barbhuiya, S. (2017). PVA, PVA Blends, and Their Nanocomposites for Biodegradable Packaging Application. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 56(12), 1307-1344. https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1275684.

5. Abral, H., Basri, A., Muhammad, F., Fernando, Y., Hafizulhaq, F., Mahardika, M., Sugiarti, E., Sapuan, S.M., Ilyas, R.A. & Stephane, I. (2019). A simple method for improving the properties of the sago starch films prepared by using ultrasonication treatment. Food Hydrocolloids, 93, 276-283. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.012.

6. Dong, Z., Dong, F., Dai, X., Mao, L. & Bai, Z. (2024). Development of polyvinyl alcohol based active inner coating reinforced with chlorogenic acid and functionalized layered clay for food packaging. Progress in Organic Coatings, 196, 108740. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108740.

7. Jamali, A.R., Shaikh, A.A. & Chandio, A.D. (2024). Influence of Ultrasonication Treatment on Mechanical, Optical, and Physiochemical Properties of Polyvinyl-alcohol/cornstarch Biocomposite Thin Films. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 13(5), 053009. https://doi.org/10.1149/2162-8777/ad458e.

8. Abral, H., Anugrah, A.S., Hafizulhaq, F., Handayani, D., Sugiarti, E. & Muslimin, A.N. (2018). Effect of nanofibers fraction on properties of the starch based biocomposite prepared in various ultrasonic powers. International Journal of Biological Macromolecules, 116, 1214-1221. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.067.

9. Bagal, M.V., Saini, R.R., Shaikh, A.R.I., Patil, S., Mohod, A.V. & Pinjari, D.V. (2022). Effect of additives on degradation of poly vinyl alcohol (PVA) using ultrasound and microwave irradiation. International Polymer Processing, 38(1), 30-41. https://doi.org/10.1515/ipp-2022-4232.

10. Singha, P., Rani, R. & Badwaik, L.S. (2022). Sweet lime peel-, polyvinyl alcohol- and starch-based biodegradable film: preparation and characterization. Polymer Bulletin, 80(1), 589-605. https://doi.org/10.1007/s00289-021-04040-x.

11. Abral, H., Atmajaya, A., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Kadriadi, Handayani, D., Sapuan, S.M. & Ilyas, R.A. (2020). Effect of ultrasonication duration of polyvinyl alcohol (PVA) gel on characterizations of PVA film. Journal of Materials Research and Technology, 9(2), 2477-2486. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.078.

12. Majeed, Z., Mubashir, M., Show, P.L. & Manzoor, E. (2023). Biodegradation Study of Polyvinyl Alcohol-Based Biocomposites and Bionanocomposites. Polyvinyl Alco-

hol-Based Biocomposites and Bionanocomposites, 31-58. Portico. https://doi.org/10.1002/9781119593218.ch2.

13. Panda, P.K., Sadeghi, K. & Seo, J. (2022). Recent advances in poly (vinyl alcohol)/natural polymer based films for food packaging applications: A review. Food Packaging and Shelf Life, 33, 100904. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100904.

14. Gómez-Aldapa, C.A., Velazquez, G., Gutierrez, M.C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J. & Aguirre-Loredo, R.Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. Materials Chemistry and Physics, 239, 122027. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027.

15. Gómez-Aldapa, C.A., Velazquez, G., Gutierrez, M.C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J. & Aguirre-Loredo, R.Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. Materials Chemistry and Physics, 239, 122027. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027.

16. Srinivasa, P.C., Ramesh, M.N., Kumar, K.R. & Tharanathan, R.N. (2003). Properties and sorption studies of chitosan-polyvinyl alcohol blend films. Carbohydrate Polymers, 53(4), 431-438. https://doi.org/10.1016/s0144-8617(03)00105-x.

17. Pawan Kumar Agrawal, Pragya Sharma, V.K. Singh, Sakshi Chauhan. (2023). A Comprehensive Review on the Engineering of Biocompatible Polyvinyl Alcohol Composites with Enhanced Properties Using Carbonaceous Fillers, J. Mater. Environ. Sci., 14(5), 560-581.

18. Teodorescu, M., Bercea, M. & Morariu, S. (2019). Biomaterials of PVA and PVP in medical and pharmaceutical applications: Perspectives and challenges. Biotechnology Advances, 37(1), 109-131. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.008.

19. Das, D., Panesar, P.S., Saini, C.S. & Kennedy, J.F. (2022). Improvement in properties of edible film through non-thermal treatments and nanocomposite materials: A review. Food Packaging and Shelf Life, 32, 100843. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100843.

20. Singla, M. & Sit, N. (2021). Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. Ultrasonics Sonochemistry, 73, 105506. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105506.

21. Cai, B., Mazahreh, J., Ma, Q., Wang, F. & Hu, X. (2022). Ultrasound-assisted fabrication of biopolymer materials: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 209, 1613-1628. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.055.

22. Lan, W., Liang, X., Lan, W., Ahmed, S., Liu, Y. & Qin, W. (2019). Electrospun Polyvinyl Alcohol/d-Limonene Fibers Prepared by Ultrasonic Processing for Antibacterial Active Packaging Material. Molecules, 24(4), 767. https://doi.org/10.3390/molecules24040767.

23. Abral, H., Atmajaya, A., Mahardika, M., Hafizulhaq, F., Kadriadi, Handayani, D., Sapuan, S.M. & Ilyas, R.A. (2020). Effect of ultrasonication duration of polyvinyl alcohol (PVA) gel on characterizations of PVA film. Journal of Materials Research and Technology, 9(2), 2477-2486. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.078.

24. Gogate, P.R. & Prajapat, A.L. (2015). Depolymerization using sonochemical reactors: A critical review. Ultrasonics Sonochemistry, 27, 480-494. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.019.

25. Liu, P., Wang, R., Kang, X., Cui, B. & Yu, B. (2018). Effects of ultrasonic treatment on amylose-lipid complex formation and properties of sweet potato starch-based films. Ultrasonics Sonochemistry, 44, 215-222. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.029.

26. Abral, H., Hartono, A., Hafizulhaq, F., Handayani, D., Sugiarti, E. & Pradipta, O. (2019). Characterization of PVA/cassava starch biocomposites fabricated with and without sonication using bacterial cellulose fiber loadings. Carbohydrate Polymers, 206, 593-601. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.054.

27. Yang, Q.-Y., Lu, X.-X., Chen, Y.-Z., Luo, Z.-G. & Xiao, Z.-G. (2019). Fine structure, crystalline and physicochemical properties of waxy corn starch treated by ultrasound irradiation. Ultrasonics Sonochemistry, 51, 350-358. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.001.

28. Falsafi, S.R., Maghsoudlou, Y., Rostamabadi, H., Rostamabadi, M.M., Hamedi, H. & Hosseini, S.M.H. (2019). Preparation of physically modified oat starch with different sonication treatments. Food Hydrocolloids, 89, 311-320. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.046.

29. Gul, O., Saricaoglu, F.T., Besir, A., Atalar, I. & Yazici, F. (2018). Effect of ultrasound treatment on the properties of nano-emulsion films obtained from hazelnut meal protein and clove essential oil. Ultrasonics Sonochemistry, 41, 466-474. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.10.011.

Information about the authors

M. I. Gubanova — Candidate of Technical Sciences, docent, Associate Professor of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

N. S. Bazhenov — Assistant of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

I. A. Kirsh — Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

O. A. Bannikova — Candidate of Technical Sciences, docent, Associate Professor of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

N. S. Shmakova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

Z. V. Shirokhova — Student of the Departments of Chemistry, Technology of Polymers and Packaging Solutions, Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 235–238.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 235–238.

Научная статья
2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК 628.16.081.32
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.033 EDN: VULSJO

ВЛИЯНИЕ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ НА МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ОБРАБОТАННОГО ВОДНОГО РАСТВОРА

Биляль Саад Таха [1], Андрей Сергеевич Алексеев [2], Джубари Мохаммед Кадер [3], Надежда Вячеславовна Алексеева [4]

[1, 4] Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
[2] Тамбовский государственный университет им. Державина, Тамбов, Россия
[3] Кафедра технологий топливно-энергетического машиностроения, инженерия нефтегазовых технологий – Киркук, Северный технический университет, Мосул, Ирак
[1, 2, 3, 4] bilalsaad_t@yahoo.com

Аннотация. *Активированный уголь (АУ) является неполярным материалом с высокой молекулярной адсорбционной способностью. Благодаря большой площади поверхности, микропористой структуре, адсорбционной эффективности и пригодности к вторичной переработке, он подходит для использования с различными материалами для адсорбции органических загрязнителей в сточных водах с различными уровнями концентрации. В статье обсуждается уровень минерализации двух распространенных видов активированного угля: березовой древесины и скорлупы кокосового ореха. Результат показывает, что максимальная электропроводность водного раствора после контакта с активированным углем на основе березы составила 978 мкСм/см, а кокоса – 98 мкСм/см. Это указывает на то, что активированный уголь на основе березы имеет более высокое содержание минералов, чем активированный уголь на основе кокоса.*

Ключевые слова: *активированный уголь, электропроводность, время, концентрация, соль.*

Благодарности: *автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.*

Для цитирования: Таха Б. С., Алексеев А. С., Джубари М. К., Алексеева Н. В. Влияние активированного угля на минеральный состав обработанного водного раствора // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 235–238. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.033. EDN: https://elibrary.ru/VULSJO.

Original article

INFLUENCE OF ACTIVATED CARBON ON MINERAL COMPOSITION OF TREATED AQUEOUS SOLUTION

Bilal Saad Taha [1], Andrey S. Alekseev [2], Mohammed Qader Gubari [3], Nadezda V. Alekseeva [4]

[1, 4] Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation
[2] Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russian Federation
[3] Fuel and Energy Engineering Technologies Department, Oil and Gas Technologies Engineering – Kirkuk, Northern Technical University, Mosul, Iraq
[1, 2, 3, 4] bilalsaad_t@yahoo.com

Abstract. *Activated carbon (AC) is a nonpolar material with a high molecular adsorption capacity. Due to its large specific surface area, microporous structure, adsorption efficiency, and reusability, it is suitable for application with various materials for the adsorption of organic contaminants from wastewater with different concentration levels. This study discusses the mineralization level of two common types of activated carbon derived from birch wood and coconut shell. The results demonstrated that the maximum electrical conductivity of the aqueous solution after contact with birch-based activated carbon reached 978 μS/cm, whereas for coconut-based activated carbon it was 98 μS/cm. These findings indicate that birch-based activated carbon contains a higher mineral content compared to coconut-based activated carbon.*

Keywords: *Activated carbon, Electrical conductivity, Time, Concentration, Salt.*

Acknowledgements*: the author expresses gratitude to colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.*

For citation: Taha, B. S., Alekseev, A. S., Gubari, M. Q. & Alekseeva, N. V. (2026). Influence of activated carbon on mineral composition of treated aqueous solution. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 235-238. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.033. EDN: https: //elibrary.ru/VULSJO.

INTRODUCTION

Activated carbon (AC) consists of three distinct components: single-layer carbon with a crystalline lattice, graphite microcrystals, and amorphous carbon, with graphite microcrystals constituting the major fraction of activated carbon [1]. One of the most effective strategies

© Таха Б. С., Алексеев А. С., Джубари М. К., Алексеева Н. В., 2026

for wood waste management involves the production of activated carbon with a uniform pore size distribution and a large specific surface area through the addition of chemical agents to carbonaceous char, which can be efficiently used for the removal of chemical contaminants from wastewater [2].

Methods of chemical activation of carbonaceous raw materials are highly effective for the production of microporous carbon materials. These methods are based on the introduction of chemical additives into the precursor material, followed by carbonization in an inert atmosphere or in the presence of a gaseous oxidizing agent. Chemical promoters such as $ZnCl_2$, Al_2O_3, H_3PO_4, carbonates, and alkali metals are commonly employed as activating agents [3]. Activated carbon can be produced from biomass through thermal treatment either by direct activation or direct carbonization, or by preliminary carbonization of biomass followed by activation of the resulting biochar into activated carbon [4]. Chemical activation reduces the energy consumption required for raw material activation while simultaneously increasing the specific surface area of the final product [5].

Birch-based activated carbon is widely used for drinking water purification as well as in water treatment processes involving natural water sources [6]. On the other hand, coconut shell is one of the most commonly used raw materials worldwide for the production of activated carbon [7]. The production of activated carbon is aimed at obtaining materials with desired pore volume, specific surface area, and pore size distribution characteristics [4]. Activated sorbents derived from birch wood and coconut shell possess highly porous surfaces. The pore size ranges from 2 to 30 nm for birch wood–based activated carbon and from 2 to 10 nm for coconut shell–based activated carbon [8]. Coconut shell is considered an important precursor for activated carbon production because the resulting material exhibits a high micropore content, low ash content, and high reactivity [9]. For example, it is effectively applied in the catalytic oxidation of hydrogen sulfide to elemental sulfur or in water dechlorination through the redox reaction: $Cl_2 + C \rightarrow C{-}O + Cl^-$.

On the other hand, chemical activation leads to an increase in the content of chemical components in activated carbon, which may subsequently leach into aqueous solutions upon contact with the adsorbent. Du-ring the application of activated carbon in water treatment processes, organic water-soluble compounds are removed from the solution; simultaneously, organic components are adsorbed onto the sorbent, while water-soluble inorganic components may migrate from the activated carbon into the solution. The aim of this study is to evaluate the mineralization level of solutions in contact with activated carbon, assessed through changes in electrical conductivity. This parameter may depend on the characteristics of the activated carbon (mass fraction, particle size and shape, and pore geometry) as well as on the properties of the electrolyte (type of dissolved component, concentration, temperature, and acidity).

The mechanisms of electric current transfer in these systems differ significantly: electronic conduction occurs within the activated carbon, whereas ionic conduction takes place in the electrolyte [11]. Therefore, activated carbon represents a solid material lacking ionic conductivity and can be considered a dielectric within the heterogeneous system under investigation. An exception arises at high activated carbon concentrations, where particle agglomerates may form conductive pathways between the electrodes. However, in systems with low activated carbon concentrations (less than 15 wt.%), such agglomeration is unlikely, and electrical conduction occurs predominantly through ionic transport. Under these conditions, the ion transport pathway becomes longer, resulting in a decrease in the electrical conductivity of the suspension [12].

MATERIALS AND CHEMICALS

Activated Carbon Used

Two types of industrial activated carbon were employed in this study:

1. Activated carbon from birch BAC-A.
2. Activated carbon from coconut shells CAC.

The industrial crushed activated carbon served as the primary source material for this study, with its characteristics presented in Table 1 (parameters as specified by the manufacturer). Samples with a particle size of 1–1.5 mm were selected for each carbon type for experimental purposes. The bulk density of each material was determined gravimetrically.

Distilled water with an electrical conductivity of 4 μS/cm at a room temperature of 21 °C was used in the experimental investigations and for washing the activated carbon granules.

The mineralization level was determined by conductometric analysis based on changes in the electrical conductivity of the contacting water. Electrical conductivity measurements of the aqueous solution were performed using an HM Digital COM-100 conductivity meter. Each measurement was repeated multiple times, and the mean value of the measured parameter was calculated.

The pH of water in contact with the activated carbon was measured using an HM Digital PH-200 pH meter.

Powdered activated carbon (both birch wood-based and coconut shell-based) was produced by grinding prewashed crushed activated carbon in a laboratory mill. The resulting powder was subsequently dispersed in either an aqueous sodium chloride solution or distilled water to prepare a suspension.

Table 1 – Characteristics of the activated carbon used
Таблица 1 – Характеристики используемого активированного угля

Parameter	Type of Activated Carbon	
	Birch wood BAC-A GOST 6217-74	Coconut TU 20.14.71-001-2009357701-2023
parameters declared by the manufacturer		
Type of coal	Crushed	
Particle size	1.0–3.6 mm	0.4–1.7 mm
Adsorption activity for iodine, not less	60 %	60%
Bulk density, not more	240 g/dm^3	500 g/dm^3
Ash mass fraction, not more than	6 %	3%
Measured parameters		
Particle size	1.0–1.5 mm	1.0–1.5 mm
Bulk density	210 g/dm^3	700 g/dm^3

METHOD

In the first stage of the study, the change in the mineralization level of water in contact with granular activated carbon was evaluated. For this purpose, 25 g of the carbon sample was immersed in 250 mL of distilled water and agitated for a defined period of 24 hours, after which the water was filtered and the carbon was replenished with fresh distilled water (250 mL). The degree of mineralization was assessed by measuring the electrical conductivity of the filtered water. The experiment was terminated upon reaching a constant electrical conductivity level as a function of contact time, after which the spent granular activated carbon was filtered and dried for subsequent analyses.

The second stage of the study aimed to determine the effect of powdered activated carbon concentration on the electrical conductivity of the suspension. Distilled water and aqueous sodium chloride solutions at concentrations of 2.5 and 5 g/L were used as electrolytes, to which varying amounts of powdered activated carbon (0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 g) were added, yielding corresponding concentrations of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 g/L.

During the suspension experiments, powder particles were maintained in a suspended state by continuous magnetic stirring at 300 rpm, resulting in a mean particle velocity of 0.2 m/s within the container. The particle sedimentation velocity, calculated on the basis of the mean powder particle size and system parameters according to Stokes' law for the laminar flow regime (Ar < 36), was determined to be 2.3 mm/s for birch wood-based powder and 0.7 mm/s for coconut shell-based powder.

RESULTS AND DISCUSSION

For systematic presentation and discussion, the results were organized into two sections as outlined below.

In all experiments, the granular activated carbon concentration was maintained at 100 g/L. During the experiment, the activated carbon was agitated using a magnetic stirrer; at defined time intervals, the carbon was filtered and the electrical conductivity of the resulting solution was measured. The obtained results are presented in Figure 1.

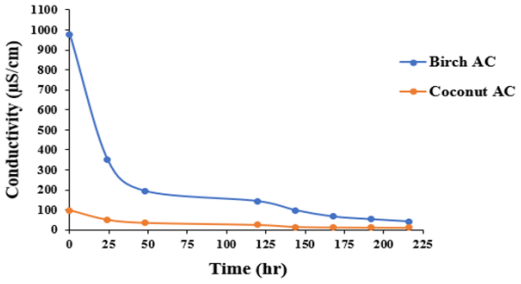


Figure 1 – Electrical conductivity of water in contact with activated carbon depending on the contact time

Рисунок 1 – Электропроводность воды при контакте с активированным углем в зависимости от времени контакта

As shown in Figure 1, the electrical conductivity of the solution in contact with birch wood-based activated carbon powder is higher than that of the coconut shell-based activated carbon solution, owing to the greater salt content in birch wood-based activated carbon compared to its coconut shell-based counterpart. Furthermore, the electrical conductivity of the solution following treatment with coconut shell-based activated carbon can be considered to exhibit negligible variation over time. Accordingly, throughout the entire experiment, the following quantities of soluble salts were leached from crushed activated carbon with a particle size of 1–1.5 mm into water, expressed as sodium chloride equivalent:

- Birch wood-based activated carbon: 0.01 g NaCl/g activated carbon.
- Coconut shell-based activated carbon: 0.001 g NaCl/g activated carbon.

The residual electrical conductivity of the aqueous solution saturated with powdered activated carbon was determined to be 41.6 µS/cm for birch wood-based carbon and 10.2 µS/cm for coconut shell-based carbon.

Effect of Dispersed Activated Carbon Powder on the Electrical Conductivity of the Suspension

The powder obtained from washed crushed activated carbon was used for dispersion purposes. The electrical conductivity of suspensions containing both types of activated carbon, free of mineral impurities, was investigated. In this experiment, quantities of (0.1, 0.5, 1, 1.5, and 2) g of activated carbon were added to (2.5 and 5) g/L NaCl solutions for a contact period of 20 minutes. The results are presented in Figure 2 below.

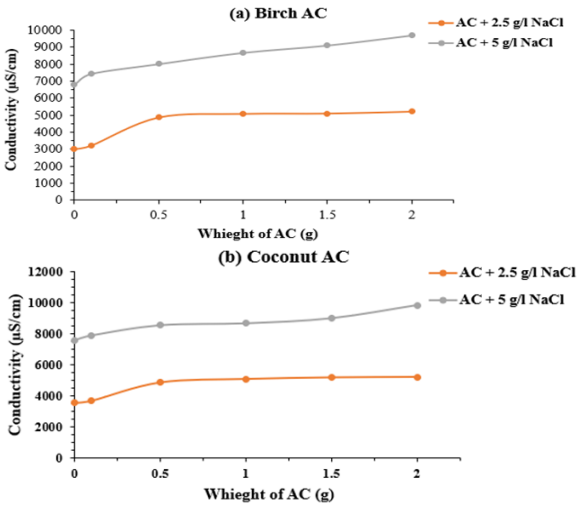


Figure 2 – Comparison of the conductivity of suspensions containing two types of salt-free activated carbon, with the addition of different masses of activated carbon to (2.5 and 5) g/l NaCl

Рисунок 2 – Сравнение электропроводности суспензий, содержащих два типа активированного угля, не содержащего соли, с добавлением активированного угля различной массы к (2,5 и 5) г/л NaCl

Figure 2 presents a comparison of the electrical conductivity of suspensions containing the two types of washed activated carbon. Varying quantities of activated carbon were added to 2.5 and 5 g/L NaCl solutions: birch wood-based activated carbon (Fig. 2(a)) and coconut shell-based activated carbon (Fig. 2(b)). It is evident that the electrical conductivity increases with increasing activated carbon concentration in the solution.

According to classical suspension conductivity theory [13], at low volume fractions of the dispersed phase that does not participate in electrical current transmission, the electrical conductivity of the suspension decreases with increasing solid-phase concentration. However, the experimental data demonstrated an increase in electrical conductivity, which can be attributed to the presence of residual water-soluble components in the activated carbon powder that are released into the solution upon dispersion, resulting in a conductivity increase that out-

weighs the expected decrease. In addition to mineral salts, the powder particles may contain water-soluble acids or alkaline compounds that can influence the pH of the solution. Figure 3 illustrates the dependence of suspension acidity on the quantity of dispersed powder.

Birch wood-based activated carbon induces a greater shift in suspension pH than coconut shell-based activated carbon. The pattern of pH variation is consistent across both carbon types, with the suspension acidity shifting toward higher pH values, indicating the presence of alkaline components in the activated carbon. These experimental findings are in agreement with data reported in the literature, according to which an increased alkaline content in the precursor mixture is required to enhance the specific surface area and pore volume of carbon materials produced by thermal decomposition [6]. Furthermore, coconut shell-based activated carbon is characterized by a high carbon content and low inorganic matter content [10], which is consistent with the lower electrical conductivity of its contacting solution compared to that of birch wood-based activated carbon.

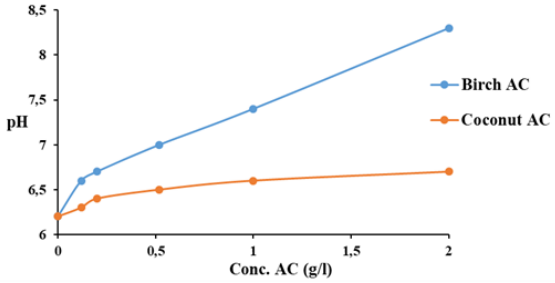


Figure 3 – Change in suspension acidity depending on the concentration of activated carbon powder of birch AC and coconut AC

Рисунок 3 – Изменение кислотности суспензии в зависимости от концентрации порошка активированного угля березового и кокосового

CONCLUSION

Birch wood-based and coconut shell-based activated carbons are among the most widely used carbonaceous adsorbents for the purification of water and aqueous solutions, owing to their large surface area and well-developed porous structure. Upon contact with aqueous solutions, these carbons preferentially adsorb organic water-soluble components. The present study demonstrated that the interaction of aqueous solutions with activated carbon can lead to an increase in the mineralization level of the solution, attributable to the mineral constituents present within the activated carbon matrix. The results indicate that birch wood-based activated carbon elevates the mineralization level of the contacting solution to a greater extent than coconut shell-based activated carbon. In both cases, the pH of the contacting solutions shifts toward higher values.

Overall, the findings demonstrate that plant-derived activated carbon can alter the mineralization level of a solution upon contact, through the transfer of mineral components from the activated carbon phase into the solution. The results obtained may be applied in the design and optimization of water treatment processes employing adsorption units with activated carbon, enabling the prediction of the mineralization level of the treated water. They may also be utilized in the modeling of processes involving low-concentration water-carbon suspensions for the estimation of the electrical conductivity of the suspensions employed.

REFERENCES

1. Jiang, C., Cui, S., Han, Q., Li, P., Zhang, Q., Song, J. & Li, M. (2019). Study on application of activated carbon in water treatment. In IOP conference series: Earth and environmental science (Vol. 237, No. 2, p. 022049). IOP Publishing.

2. Babel, K., Janasiak, D. & Jurewicz, K. (2012). Electrochemical hydrogen storage in activated carbons with different pore structures derived from certain lignocellulose materials. Carbon, 50(14), 5017-5026.

3. Chesnokova, N.V., Mikovab, N.M., Ivanov, I.P. and Kuznetsova, B.N. (2014). Synthesis of Carbon Sorbents by Chemical Modification of Fossil Coals and Plant Biomass. Journal of Siberian Federal University. Chemistry (7) 1 (2014 7). 42-53.

4. Bergna, D., Varila, T., Romar, H. & Lassi, U. (2018). Comparison of the properties of activated carbons produced in one-stage and two-stage processes. C, 4(3), 41.

5. Kushwaha, S., Sreelatha, G. & Padmaja, P. (2013). Physical and chemical modified forms of palm shell: preparation, characterization and preliminary assessment as adsorbents. Journal of Porous Materials, 20, 21-36.

6. Кузнецов, Б.Н., Чесноков, Н.В., Цыганова, С.И., Микова, Н.М., Иванов, И.П. & Иванченко, Н.М. (2016). Пористые углеродные материалы, полученные химической активацией древесины березы. Химия твердого топлива, (1), 25-25.

7. Syna, N. & Valix, M. (2003). Modelling of gold (I) cyanide adsorption based on the properties of activated bagasse. Minerals Engineering, 16(5), 421-427.

8. Kishibaev, K.K., Tokpaev, R.R., Atchabarova, A.A., Efremov, S.A., Voropaeva, N.L., Fernández-Sanjurjo, M.J. & Karpachev, V.V. (2016). Activated carbons of varied nature in recovery of gold. Russian Journal of Applied Chemistry, 89, 381-387.

9. Azari, B.L.H., Wicaksono, T., Damayanti, J.F. & Azari, D.F.H. (2021). The Study of The Electrical Conductivity and Activation Energy on Conductive Polymer Materials. Computational and Experimental Research In Materials and Renewable Energy, 4(2), 71-79.

10. Barroso Bogeat, A. (2021). Understanding and tuning the electrical conductivity of activated carbon: a state-of-the-art review. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 46(1), 1-37.

11. Volfkovich, Y.M., Mikhalin, A.A., Rychagov, A.Y. [et al.]. Activated Carbons as Nanoporous Electron-Ion-Exchangers. Russ J Electrochem 56, 869-882 (2020). https://doi.org/10.1134/S1023193520100122.

12. Электропроводность электролитов-суспензий системы NaF-AlF3-CaF2-Al2O3 Бакин К.Б., Симакова О.Н., Поляков П.В., Михалев Ю.Г., Симаков Д.А., Гусев А.О. / Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 2 (2011 4). 162-169.

13. Духин, С.С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. Киев : Изд-во «Наукова думка», 1976. 248 с.

Information about the authors

B.S. Taha - PhD student of the Department of «Technological processes, apparatuses and technosphere safety» of the Tambov State Technical University.

A.S. Alekseev - student of the Department of «Chemistry» of the Derzhavin Tambov State University.

M.Q. Gubari - Ph.D. of Engineering Sciences, lecturer of the Fuel and Energy Engineering Technologies Department, Oil and Gas Technologies Engineering - Kirkuk, Northern Technical University.

N.V. Alekseeva - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Technological processes, apparatuses and technosphere safety» of the Tambov State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 239–247.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 239–247.

Научная статья
2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК66.063.61, 66.063.8
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.034 EDN: ORUXOA

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССОВ ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ И ГОМОГЕНИЗАЦИИ В УСТАНОВКЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Алексей Анатольевич Кухленко [1], Максим Иннокентьевич Аршинский [2], Евгений Александрович Новицкий [3], Алексей Юрьевич Кулаков [4] Юрий Вадимович Жильцов [5], Александр Павлович Горохов [6]

[1, 2, 3, 4, 5, 6] ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», Красноярск, Россия
[2, 3, 5, 6] НОЦ исследований и разработок R&D центра Института нефти и газа Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия
[1] ak-79@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-3088-1198
[2] ArshinskiyMI@knipi.rosneft.ru, https://orcid.org/0009-0009-1707-0658
[3] NovitskiyEA@knipi.rosneft.ru, https://orcid.org/0009-0002-9264-899X
[4] KulakovAYu@knipi.rosneft.ru, https://orcid.org/0009-0009-3285-7838
[5] ZhiltsovYuV@knipi.rosneft.ru, https://orcid.org/0009-0003-9573-7776
[6] GorokhovAP@knipi.rosneft.ru, https://orcid.org/0000-0004-5568-8129

Аннотация. *Разработана математическая модель, описывающая кинетику процессов эмульгирования и гомогенизации в установке периодического действия. Математическая модель позволяет вычислить оптимальную продолжительность проведения указанных процессов. При построении математической модели технологическая схема установки гомогенизации, состоящая из соединенных между собой трубопроводами емкостного аппарата и диспергатора роторно-пульсационного типа, была представлена в виде ячеечной схемы. Процесс приготовления устойчивой однородной эмульсии при моделировании рассматривался в виде двух последовательно выполняемых этапов. Первый этап – предварительное перемешивание компонентов – заключался в расчете времени равномерного распределения массы дисперсной фазы из донной части емкостного аппарата по всему объему жидкости. Второй этап – эмульгирование – рассматривался как процесс убыли массы крупной фракции капель дисперсной фазы при ее прохождении через диспергатор. В качестве модельных объектов рассматривались две установки гомогенизации нефти, содержащей 1 % об. воды. По результатам выполненного моделирования установлено, что процесс предварительного перемешивания для обоих установок осуществляется достаточно быстро и при заложенных параметрах работы диспергатора и перемешивающего устройства не превышает одной минуты для каждой из установок. Это связано с тем, что расчетное среднее время циркуляции капель внутри объема емкостного аппарата достаточно мало и по расчету составило 7 и 11 секунд при обработке 0,3 и 0,5 м^3 нефти соответственно. Установлено, что лимитирующей стадией приготовления однородных составов является этап эмульгирования. Продолжительность этого этапа зависит от нескольких ключевых факторов: объема перерабатываемой жидкости, циркуляционного расхода жидкости через диспергатор и коэффициента эффективности диспергатора. Показано, что продолжительность этапа эмульгирования составляет от 15…20 мин до 60…180 мин в зависимости от заложенных в математическую модель значений ключевых факторов. Большая продолжительность этапа эмульгирования связана с высокими значениями среднего времени циркуляции капель через диспергатор. По результатам расчета в зависимости от принятых режимов работы перемешивающего устройства и диспергатора среднее время циркуляции жидкости по контуру установки составило от 176 до 430 с и от 294 до 714 с при обработке 0,3 и 0,5 м^3 нефти соответственно. Оптимальная продолжительность процессов гомогенизации и эмульгирования в установке периодического действия складывается из времени, затрачиваемого на осуществление этапа предварительного перемешивания, и оптимального времени проведения этапа эмульгирования.*

Ключевые слова: *эмульгирование, гомогенизация, диспергирование, оптимизация, роторно-пульсационный аппарат, нефть, продолжительность процесса.*

Для цитирования: Расчет оптимальной продолжительности эмульгирования и гомогенизации в установке периодического действия / А. А. Кухленко [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 239–247. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.034. EDN: https://elibrary.ru/ORUXOA.

Original article

CALCULATION OF OPTIMAL DURATION OF EMULSIFICATION AND HOMOGENIZATION PROCESSES IN A BATCH PLANT

Alexey A. Kukhlenko [1], Maxim I. Arshinsky [2], Evgeniy A. Novitszkiy [3], Alexey Yu. Kulakov [4], Yuriy V. Zhiltsov [5], Alexandr P. Gorokhov [6]

© Кухленко А. А., Аршинский М. И., Новицкий Е. А., Кулаков А. Ю., Жильцов Ю. В., Горохов А. П., 2026

А. А. КУХЛЕНКО, М. И. АРШИНСКИЙ, Е. А. НОВИЦКИЙ, А. Ю. КУЛАКОВ,
Ю. В. ЖИЛЬЦОВ, А. П. ГОРОХОВ

[1, 2, 3, 4, 5, 6] LLC "RN-KrasnoyarskNIPIneft", Krasnoyarsk, Russia
[2, 3, 5, 6] Scientific and Educational Research and Development Center of the R&D Center of the Institute of Oil and Gas of the Siberian Federal University,Krasnoyarsk, Russia
[1] ak-79@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-3088-1198
[2] ArshinskiyMI@knipi.rosneft.ru, https://orcid.org/0009-0009-1707-0658
[3] NovitskiyEA@knipi.rosneft.ru, https://orcid.org/0009-0002-9264-899X
[4] KulakovAYu@knipi.rosneft.ru, https://orcid.org/0009-0009-3285-7838
[5] ZhiltsovYuV@knipi.rosneft.ru, https://orcid.org/0009-0003-9573-7776
[6] GorokhovAP@knipi.rosneft.ru, https://orcid.org/0000-0004-5568-8129

Abstract. *A mathematical model describing the kinetics of emulsification and homogenization processes in a batch plant has been developed. The mathematical model allows us to calculate the optimal duration of these processes. When constructing the mathematical model, the technological scheme of the homogenization unit, consisting of a capacitive apparatus and a rotary pulsation type dispersant connected by pipelines, was presented in the form of a cellular circuit. The process of preparing a stable homogeneous emulsion in the simulation was considered in the form of two sequentially executed stages.The first stage, preliminary mixing ofcomponents, consisted in calculating the time for the uniform distribution of the mass of the dispersed phase from the bottom of the tank apparatus over the entire volume of the liquid. The second stage, emulsification, was considered as a process of decreasing the mass of a large fraction of droplets of the dispersed phase during its passage through the dispersant. Two oil homogenization plants containing 1% of the volume were considered as model objects. water. Based on the results of the simulation, it was found that the pre-mixing process for both installations is carried out fast enough and, with the operating parameters of the dispersant and the mixing device, does not exceed one minute for each of the installations. This is due to the fact that the estimated average circulation time of droplets inside the volume of the tank apparatus is quite short and was calculated to be 7 and 11 seconds when processing 0.3 and 0.5 m^3 of oil, respectively. It has been established that the limiting stage of the preparation of single-oxygen formulations is the emulsification stage. The duration of this stage depends on several key factors: the volume of the liquid being processed, the circulating flow rate of the liquid through the dispersant, and the efficiency coefficient of the dispersant. It is shown that the duration of the emulsification stage ranges from 15-20 minutes to 60-180 minutes, depending on the values of key factors embedded in the mathematical model. The long duration of the emulsification stage is associated with high values of the average droplet circulation time through the dispersant.According to the calculation results, depending on the accepted modes of operation of the mixing device and the dispersant, the average times of liquid circulation along the installation circuit ranged from 176 to 430 s and from 294 to 714 s when processing 0.3 and 0.5 m^3 of oil, respectively. The optimal duration of the homogenization and emulsification processes in a periodic unit consists of the time spent on the pre-mixing stage and the optimal time for the emulsification stage.*

Keywords: *emulsification, homogenization, dispersion, optimization, rotary pulsation apparatus, oil, duration of the process.*

For citation: Kukhlenko, A. A., Arshinskiy, M. I., Novitskiy, E. A., Kulakov, A. Yu., Zhiltsov, Yu. V. & Gorokhov, A. P. (2026). Calculation of optimal duration of emulsification and homogenization processes in a batch plant. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 239-247. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.034. EDN: https: //elibrary.ru/ORUXOA.

ВВЕДЕНИЕ

Приготовление однородных по составу продуктов при обработке гетерогенных жидкостей является одним из распространенных процессов в химической, нефтехимической, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности [1–4].

В настоящее время изучению закономерностей таких процессов, как эмульгирование и гомогенизация, в современной отечественной и зарубежной литературе уделяется большое внимание. В основном проводимые исследования направлены на получение закономерностей для расчета размеров капель, получаемых в процессе приготовления эмульсий [5–7]. При максимально эффективной организации процесса эмульгирования дробление капель в активной зоне диспергатора протекает за один акт обработки дисперсной среды [7–12].

При этом в зависимости от размеров получившихся капель во многом будет определяться устойчивость приготовленной эмульсии к расслоению [13]. При недостаточно эффективной обработке дисперсной среды часть получаемых капель будет иметь крупные размеры. Крупная фракция капель, попадая в зоны низкой интенсивности обработки среды, в зависимости от соотношения плотностей сплошной и дисперсной фаз будет либо осаждаться в донной части аппарата, либо всплывать к поверхности раздела жидкой и газовой фазы разрушая дисперсную среду.

Для повышения эффективности обработки дисперсной среды и сокращения вероятности проскока крупных фракций капель через активную зону обработки в диспергаторе используют различные приемы. Среди наиболее распространенных приемов повышения эффективности обработки дисперсной среды относятся снижение расхода жидкости через активную зону диспергатора (увеличение времени пребывания капель в активной зоне диспергатора), повышение кратности обработки среды через диспергатор, а также совмещение этих приемов.

В любом случае получение устойчивой к расслоению эмульсии подразумевает наличие высокоэффективной конструкции диспергатора, работа которого позволяет достичь требуемых размеров капель мелкой фракции.

Одними из наиболее эффективных аппаратов для проведения процессов гомогенизации и эмульгирования при обработке больших объемов рабочих сред являются динамические смесители роторного типа – роторно-пульсационные аппараты (РПА) [1–6, 8–13]. В таких аппаратах повышение эффективности обработки среды может быть достигнуто любым из вышеперечисленных приемов.

В промышленности при производстве эмульсий наибольшее распространение получили установки периодического действия, работающие при циркуляции жидкости по технологическому контуру между емкостным аппаратом и диспергатором.

При такой организации работы установки гомогенизации возникает ряд сложностей, связанных с определением оптимального времени проведения процесса, которые до сих пор не решены. Например,

не представляется возможным вычислить распределение получаемых капель по размеру и соответственно рассчитать долю крупных фракций капель, которые, пройдя через диспергатор, будут коалесцировать с другими каплями и тем самым ускорять процесс разрушения приготовленной эмульсии. Устранение этого негативного фактора осуществляется повторным дроблением образующихся крупных капель, что увеличивает время проведения эмульгирования. Еще одной сложностью при расчете оптимального времени проведения процесса является разная кратность прохождения отдельных капель через диспергатор в силу наличия активного перешивания обрабатываемой среды в емкостном аппарате и циркуляции жидкости внутри емкостного аппарата.

Целью настоящей работы является разработка математической модели, позволяющей определить оптимальное время обработки среды при ее циркуляции по технологическому контуру установки гомогенизации, содержащей в своем составе емкостной аппарат и диспергатор.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Разработка математической модели для описания кинетики приготовления эмульсии и проверка ее работоспособности выполнялось для двух установок, принципиальные схемы которых идентичны друг другу. Основные различия между установками гомогенизации заключаются в объемах емкостных аппаратов и соотношениях геометрических параметров перемешивающих устройств. На рисунке 1 показана общая принципиальная схемаустановок гомогенизации.

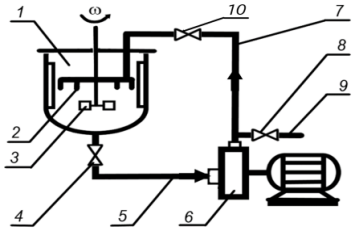


Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема установок гомогенизации: *1* – емкостной аппарат; *2* – распределительное устройство; *3* – турбинная мешалка; *4* – донный вентиль; *5* – подводящий трубопровод; *6* – роторно-пульсационный аппарат; *7* – отводящий трубопровод; *8* – вентиль; *9* – патрубок отбора проб; *10* – регулирующий вентиль

Figure 1 – Schematic diagram of homogenization plants: 1 –agitated vessel; 2 – distribution device; 3 – turbine agitator; 4 – bottom valve; 5 – supply pipe; 6 – rotary pulsating disperser; 7 – discharge pipe; 8 – valve; 9 –sampling tubes; 10 – regulating valve

Принцип работы установок, схема которых приведена на рисунке 1, заключается в следующем.

Предназначенные для гомогенизации компоненты первоначально загружаются в емкостной аппарат *1*, снабженный отражательными перегородками и распределительным устройством тороидального типа *2*. После взлива компонентов в емкостном аппарате включается перемешивающее устройство – турбинная мешалка открытого типа *3*. Затем открывается донный вентиль *4*, и жидкость из емкостного аппарата *1* через подводящий трубопровод *5*, РПА *6* и отводящий трубопровод *7* начинает циркулировать по контуру установки. Крупные капли дисперсной фазы, проходя через РПА *6,* разрушаются и перемешиваются в сплошной фазе, в результате чего образуется эмульсия. Вывод эмульсии из РПА *6* и ее ввод в емкостной аппарат *1* осуществляется по отводящему трубопроводу *7* через распределительное устройство *2*. Отводы распределительного устройства *2* погружены в среднюю часть объема жидкости емкостного аппарата для исключения падающей струи. Отводящий трубопровод *7* снабжен регулирующим вентилем *10*. Из отводящего трубопровода *7* с помощью вентиля *8* осуществляется отбор проб.

При построении модели принято допущение о том, что дисперсная фаза характеризуется большей плотностью по сравнению со сплошной фазой. Объемная доля дисперсной фазы принималась равной 1 %.

Математическое моделирование работы технологических установок гомогенизации, принципиальная схема которых показана на рисунке 1, выполнялась на основе марковского процесса массопереноса, подразумевающего ячеечную схему представления установки [13–17]. При таком способе описания сложных технологических схем используются достаточно простые математические зависимости.

Ячеечная схема представления установок гомогенизации показана на рисунке 2.

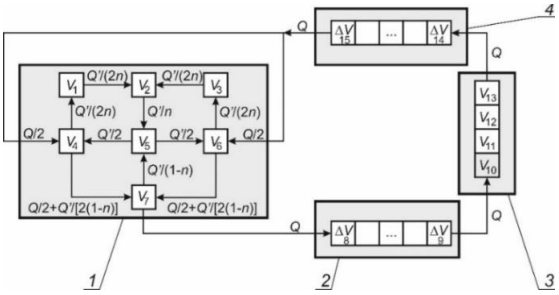


Рисунок 2 – Ячеечная схема представления установок гомогенизации: *1* – емкостной аппарат; *2* – подводящий трубопровод; *3* – РПА; *4* – отводящий трубопровод

Figure 2 – Cellular diagram of the representation of homogenization plants: *1* – agitated apparatus; *2* – supply pipe; *3* – RPD; *4* – discharge pipe

Емкостной аппарат на рисунке 2 изображен в виде семи ячеек, работающих в режимах, близких к аппарату идеального смешения. Поток жидкости *Q'* образуется при вращении мешалки в емкостном аппарате. Направление потоков жидкости *Q'* внутри емкостного аппарата соответствует типу используемых в обоих установках мешалок – открытые турбинные. Объемы ячеек емкостного аппарата и расходные значения потоков жидкости между ячейками емкостного аппарата могут быть определены различными способами. Расходный коэффициент *n* для потока *Q'* определяет неравномерность распределения потока *Q'* между верхней и нижней частями объема жидкости по отношению к уровню расположения мешалки. Так как ввод жидкости в объем емкостного аппарата осуществляется через распределительное устройство, выходные отверстия патрубков которого расположены в средней части объема емкостного аппарата и направлены к его днищу, то ввод циркуляционного потока *Q* осуществляется в четвертую и шестую ячейки. При этом потоки обрабатываемой среды из распределительного устройства *Q*/2 направлены из четвертой и шестой ячеек в седьмую.

РПА на рисунке 2 представлен в виде последовательно соединенных ячеек, каждая из которых работает в режиме, близком к аппарату идеального смешения. Объемы ячеек РПА определяются на основе расчета объемов внутренних полостей аппарата: объема центральной части, объемами свободного пространства внутри рабочих органов аппарата (ротора и статора) и объемом камеры озвучивания.

Подводящий и отводящий трубопроводы на рисунке 2 показаны в виде последовательно соединенных элементарных ячеек, работающих в режимах, близких к аппарату идеального вытеснения. Каждая ячейка подводящего и отводящего трубопровода характеризуется элементарным объемом $\Delta V=Q\cdot\Delta t$, где Δt – единичное время, с. Количество ячеек идеального вытеснения, входящих в составы подводящего n_{in} и отводящего n_{out} трубопроводов вычисляется по выражениям:

$$n_{in} = V_{in} / \Delta V, \quad (1)$$

$$n_{out} = V_{out} / \Delta V, \quad (2)$$

где V_{in} и V_{out} – внутренние объемы подводящего и отводящего трубопроводов, м^3.

В таком случае время t можно представить в виде функции дискретных отсчетов $t_i=i\cdot\Delta t$, где i – номер временного отсчета.

Поскольку каждая ячейка подводящего и отводящего трубопроводов работает в режиме, близком к режиму идеального вытеснения, то работа девятой и пятнадцатой ячеек может быть смоделирована как работа восьмой и четырнадцатой ячеек соответственно подводящего и отводящего трубопровода, но с некоторой задержкой по времени. Величины временных задержек для девятой и пятнадцатой ячеек определяется количеством элементарных ячеек, составляющих подводящий и отводящий трубопроводы n_{in} и n_{out} соответственно.

Для математического описания процессов эмульгирования и гомогенизации предполагали, что в начальный момент времени дисперсная и сплошная фазы представляют две макрофазы и имеют минимальную границу раздела. При этом в начальный момент времени дисперсная фаза вследствие большей плотности находится в донной части емкостного аппарата (в седьмой ячейке).

Для получения гомогенного состава жидкости первоначально необходимо выполнить процедуру предварительного перемешивания дисперсной фазы в объеме сплошной фазы с целью разрушения макрофаз и равномерного распределения компонентов по всему объему, после чего измельчить крупную фракцию капель, пропустив ее через РПА, в результате чего образуется устойчивая к расслоению эмульсия.

Предварительное перемешивание фаз осуществляется как в объеме емкостного аппарата с помощью турбинной мешалки, так и за счет организации циркуляции среды через РПА. На этапе предварительного перемешивания скорость вращения мешалки и скорость вращения ротора РПА соответствуют номинальным скоростям вращения этих устройств, определенных технологическим расчетом или по паспортным данным. Математическая модель стадии предварительного перемешивания с учетом ранее сделанных допущений описывается системой уравнений:

$$m_{1,i+1} = m_{1,i} + \frac{\Delta VQ'}{2nQ}\left(\frac{m_{4,i}}{V_4} - \frac{m_{1,i}}{V_1}\right); \quad (3)$$

$$m_{2,i+1} = m_{2,i} + \frac{\Delta VQ'}{2nQ}\left(\frac{m_{1,i}}{V_1} + \frac{m_{3,i}}{V_3} - \frac{2m_{2,i}}{V_2}\right); \quad (4)$$

$$m_{3,i+1} = m_{3,i} + \frac{\Delta VQ'}{2nQ}\left(\frac{m_{6,i}}{V_6} - \frac{m_{3,i}}{V_3}\right); \quad (5)$$

$$m_{4,i+1} = m_{4,i} + \frac{\Delta VQ'}{2Q}\left[\frac{m_{5,i}}{V_5} - \frac{(1+Q/Q')m_{4,i}}{V_4}\right] + m_{15,i}/2; \quad (6)$$

$$m_{5,i+1} = m_{5,i} + \frac{\Delta VQ'}{Q}\left(\frac{m_{2,i}}{nV_2} + \frac{m_{7,i}}{(1-n)V_7} - \frac{m_{5,i}}{V_5}\right); \quad (7)$$

$$m_{6,i+1} = m_{6,i} + \frac{\Delta VQ'}{2Q}\left[\frac{m_{5,i}}{V_5} - \frac{(1+Q/Q')m_{6,i}}{V_6}\right] + m_{15,i}/2; \quad (8)$$

$$m_{7,i+1} = m_{7,i} + \frac{\Delta VQ'}{2Q}\left(\frac{1}{1-n} + \frac{Q}{Q'}\right)\times \times\left(\frac{m_{4,i}}{V_4} + \frac{m_{6,i}}{V_6} - \frac{2m_{1,i}}{V_1}\right); \quad (9)$$

$$m_{8,i+1} = \frac{\Delta V}{V_7} m_{7,i}; \quad (10)$$

$$m_{9,i+1} = \begin{cases} 0, & \text{при } i < n_{in}; \\ m_{8,i-n_{in}} & \text{при } i \geq n_{in}; \end{cases} \quad (11)$$

$$m_{k,i+1} = m_{k,i} + \Delta V\left(\frac{m_{k-1,i}}{V_{k-1}} - \frac{m_{k,i}}{V_k}\right); \quad \text{при } k \in [10;13]; \quad (12)$$

$$m_{14,i+1} = \frac{\Delta V}{V_{13}} m_{13,i}; \quad (13)$$

$$m_{15,i+1} = \begin{cases} 0, & \text{при } i < n_{out}; \\ m_{14,i-n_{out}}, & \text{при } i \geq n_{out}, \end{cases} \quad (14)$$

где k – номер ячейки.

Начальные условия для решения системы (3)-(14) записываются как:

$$m_{k,0} = \begin{cases} 0, & \text{при } k \in [1;6] \cap [8;15]; \\ m_0; & \text{при } k = 7, \end{cases} \quad (15)$$

где m_0 – начальная масс дисперсной фазы.

Для решения системы уравнений (3)–(14) необходимо доопределить объемы каждой из ячеек и величины объемных расходов потоков, создаваемых мешалкой и РПА. Вычисление объемов ячеек трубопроводов и РПА осуществляется на основе конструкторской документации. Расчет объема ячеек в емкостном аппарате и объемного расхода жидкости, создаваемого вращением мешалки, может быть выполнен на основе (Computational Fluid Dynamics) CFD-моделирования или с использованием методик, изложенных в [18]. Вычисление циркуляционного расхода жидкости через РПА выполняется на основе методики, изложенной в [19].

Решение системы уравнений (3)–(14) после определения необходимых параметров позволяет оценить равномерность распределения массы дисперсной фазы по ячейкам технологической схемы.

Следует отметить, что равномерность распределения дисперсной фазы по объему ячеек технологической схемы не учитывает устойчивость к расслоению полученной эмульсии. Это связано с тем, что основной вклад в распределение массы дисперсной фазы по ячейкам технологической схемы вносит размещенная в емкостном аппарате мешалка, так как обычно расход Q' намного превышает объемный расход Q. Поэтому при гипотетическом завершении процедуры предварительного перемешивания и отключения мешалки в емкостном аппарате приготовленная эмульсия достаточно быстро расслоится.

Для приготовления устойчивой эмульсии необходимо разрушить крупную фракцию капель дисперсной фазы. Для этого необходимо обеспечить попадание капель крупного размера в активные зоны РПА, где получаемые в результате дробления капли образуют мелкую фракцию капель, из которых получается эмульсия, устойчивая к расслоению. При этом, как было рассмотрено ранее, нужно принимать во внимание, что при прохождении через РПА отдельные капли воды будут подвергаться недостаточной для образования устойчивой эмульсии обработке. Такие капли при снижении интенсивности внешнего воздействия будут осаждаться под действием силы тяжести либо коалесцировать в потоке с другими каплями, в результате чего приготовленная дисперсная система будет разрушаться. Разрушить такие капли можно только при их повторном попадании в диспергатор.

Расчет массы крупных капель $M_{k,i}$ и ее изменение во времени для каждой технологической ячейки с учетом сделанных допущений и предположений можно выполнить изрешения системы уравнений:

$$M_{1,i+1} = M_{1,i} + \frac{\Delta V Q'}{2nQ}\left(M_{4,i} - M_{1,i}\right); \quad (16)$$

$$M_{2,i+1} = M_{2,i} + \frac{\Delta V Q'}{2nQ}\left(M_{1,i} + M_{3,i} - 2M_{2,i}\right); \quad (17)$$

$$M_{3,i+1} = M_{3,i} + \frac{\Delta V Q'}{2nQ}\left(M_{6,i} - M_{3,i}\right); \quad (18)$$

$$M_{4,i+1} = M_{4,i} + \frac{\Delta V Q'}{2Q}\left[M_{5,i} - \left(1 + \frac{Q}{Q'}\right)M_{4,i}\right] + \frac{M_{15,i}}{2}; \quad (19)$$

$$M_{5,i+1} = M_{5,i} + \frac{\Delta V Q'}{Q}\left(\frac{M_{2,i}}{n} + \frac{M_{7,i}}{(1-n)} - M_{5,i}\right); \quad (20)$$

$$M_{6,i+1} = M_{6,i} + \frac{\Delta V Q'}{2Q}\left[M_{5,i} - \left(1 + \frac{Q}{Q'}\right)M_{6,i}\right] + \frac{M_{15,i}}{2}; \quad (21)$$

$$M_{7,i+1} = M_{7,i} + \frac{\Delta V Q'}{2Q}\left(\frac{1}{1-n} + \frac{Q}{Q'}\right) \times \times \left(M_{4,i} + M_{6,i} - 2M_{1,i}\right); \quad (22)$$

$$M_{8,i+1} = \frac{\Delta V}{V_7} M_{7,i}; \quad (23)$$

$$M_{9,i+1} = \begin{cases} 0, & \text{при } i < n_{in}; \\ M_{8,i-n_{in}} & \text{при } i \geq n_{in}; \end{cases} \quad (24)$$

$$M_{k,i+1} = M_{k,i} + \Delta V\left(\frac{M_{k-1,i}}{V_{k-1}} - \frac{M_{k,i}}{V_k}\right), \quad \text{при } k \in [10; 11; 13]; \quad (25)$$

$$M_{12,i} = M_{12,i} - \frac{\Delta V}{V_{12}} M_{12,i} + (1-\chi)\frac{\Delta V}{V_{11}} M_{11,i}; \quad (26)$$

$$M_{14,i+1} = \frac{\Delta V}{V_{13}} M_{13,i}; \quad (27)$$

$$M_{15,i+1} = \begin{cases} 0, & \text{при } i < n_{out}; \\ M_{14,i-n_{out}}, & \text{при } i \geq n_{out}. \end{cases} \quad (28)$$

Система уравнений (16)–(28) рассчитывает убыль массы крупных капель $M_{k,i}$ в ячейках технологической схемы в i+1-й момент времени. В качестве начальных условий при решении системы уравнений (16)–(28) принимали, что все начальное распределение массы дисперсной фазы в объеме емкостного аппарата после завершения этапа предварительного перемешивания представляет крупную фракцию капель.

Скорость убыли крупной фракции капель можно охарактеризовать коэффициентом эффективности дробления χ. Данный коэффициент вычисляется как отношение массы мелких фракций капель, образующихся в результате дробления крупных фракций, к общей массе крупных фракций капель, приходящих из одиннадцатой в двенадцатую ячейку. Переход капель из одиннадцатой в двенадцатую ячейку соответствует переходу капель из объема прорезей одного цилиндра РПА в объем прорезей другого цилиндра.

Численное значение коэффициента χ зависит от многих параметров: геометрических параметров цилиндров ротора и статора РПА, количества и порядка размещения цилиндров ротора и статора внутри РПА, скорости вращения вала ротора, диссипации мощности в активных зонах РПА, времени пребывания капель в активных зонах, равномерности распределения диссипируемой мощности в объеме активных зон и т.д. В силу сложности вычисления численного значения коэффициента χ наиболее простым способом его определения является эмпирический.

В настоящей работе не преследовалась цель установления закономерностей по расчету численного значения коэффициента χ от перечисленных выше параметров, однако оценка его влияние на кинетику процессов эмульгирования и гомогенизации представляла практический интерес.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Проверка работоспособности математической модели выполнялось для двух установок гомогенизации нефти, в которой содержится 1 % об. воды. Обе установки гомогенизации снабжены одинаковыми РПА, но отличаются объемами емкостных аппаратов и геометрическими размерами лопастей открытых турбинных мешалок. Емкостной аппарат первой установки с номинальным объемом $V_{ном}$ = 0,4 м^3 рассчитан на гомогенизацию V_0 = 0,3 м^3 нефти. Во второй установке емкостной аппарат с номинальным объемом $V_{ном}$ = 0,63 м^3 предназначен для гомогенизации V_0 = 0,50 м^3 нефти. Объем емкостных аппаратов и конструктивных параметров мешалок, используемых в установках гомогенизации, приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Расчет режимов течения жидкости внутри емкостных аппаратов и определение величин потоков Q' выполняли на основе CFD-моделирования. На рисунке 3 показана цветовая карта локального распределения скоростей движения нефти в объеме емкостного аппарата с $V_{ном}$ = 0,4 м^3.

При получении цветовых карт скоростей течения нефти, представленной на рисунке 3, принималось, что частота вращения мешалки составляла 360 мин$^{-1}$; коэффициент динамической вязкости нефти – μ = 37·10^{-3}Па·с; плотность нефти – $\rho_н$ = 895 кг/м^3; плотность воды – $\rho_в$ = 1000 кг/м^3.

Таблица 1 – Геометрические характеристики емкостных аппаратов

Table 1 – Geometric parameters of capacitive vessels

Наименование параметра	Ед. измерения	Обозначение	Значение	
Номинальный объем аппарата	м^3	$V_{ном}$	0,4	0,63
Диаметр аппарата	м	D	0,8	1,0
Общая высота аппарата	м	H	0,875	0,875
Высота аппарата (цилиндрическая часть)	м	$H_р$	0,675	0,720
Тип днища аппарата	–		Элипт.	Элипт.
Объем днища (полуэлипс)	м^3	$V_д$	0,067	0,131
Высота заполнения аппарата	м	$Hж$	0,663	0,720

Таблица 2 – Геометрические характеристики открытых турбинных мешалок

Table 2 – Geometric parameters of open turbine agitators

Параметр мешалки	Ед. измерения	Обозначение	Значение	
Номинальный объем емкостного аппарата	м^3	$V_{ном}$	0,400	0,630
Диаметр мешалки	м	$d_м$	0,250	0,280
Количество лопастей	м	z	6	6
Длина лопасти	м	L	0,063	0,070
Высота лопасти	м	b	0,050	0,056
Высота установки мешалки над днищем	м	$H_м$	0,250	0,280

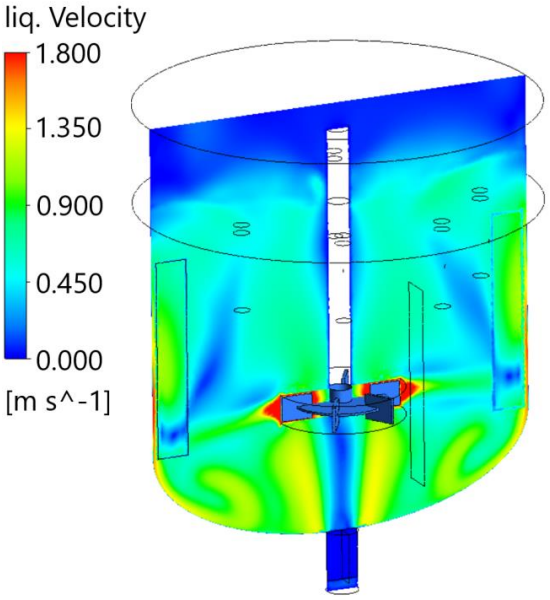


Рисунок 3 – Цветовая карта распределения локальных скоростей нефти в объеме $V_{ном}$ = 0,4 м^3

Figure 3 – Color map of the distribution of local oil velocities in volume V_n= 0.4 m^3

Из рисунка 3 видно, что наибольшую скорость нефть приобретает в области лопаток мешалки. При этом интенсивность перемешивания нефти в донной части аппарата несколько выше, чем в объеме нефти, находящейся в верхней части емкостного аппарата.

На основе результатов CFD-моделирования работы емкостных аппаратов были рассчитаны величины потоков Q'. Для емкостного аппарата с $V_{ном}$ = 0,4 м^3 величина Q'=41,94·10^{-3} м^3/с.

Аналогичный CFD-расчет выполнялся и для емкостного аппарата с $V_{ном}$ = 0,63 м^3. При частоте вращения мешалки, равном 360 мин$^{-1}$, установлено, что Q' = 46,67·10^{-3} м^3/с.

Расходный коэффициент для обоих установок составил n ≈ 0,55.

Циркуляционный расход через РПА задавался на основе напорно-расходной характеристики, приведенной на сайте производителя и рисунке 4.

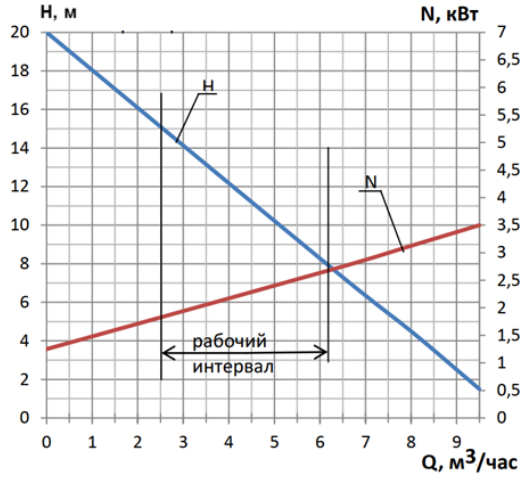


Рисунок 4 – Напорно-расходная характеристика РПА

Figure 4 – Pressure head vs flow though RPD curve

На рисунке 4 приведена напорно-расходная характеристика РПА по воде при стандартных условиях. Из рисунка 4 видно, что величина объемного расхода воды Q в рабочем диапазоне варьируется в пределах (0,7…1,7)·10^{-3}м^3/с, что на порядок меньше величины Q', рассчитанных на основе CFD-моделирования при течении жидкости внутри емкостного аппарата.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты численного моделирования первого этапа процесса приготовления однородного состава нефти – этапа предварительного перемешивания компонентов – показаны на рисунке 5.

Расчет концентраций воды, показанный на рисунке 5, в емкостном аппарате и РПА проводился по формуле:

$$C=m_{ap}/V_{ap}, \quad (29)$$

где $m_{ap}=\sum_{k=1}^{7} m_k$ и $V_{ap}=\sum_{k=1}^{7} V_k$ – для емкостного аппарата и $m_{ap}=\sum_{k=10}^{13} m_k$ и $V_{ap}=\sum_{k=10}^{13} V_k$ – для РПА.

Из рисунка 5 видно, что достижение равномерного распределения массы воды в объемах емкостного аппарата и РПА осуществляется при небольшой

длительности обработки жидкостей. Для обоих установок гомогенизации при выбранных параметрах работы мешалки и РПА оно не превышает 1 мин.

Таким образом, приняв распределение капель после завершения этапа предварительного перемешивания в качестве начальных условий для решения системы уравнений (16)–(28), можно рассчитать изменение массы крупной фракции капель в каждой ячейке технологической схемы от продолжительности осуществления процесса эмульгирования.

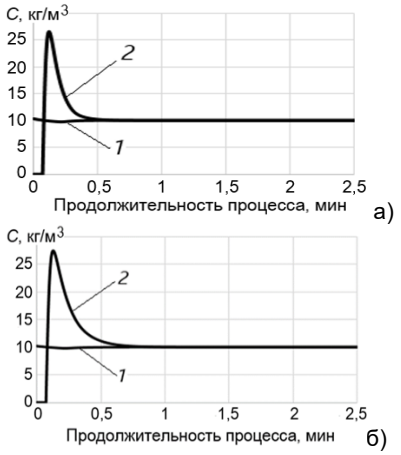


Рисунок 5 – Изменение концентраций воды в объеме емкостного аппарата и РПА от продолжительности стадии предварительного перемешивания при Q=0,69·10^{-3} м^3/с: *1* – емкостной аппарат; *2* – РПА; *а* –V_0=0,3 м^3; Q'=41,9·10^{-3} м^3/с; *б* –V_0=0,5 м^3; Q'=46,67·10^{-3} м^3/с

Figure 5 – Dependence of water concentration on pre-mixing stage time inagitated vessel and RPD with Q=0.69·10^{-3} m^3/s: *1* – mixing vessel; *2* – RPD; *a* – V_0=0.3 m^3; Q'=41.9·10^{-3} m^3/s; *b* – V_0=0.5 m^3; Q'=46.67·10^{-3} m^3/s

Для визуализации данных, полученных в результате решения системы уравнений (16)–(28), выполнен анализ зависимости концентрации мелкодисперсной фракции капель от продолжительности этапа эмульгирования в зависимости от изменения коэффициента χ.

Концентрация мелкой фракции капель c_i в *i*-ый момент времени определялся по выражению:

$$c_i = \frac{m_0 - \sum_k M_{k,i}}{V_0}. \qquad (30)$$

На рисунках 6, *а*–6, *г* показано изменение концентрации мелкой фракции капель при разных коэффициентах χ в зависимости от продолжительности этапа эмульгирования.

Из рисунка 6 видно, что при увеличении общего объема жидкости, предназначенного для обработки в установках гомогенизации, продолжительность процесса получения мелких фракций капель увеличивается. Наиболее быстрое приготовление однородной эмульсии достигается при высоком циркуляционном расходе через РПА Q. Снижение коэффициента эффективности χ также увеличивает длительность процессов гомогенизации и эмульгирования.

Задавая ограничение по допустимому количеству массы крупной фракции капель в общем объеме жидкости, можно рассчитать оптимальное время приготовления эмульсии.

На рисунке 7 представлены результаты расчета оптимального времени эмульгирования τ_0 при задании остаточной массы крупной фракции капель на уровне 0,2 % от общей массы дисперсной фазы.

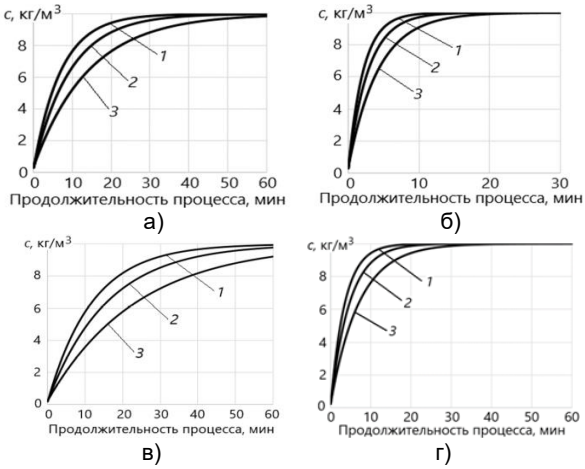


Рисунок 6 – Изменение доли мелкой фракции капель в приготавливаемой эмульсии в объеме жидкости в зависимости от коэффициента эффективности РПА χ и продолжительности процесса: *1 – χ=1,0; 2 – χ=0,75; 3 – χ=0,50; а*) m_0=3 кг; V_0=0,3 м^3; Q=0,69·10^{-3} м^3/с; *б*) m_0=3 кг; V_0=0,3 м^3; Q=8,5 м^3/с; *в*) m_0=5 кг; V_0=0,5 м^3; Q=0,69·10^{-3} м^3/с; *г*) m_0=5 кг; V_0=0,5 м^3; Q=8,5 м^3/с

Figure 6 – Dependence offin droplet fraction in prepared emulsion as function ofliquid volume and effect of RPD efficiency coefficient χ and operation time: *1* – χ=1.0; *2* – χ=0.75; *3* – χ=0.50; *a*) m_0=3 kg; V_0=0.3 m^3; Q=0.69·10^{-3} m^3/s; *b*) m_0=3 kg; V_0=0.3 m^3; Q=8.5 m^3/s; c) m_0=5 kg; V_0=0.5 m^3; Q=0.69·10^{-3} m^3/s; *d*) m_0=5 kg; V_0=0.5 m^3; Q=8.5 m^3/s

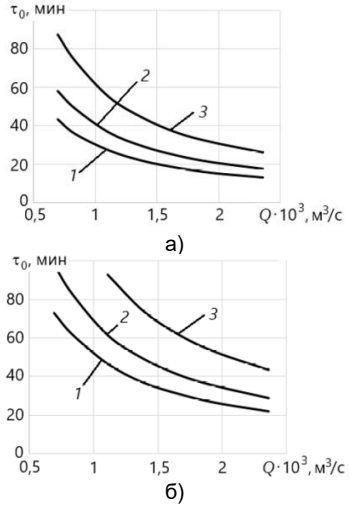


Рисунок 7 – Зависимость минимального времени для приготовления устойчивой эмульсии от объемного расхода через РПА: *1* –χ=1,0; *2* –χ=0,75; *3* – χ=0,50; *а* – V_0=0,3 м^3; *б* – V_0=0,5 м^3

Figure 7 – Dependence of minimum time required toprepare a stable emulsion on volume flow through RPD: *1* –χ = 1.0; *2* –χ = 0.75; *3* – χ = 0.50; *a* – V_0 = 0.3 m^3; *b* – V_0 = 0.5 m^3

На рисунке 7 также показано, что значение оптимальной продолжительности этапа эмульгирования τ_0 нелинейно зависит от величины циркуляционного расхода жидкости Q и коэффициента эффективности χ. Видно, что в рамках рассмотренного сцена-

рия приготовления водонефтяной эмульсии с заданными геометрическими характеристиками емкостных аппаратов и перемешивающих устройств двукратное увеличение массового расхода циркуляции приводит к сокращению времени приготовления эмульсии приблизительно в два раза.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполнения математического моделирования процессов гомогенизации и эмульгирования показано, что процесс приготовления гомогенного состава эмульсии должен рассматриваться как два последовательно выполняемых этапа: предварительного перемешивания и эмульгирования. Предложенная математическая модель для расчета оптимального времени приготовления гомогенного состава эмульсии при представлении нестационарного технологического процесса в виде марковского процесса позволяет на основе простых математических выражений описать работу сложной технологической схемы, в которой циркуляция среды осуществляется как по контру установки, так и внутри отдельных аппаратов.

При анализе результатов математического моделирования установлено, этап предварительного перемешивания сплошной и дисперсной фаз не превышает одной минуты. Это объясняется тем, что, во-первых, расход жидкости внутри емкостного аппарата Q', создаваемый турбинной мешалкой, на порядок превышает циркуляционный расход через РПА Q, вследствие чего основной процесс предварительного перемешивания протекает внутри емкостного аппарата за счет перемешивания жидкости мешалкой. Среднее время циркуляции капель внутри емкостного аппарата по расчету, вычисляемое как отношение $\tau_{in}=V_0/Q'$, составило примерно 7 и 11 с для установок при обработке сред с объемами $V_0 = 0{,}3$ м^3 и $V_0 = 0{,}5$ м^3 соответственно.

Лимитирующей стадией приготовления гомогенных составов является этап эмульгирования. Это связано с тем, что среднее время циркуляции капель через РПА $\tau_{ex}=V_0/Q$ достаточно велико и в зависимости от величины циркуляционного расхода Q составило от 176 до 430 с и от 294 до 714 с для объемов жидкости $V_0 = 0{,}3$ м^3 и $V_0 = 0{,}5$ м^3 соответственно. При этом увеличение расчётного оптимального времени формирования эмульсии обусловлено вероятностью прохождения крупных капель через активные зоны диспергатора, количественно описываемой коэффициентом χ.

Основной проблемой при практическом использовании разработанной математической модели является сложность определения расчетных зависимостей по расчету коэффициента эффективности диспергатора χ, который зависит от большого количества факторов. Поэтому на данном этапе исследований определение этого коэффициента предлагается проводить на основе обработки опытных данных.

Из рисунка 7 при принятых режимах работы перемешивающего устройства в емкостном аппарате и РПА видно, что при двукратном увеличении циркуляционного расхода Q расчетное время приготовления эмульсии сокращается примерно в два раза. Данная закономерность наблюдается при условии $Q' >> Q$. При уменьшении скорости вращения мешалки и снижения расхода Q' до значений, сопоставимых с расходом Q, указанная закономерность нарушается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель, построенная на основе марковского процесса, полностью соответствует общим физическим представлениям о влиянии отдельных геометрических соотношений аппаратов и режимных параметрах обработки среды на оптимальное время приготовления эмульсии.

Поскольку процесс приготовления гомогенного состава жидкости или эмульсии рассматривался как состоящий из двух последовательно выполняемых этапов, то оптимальная продолжительность всего процесса гомогенизации или эмульгирования в установке периодического действия рассчитывается как сумма времени, затрачиваемого на осуществление этапа предварительного перемешивания и оптимального времени проведения этапа эмульгирования.

Основными факторами, оказывающими существенное влияние на значение оптимального времени приготовления эмульсии, являются объем обрабатываемой жидкости V_0, циркуляционный расход через РПА Q и коэффициент эффективности дробления капель в РПА χ. По результатам выполненного математического моделирования показано, что при наихудшем значении коэффициента эффективности $\chi = 0{,}50$ оптимальное время приготовления гомогенного состава в рабочем диапазоне расхода Q через РПА составило от 15 до 80 мин и от 45 до 180 мин при обработке 0,3 и 0,5 м^3 нефти соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Promtov M. & Pigarev S. Technology for Improving Water-Fuel Oil Emulsions Properties Using Polycarboxylic Acids // Advanced Materials & Technologies. 2016. № 3. P. 69–80. doi: 10.17277/amt.2016.03.pp.069-080.

2. Геллер С.В. Топливные эмульсии: проблемы и перспективы // Экологический вестник России. 2012. № 8. С. 48–55.

3. Роторно-пульсационный аппарат для «мокрого» измельчения дисперсных материалов / М.С. Василишин [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 1. С. 205–208. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.025.

4. Письменный С.А., Варивода А.А. Разработка технологии эмульсионных продуктов с белково-углеводной композицией // Ползуновский вестник. 2022. № 1. С. 15–22. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.002.

5. Rodgers T.L. & Cooke M. Rotor-stator devices: The role of shear and the stator // Chemical Engineering Research and Design. 2012. V. 90, P. 323–327. doi: 10.1016/j.cherd.2011.07.018.

6. The effect of scale and interfacial tension on liquid–liquid dispersion in in-line Silverson rotor–stator mixers / S. Hall [et al.] // Chemical Engineering Research and Design. 2013. V. 91. P. 2156–2168. doi: 10.1016/j.cherd.2013.04.021.

7. Протодьяконов И.О. Гидродинамика и массообмен в дисперсных системах жидкость–жидкость. Л. : Наука, 1986. 270 с.

8. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. Киев : Наукова думка, 2001. 348 с.

9. Роторно-импульсные аппараты для производства эмульсионных продуктов / Г.С. Михалкина [и др.] // Пищевая промышленность. 2000. № 4, С. 62–63.

10. Архипов А.Н. Установка ГИД-100/1 для пастообразных молочных продуктов // Молочная промышленность. 2012. № 1, С. 46–47.

11. Иванец Г.Е., Альбрехт С.Н., Плотников П.В. Роторно-пульсационный аппарат для интенсификации стадии перемешивания при производстве комбинированных продуктов // Изв. вузов. Пищ. технология. 2000. № 2–3, С. 59–61.

12. Ледова Т.М., Балабудкин М.А., Плюшкин С.А. Закономерности приготовления эмульсионных систем в роторно-пульсационном аппарате // Химико-фармацевтический журнал. 1980. Т. 14, № 5. С. 96–99.

13. Scholz P. & Keck C.M. Nanoemulsions produced by rotor–stator high speed stirring // International Journal of Pharmaceutics. 2015. V. 482, P. 110–117. doi: 10.21603/2308-4057-2024-1-585.

14. Исследование уравнений ячеечной структуры потоков в процессах и аппаратах химической технологии / Л.Ю. Александрова [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 3, С. 194–203. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.027.

15. Вент Д.П., Лопатин А.Г., Сидельников С.И. Математическое моделирование химико-технологических систем : учеб.-

метод. пособие. Новомосковск : РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2013. 96 с.

16. Орлов С.Е. Разработка метода расчета процесса экстракции целевых компонентов из растительного сырья : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Бийск, 2013. 16 с.

17. Process of Dissolution of Polydisperse Materials in a Unit with a Rotary Pulsation Apparatus / A.A. Kukhlenko [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. Т. 88. № 1. P. 23–34. doi: 10.1007/s10891-015-1164-z.

18. Брагинский Л.Н., Бегачёв В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах. Физические основы и методы расчета. Л. : Химия, 1984. 336 с.

19. Analysis of the operational characteristics of a rotor-pulsation apparatus with an impeller / A.V. Fedorov [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics/ 2009. Т. 82, № 5. P. 821–827. doi:10.1007/s10891-009-0263-0.

Информация об авторах

А. А. Кухленко – кандидат технических наук, доцент, главный специалист ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть».

М. И. Аршинский – кандидат технических наук, главный менеджер по реализации научно-технических проектов ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», специалист НОЦ исследований и разработок R&D центра ИНиГ СФУ;

Е. А. Новицкий – кандидат технических наук, эксперт по математическому моделированию технологических процессов ОО «РН-КрасноярскНИПИнефть», специалист НОЦ исследований и разработок R&D центра ИНиГ СФУ.

А. Ю. Кулаков – кандидат технических наук, главный специалист по автоматизации химико-технологических процессов ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть».

Ю. В. Жильцов – эксперт по численному моделированию химико-технологических процессов ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», специалист НОЦ исследований и разработок R&D центра ИНиГ СФУ.

А. П. Горохов – главный менеджер по новым технологиям ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», заместитель руководителя НОЦ исследований и разработок R&D центра ИНиГ СФУ.

REFERENCES

1. Promtov, M. & Pigarev, S. (2016). Technology for Improving Water-Fuel Oil Emulsions Properties Using Polycarboxylic Acids. *Advanced Materials & Technologies*. (3), 69-80.

2. Geller, S.V. (2012). Fuel emulsions: problems and prospects. *Ekologicheskiy vestnik Rossii*, (8), 48-55. (In Russ.).

3. Vasilishin, M.S., Ivanov, O.S., Karpov, A.G. & Titov, S.S. (2024). Rotary pulsating device for "wet" crushing of dispersed materials. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 205-208. (In Russ.).

4. Written, S.A. & Varivoda, A.A. (2022). Development of technology for emulsion products with a protein-carbohydrate composition. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 15-22. (In Russ.).

5. Rodgers, T.L. & Cooke, M. (2012). Rotor-stator devices: The role of shear and the stator. *Chemical Engineering Research and Design*, (90), 323-327.

6. Hal, S., Pacek, A.W., Kowalski, A.J., Cooke, M. & Rothman, D. (2013). The effect of scale and interfacial tension on liquid-liquid dispersion in in-line Silverson rotor-stator mixers. *Chemical Engineering Research and Design*, (91), 2156-2168.

7. Protodeakonov, I.O. (1986). *Hydrodynamics and mass transfer in dispersed liquid-liquid systems*. L. : Nauka. (In Russ.).

8. Nakorchevsky, A.I. & Basok, B.I. (2001). *Hydrodynamics and heat and mass transfer in heterogeneous systems and pulsating flows.* Kiev : Naukova dumka. (In Ukr.).

9. Mikhalkina, G.S., Petrova, S.P., Kharitonov, V.D., Sosnina, N.A., Mironov, V.F., Konovalov, A.I., Minzanova, S.T. & Lapin, A.A. (2000). Rotary pulse machines for the production of emulsion products. *Pishhevaya promyshlennost'*, (4), 62-63. (In Russ.).

10. Arkhipov, A.N. (2012) Installation of GID-100/1 for pasty dairy products. *Molochnaja promyshlennost',* (1), 46-47. (In Russ.).

11. Ivanets, G.E., Albrecht, S.N. & Plotnikov, P.V. (2000). Rotary pulsating device for intensifying the mixing stage in the production of combined products. *Izvestijavuzov. Pishhevaya promyshlennost',* (2-3), 59-61. (In Russ.).

12. Ledova, T.M., Balabudkin, M.A. & Plyushkin, S.A. (1980). Patterns of preparation of emulsion systems in a rotary pulsation apparatus. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 14(5), 96-99. (In Russ.).

13. Scholz, P. & Keck, C.M. (2015). Nanoemulsions produced by rotor-stator high speed stirring. *International Journal of Pharmaceutics*, (482) 110-117.

14. Alexandrova, L.Yu., Ganin, P.G., Markova, A.V., Moshinsky, A.I., Rubtsova, L.N. & Sorokin, V.V., (2022). Investigation of equations of cellular structure of flows in processes and devices of chemical technology. *Polzunovskiy vestnik*, (3) 194-203. (In Russ.).

15. Vent, D.P., Lopatin, A.G. & Sidelnikov, S.I. (2013). *Mathematical modeling of chemical and technological systems: an educational and methodological guide*. Novomoskovsk : RKHTU im. D.I. Mendeleyeva. (In Russ.).

16. Orlov, S.E. (2013). Development of a method for calculating the extraction process of target components from plant raw materials. Extended abstract of candidate's thesis. Biysk. (In Russ.).

17. Kukhlenko, A.A., Orlov, S.E., Ivanova, D.B. & Vasilishin, M.S. (2015). Process of Dissolution of Polydisperse Materials in a Unit with a Rotary Pulsation Apparatus. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 88(1) 23-34. (In Russ.).

18. Braginskiy, L.N., Begachov, V.I. & Barabash, V.M. (1984). *Mixing in liquid media. Physical principles and calculation methods.* L. : Chemistry. (In Russ.).

19. Fedorov, A.V., Khmel', T.A., Vasilishin, M.S., Karpov, A.G. & Kukhlenko, A.A. (2009). Analysis of the operational characteristics of a rotor-pulsation apparatus with an impeller. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 82(5), 821-827. (In Russ.).

Information about the authors

A.A. Kukhlenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Specialist of LLC "RN-KrasnoyarskNIPIneft".

M.I. Arshinsky - Candidate of Technical Sciences, Chief Manager for the implementation of scientific and technical projects of LLC "RN-KrasnoyarskNIPIneft", Specialist of the Scientific and Educational Research and Development Center of the R&D Center of the Institute of Oil and Gas of the Siberian Federal University.

E.A. Novitsky - Candidate of Technical Sciences, Expert in mathematical modeling of technological processes of LLC "RN-KrasnoyarskNIPIneft", Specialist of the Scientific and Educational Research and Development Center of the R&D Center of the Institute of Oil and Gas of the Siberian Federal University.

A.Yu. Kulakov - Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist in Automation of Chemical and Technological Processes of LLC "RN-KrasnoyarskNIPIneft".

Yu.V. Zhiltsov - Expert in numerical modeling of chemical and technological processes of LLC "RN-KrasnoyarskNIPIneft", Specialist of the Scientific and Educational Research and Development Center of the R&D Center of the Institute of Oil and Gas of the Siberian Federal University.

A.P. Gorokhov - Chief Technology Manager of LLC "RN-KrasnoyarskNIPIneft", Deputy Head of the Scientific and Educational Research and Development Center of the R&D Center of the Institute of Oil and Gas of the Siberian Federal University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 248–255.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 248–255.

Научная статья
2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК 621.928.6
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.035 EDN: HBOPON

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ДУГООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МУЛЬТИВИХРЕВОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

Вадим Эдуардович Зинуров [1], Мария Арнольдовна Прец [2]

[1, 2] Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия
[1] vadd_93@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1380-4433
[2] precmari@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-4434-3906

Аннотация. *Одним из приоритетных направлений в области процессов и аппаратов химических технологий является разработка высокоэффективных аппаратов для фракционирования мелкодисперсных материалов. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения селективности при разделении частиц в таких отраслях, как нефтехимия и каталитическое производство. В статье предложена конструкция мультивихревого пылеуловителя-классификатора типа «труба в трубе». Разделение фракций осуществляется за счёт формирования серии закрученных вихрей в кольцевом пространстве между внутренней и наружной трубами, под действием которых более крупные частицы выносятся к периферии и осаждаются в бункере. Предполагается, что одним из факторов, ограничивающих эффективность такого аппарата, является отражение частиц от стенок кольцевого канала с последующим повторным захватом их потоком. Целью работы является оценка влияния направляющих дугообразных элементов, установленных в кольцевом пространстве аппарата, на эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора. Выполнено численное моделирование газопылевого потока и траекторий движения частиц в трехмерной постановке с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Варьировались ключевые геометрические параметры: диаметр внутренней трубы (от 43 до 66 мм), степень раскрытия прямоугольных прорезей в стенке трубы (k от 0,2 до 1). В качестве критериев оценки использовались фракционная эффективность улавливания частиц в диапазоне размеров 5–100 мкм и потери давления на входе и выходе из аппарата. Результаты моделирования показали, что введение направляющих дугообразных элементов позволяет повысить фракционную эффективность классификатора в среднем на 10,9 % по сравнению с базовой конструкцией. Кроме того, зафиксировано снижение потери давления на 6,3 % за счёт стабилизации мультивихревой структуры потока и уменьшения рециркуляционных зон. Наибольший эффект наблюдается при расчетном диаметре вихрей 29 мм и степени раскрытия щелей k = 0,6, где эффективность улавливания частиц a > 7 мкм превышает 90 %.*

Ключевые слова: *мультивихревой классификатор, фракционирование, дисперсные частицы, направляющие элементы, вихревое течение, численное моделирование, эффективность улавливания частиц, потери давления, статический классификатор.*

Для цитирования: Зинуров В. Э., Прец М. А. Численное исследование влияния направляющих дугообразных элементов на эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 248–255. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.035. EDN: https://elibrary.ru/HBOPON.

Original article

NUMERICAL STUDY OF INFLUENCE OF ARC-SHAPED GUIDE ELEMENTS ON EFFICIENCY OF A MULTIVORTEX DUST COLLECTOR-CLASSIFICATOR

Vadim E. Zinurov [1], Mariia A. Prets [2]

[1, 2] Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
[1] vadd_93@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1380-4433
[2] precmari@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-4434-3906

Abstract. *One of the priority areas in the field of chemical engineering processes and equipment is the development of high-efficiency devices for the fractionation of fine-dispersed materials. The relevance of this topic is due to the need to improve selectivity in particle separation in industries such as petrochemicals and catalyst manufacturing. This article proposes the design of a multivortex dust collector-classifier of the "pipe-in-pipe" type. Fractional separation is achieved by generating a series of swirling vortices in the annular space between the inner and outer pipes, under the influence of which larger particles are carried to the periphery and deposited in a collection hopper. It is assumed that one of the factors limiting the efficiency of such a device is particle reflection from the channel walls, followed by their re-entrainment into the flow.*

© Зинуров В. Э., Прец М. А., 2026

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ДУГООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МУЛЬТИВИХРЕВОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

The aim of this study is to evaluate the influence of arc-shaped guide elements installed in the annular space on the efficiency of the multivortex dust collector-classifier. Numerical modeling of the gas-particle flow and particle trajectories was carried out in a three-dimensional formulation using the ANSYS Fluent software package. Key geometric parameters were varied: the inner pipe diameter (from 43 to 66 mm) and the slot opening ratio in the pipe wall (k from 0.2 to 1). The evaluation criteria included the fractional efficiency of particle capture within the 5-100 μm range and the pressure drop across the device. Simulation results demonstrated that the integration of arc-shaped guide elements increases fractional efficiency by an average of 10.9 % compared to the baseline design. Additionally, pressure losses were reduced by 6,3 % due to stabilization of the multivortex flow structure and reduction of recirculation zones. The best performance was observed at a calculated vortex diameter of 29 mm and slot opening k = 0,6, where the capture efficiency for particles larger than 7 μm exceeds 90 %.

Keywords: *multivortex classifier, fractionation, dispersed particles, guide elements, vortex flow, numerical modeling, particle capture efficiency, pressure drop, static classifier.*

For citation: Zinurov, V. E. & Prets, M. A. (2026). Numerical study of influence of arc-shaped guide elements on efficiency of a multivortex dust collector-classificator. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 248-255. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.035. EDN: https: //elibrary.ru/HBOPON.

ВВЕДЕНИЕ

Современное химико-технологическое производство предъявляет высокие требования к эффективности процессов разделения дисперсных систем, особенно к фракционированию тонкодисперсных порошков по гранулометрическим характеристикам [1, 2]. Актуальна данная проблема в нефтехимии, где во многих процессах используются твердые каталитические и адсорбционные материалы в виде мелкодисперсных частиц. Например, в установках каталитического крекинга (FCC) применяется циркулирующий порошкообразный катализатор со средним размером частиц порядка 50–100 мкм [3].

Не менее важен контроль гранулометрического состава адсорбентов, применяемых в газоразделении и очистке продуктов нефтехимии [4]. Пористые материалы на основе силикагеля широко используются в качестве носителей катализаторов и адсорбентов осушителей газа. За последние годы активно ведутся исследования по модификации и улучшению свойств таких адсорбентов. В частности, показано, что химически модифицированный мелкопористый силикагель эффективно извлекает благородные металлы из растворов [5]. В то же время для обеспечения высокой сорбционной емкости и пропускной способности адсорбционных колонн необходимо поддерживать оптимальный размер зерен адсорбента. Слишком крупные частицы приводят к снижению скорости массообмена, а чрезмерно мелкие – к росту гидравлического сопротивления слоя и уносу порошка газовым потоком [6].

Задача фракционирования сыпучих материалов на узкие фракции актуальна как для каталитических систем, так и для адсорбентов в нефтегазопереработке. Для разделения частиц по размерам применяются различные типы аппаратов, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения [7, 8]. Традиционным методом фракционирования относительно крупных порошков является механический рассев (грохоты, вибросита) [9, 10]. Однако эффективность ситовых классификаторов резко падает при уменьшении размера частиц к десяткам микрометров из-за явлений слипания, агломерации и пыления материала. В пищевой и микробиологической промышленности, где зачастую требуется разделять порошки в диапазоне 50–100 мкм, повышение производительности барабанных сит достигается за счет оптимизации их конструкции и режима работы, но для мелкодисперсных материалов размером менее 50 мкм данный подход малоприменим.

В этих случаях предпочтение отдается аэродинамическим методам классификации. Широко используются пневматические (гравитационные) воздушные классификаторы, в которых восходящий поток газа разделяет частицы по их эквивалентной скорости оседания. Достоинствами таких устройств являются простота конструкции, отсутствие движущихся частей и возможность одновременного получения нескольких фракций. Тем не менее, даже при оптимизации режима их эффективность может снижаться из-за неравномерности распределения газового потока [11]. В частности, установлено, что поперечная неоднородность скорости воздуха приводит к существенному ухудшению разделяющей способности гравитационного классификатора.

Высокой эффективностью и регулируемым диаметром граничного зерна характеризуются центробежные динамические классификаторы. В них используются вращающиеся лопаточные роторы, создающие интенсивное закручивание потока и контролирующие отбор частиц требуемой крупности. Динамические классификаторы широко применяются, например, в производстве цемента, минеральных и химических порошков. Исследования показывают возможность существенного повышения селективности подобных аппаратов за счет оптимизации конструкции ротора [12]. В работе [13] приведен пример улучшения точности разделения тонких порошков 10–50 мкм на 10–40 % путем модификации формы и угла установки лопаток ротора.

Тем не менее, наличие движущихся частей усложняет конструкцию и эксплуатацию таких классификаторов [14]. Поэтому для многих задач (в том числе в нефтехимии, где часто требуется непрерывная и надежная работа аппарата при высокотемпературных газовых потоках) актуально применение статических схем разделения, не имеющих вращающихся элементов [15]. Среди статических пылеуловителей наиболее распространены циклонные сепараторы, в которых отделение твердых частиц происходит за счет центробежной силы закрученного потока [16]. Циклоны отличаются конструктивной простотой, компактностью и способностью работать при высоких температурах и больших расходах газа [17]. Однако у типового циклона рост степени улавливания мелкодисперсных фракций происходит медленно и монотонно, без резкого увеличения.

В ранее проведённых исследованиях была разработана конструкция статического мультивихревого воздушного классификатора, представляющего собой аппарат типа «труба в трубе» [18]. Принцип его действия основан на формировании серии устойчивых завихрений в кольцевом пространстве между внутренней и наружной трубами корпуса (рис. 1). Газовый поток, поступая через центральное входное отверстие во внутреннюю трубу, движется по осевому каналу и далее, проходя через прямоугольные щели в её стенке, перераспределяется в кольцевой зазор. В результате формируется множество упорядоченных вихрей [19]. Возникающие центробежные силы обеспечивают вынесение

более тяжёлых частиц к периферии, где они теряют кинетическую энергию и осаждаются в нижнюю часть аппарата – бункер, тогда как более лёгкие фракции уносятся вверх выходящим газовым потоком [20, 21].

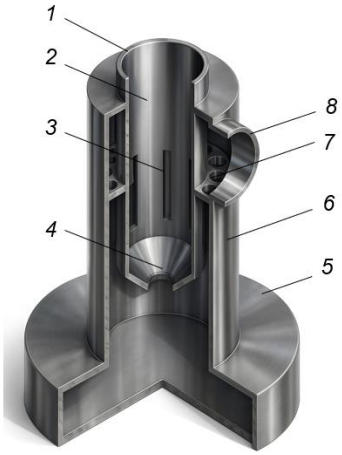


Рисунок 1 – Мультивихревой воздушный пылеуловитель-классификатор: *1* – входное отверстие; *2* – внутренняя труба; *3* – прорези прямоугольной формы; *4* – конический переход; *5* – бункер для сбора пыли; *6* – корпус; *7* – экран, состоящий из поперечной перегородки; *8* – выходное отверстие

Figure 1 – Multivortex Air Dust Collector-Classificator: *1* – inlet port; *2* – inner pipe; *3* – rectangular slots; *4* – conical transition; *5* – dust collection hopper; *6* – housing; *7* – screen consisting of the transverse baffle; *8* – outlet opening

Экспериментальные и численные исследования подтвердили образование устойчивой мультивихревой структуры потока в кольцевом пространстве классификатора. В ходе испытаний на производственной площадке «Салаватский катализаторный завод» была продемонстрирована работоспособность аппарата при фракционировании порошков с граничным размером частиц до 40 мкм [22].

Однако в ряде случаев наблюдалась недостаточная селективность разделения, особенно в области частиц среднего размера. Анализ показал, что при определённых условиях частицы, выходя из вихревой зоны, могут отражаться от стенок кольцевого канала аппарата и попадать в соседние вихри. Это повышает вероятность повторного вовлечения частиц в циркуляционный поток, что приводит к снижению эффективности разделения.

Для устранения указанного недостатка и стабилизации структуры потока предлагается усовершенствовать конструкцию пылеуловителя-классификатора путём введения направляющих дугообразных элементов в кольцевое пространство. Эти элементы (рис. 2) предназначены для снижения вероятности отражения частиц от стенок и формирования более упорядоченного мультивихревого течения. Ожидается, что данное конструктивное решение позволит повысить эффективность разделения и стабилизировать работу аппарата в широком диапазоне эксплуатационных режимов.

Целью настоящей работы является оценка влияния направляющих дугообразных элементов, установленных в кольцевом пространстве аппарата, на эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора.

МЕТОДЫ

Для реализации поставленной цели была выполнена серия численных экспериментов, направленных на сопоставление характеристик пылеуловителей-классификаторов с направляющими дугообразными элементами и без них. Основное внимание уделялось анализу фракционной эффективности осаждения частиц различной дисперсности, а также определению потери давления при различных конструктивных конфигурациях. Моделирование осуществлялось в трёхмерной постановке.

Численное моделирование аэродинамики и поведения частиц в мультивихревом классификаторе проводилось с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. В основе расчётов лежало решение системы уравнений Навье-Стокса совместно с уравнением сплошности среды, что позволило воспроизвести трёхмерное течение газа в условиях вихревой структуры. Для адекватного описания турбулентных явлений, характерных для локальных зон с интенсивными градиентами скорости, применялась модель турбулентности *k*-ω SST, зарекомендовавшая себя при расчётах сильно завихрённых потоков.

На первом этапе в CAD-среде КОМПАС-3D была разработана параметрическая модель, на базе которой были созданы из 24 твердотельных моделей классификатора. Основные геометрические параметры: диаметр внешнего корпуса – 101 мм, высота прямоугольных прорезей – 60 мм, диаметр отверстий в экране – 12 мм (рис. 1). Варьировались два параметра: внутренний диаметр трубы d (в диапазоне 43–66 мм) и степень раскрытия прорезей k (0,2; 0,6 и 1). На рисунке 2, *а* представлен вариант с $k = 1$.

Расчётный диаметр одиночного вихря d_s в кольцевом пространстве (без учёта толщины стенок) определялся из геометрического соотношения между d и наружным диаметром D, и изменялся в диапазоне от 17,5 до 29 мм:

$$d_s = \frac{D - d}{2}. \quad (1)$$

Направляющие дугообразные элементы моделировались по всей высоте кольцевого канала до уровня экрана *7* (рис. 1) и различались по геометрической форме (рис. 2, *а*–*b*).

На втором этапе из твердотельных моделей создавались проточные объёмы. Учитывая, что основная часть сепарации частиц из газа происходит в пределах активной вихревой зоны, расчётная область ограничивалась уровнем экрана. Ввиду того, что 3D-модель приобретала осесимметричный вид, то моделировался лишь один сектор, что позволило существенно снизить вычислительные ресурсы при сохранении достоверности результатов.

На третьем этапе генерировалась расчётная сетка. В ходе предварительного анализа было установлено, что стабилизация результатов по перепаду давления Δp наступает при числе ячеек не менее 437 000. Параметры, при которых создавалась данная сеточная модель, были выбраны в качестве базовых [23].

Для моделирования движения дисперсной фазы использовалась модель DPM (Discrete Phase Model) с односторонней связью: частицы не оказывали влияния на газовую среду, но подвергались её воздействию. Геометрия частиц – сферическая, плотность принималась 1000 кг/м^3. Размер частиц варьировался от 5 до 100 мкм. На стенках бункера применялось граничное условие прилипания частиц; на прочих стенках – отражение. На входе в мультивихревой пылеуловитель-классификатор задавалась скорость воздуха 12 м/с, на выходе из него – атмосферное давление.

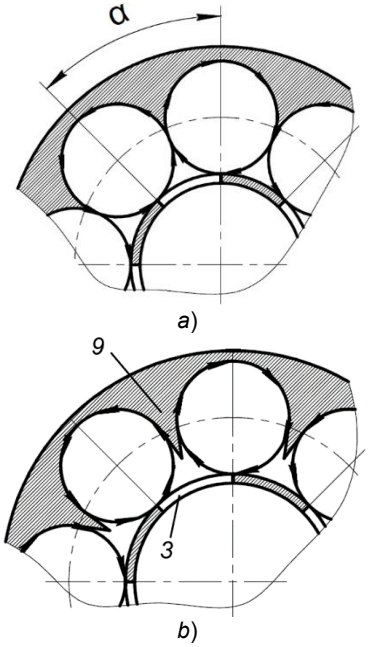


Рисунок 2 – Конструктивные варианты направляющих дугообразных элементов *9* для 3D-моделей с различным диаметром внутренней трубы *d*: *a*) 43 и 66 мм; *b*) 46, 54 и 59 мм

Figure 2 – Structural variants of arc-shaped guide elements 9 for 3D-models with different inner pipe diameters *d*: *a*) 43 and 66 mm; *b*) 46, 54, and 59 mm

Фракционная эффективность пылеуловителя-классификатора определялась как доля частиц, осаждённых в бункере, от общего числа запущенных частиц. Потери давления рассчитывались как разность статических давлений на входе в аппарате и выходе из него.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ полученных численных данных показал, что интеграция направляющих дугообразных элементов в конструкцию мультивихревого пылеуловителя-классификатора способствует увеличению его фракционной эффективности (рис. 3–7). Основной причиной данного эффекта является снижение вероятности отражения частиц от стенок в кольцевом пространстве в соседние вихревые зоны, с последующим уносом из аппарата восходящим газовым потоком. Также установлено, что применение направляющих дугообразных элементов приводит к снижению потери давления Δp в среднем на 6,3 % по сравнению с конструкциями, не содержащими направляющих дугообразных элементов (рис. 8). Данный эффект является следствием стабилизации структуры мультивихревого потока. Упорядоченное вихревое течение снижает интенсивность нежелательных рециркуляционных зон, что способствует снижению вероятности повторного вовлечения частиц и их уноса восходящим газом.

Как отмечалось ранее, варьирование внутреннего диаметра трубы d от 43 до 66 мм при постоянном наружном диаметре корпуса D = 101 мм приводило к изменению расчётного диаметра одиночного вихря d_s в пределах от 29 до 17,5 мм в соответствии с выражением (1). С теоретической точки зрения, уменьшение d_s должно приводить к росту центробежных сил, что, аналогично эффекту, наблюдаемому в циклонах, должно обеспечивать более эффективное отделение твёрдых частиц от газового потока. Однако проведённый численный анализ показал обратную тенденцию: при уменьшении расчетного диаметра вихрей d_s от 29 до 17,5 мм наблюдается снижение фракционной эффективности как для базовой конструкции, так и для модифицированной с направляющими дугообразными элементами (рис. 3–7). Это указывает на то, что при определённом уровне центробежных воздействий частицы приобретают значительный импульс, в результате чего многократно соударяются со стенками аппарата в кольцевом пространстве. Такое поведение повышает вероятность их повторного вовлечения в циркуляционный поток и последующего уноса, что приводит к снижению селективности мультивихревого пылеуловителя-классификатора.

Большинство экспериментальных кривых (рис. 3–7), соответствующих как базовой конструкции аппарата, так и модифицированной с направляющими дугообразными элементами, демонстрируют наличие двух выраженных экстремумов. Подобная форма объясняется в основном отражением частиц от стенок в кольцевом пространстве. На данный эффект оказывают влияние размер частиц, их плотность, скорость выхода из вращающегося потока, диаметр вихря и степень раскрытия прямоугольных прорезей. Сначала фракционная эффективность возрастает, поскольку частицы с увеличением размера легче отделяются от газового потока под действием центробежных сил. Однако при дальнейшем увеличении размера и, как следствие, повышении импульса частиц возрастает вероятность их отражения от стенок, что приводит к снижению эффективности. Минимум на кривой соответствует области, где отражения частиц наиболее интенсивны. Последующий рост эффективности объясняется тем, что при достижении ещё больших размеров частиц начинают преобладать гравитационные силы, способствующие их осаждению в бункер независимо от траектории движения.

Изменение степени раскрытия прямоугольных прорезей k от 0,2 до 1 оказывает существенное влияние на скорость истечения запылённого газа и, как следствие, на характер формирования вихревой структуры в кольцевом пространстве. Очевидно, что при минимальном раскрытии k = 0,2 достигается наибольшее гидравлическое сопротивление, при этом величина потери давления Δp варьируется в диапазоне от 824,9 до 1472,3 Па. При полном раскрытии k = 1 достигается минимальное сопротивление, Δp уменьшается до значений 485,9–776,2 Па (рис. 8). С точки зрения фракционной эффективности наилучшие результаты, как показывают расчёты (рис. 3–7), достигаются при промежуточном значении k= 0,6, для которого наблюдается высокая степень улавливания частиц и наименьшее количество экстремумов на кривых. Это указывает на то, что при среднем раскрытии прорезей $k \rightarrow 0{,}5$ формируется оптимальное соотношение геометрических и гидродинамических параметров: скорость газа через прорези достаточна для генерации устойчивых вихрей, но не приводит к их дестабилизации или разрушению.

При диаметре внутренней трубы d = 66 мм, соответствующем расчетному диаметру вихрей d_s = 17,5 мм формируются наибольшие центробежные силы, но фракционная эффективность классификатора остается на минимальном уровне и не превышает 0,6. Можно отметить, что при степени раскрытия прорезей k = 0,2 (рис. 3) наблюдается два явно выраженных экстремума: при a = 12 фракционная эффектив-

ность E = 0,58 (конструкция с направляющими дугообразными элементами) и при a = 15 фракционная эффективность E = 0,35 (базовая конструкция).

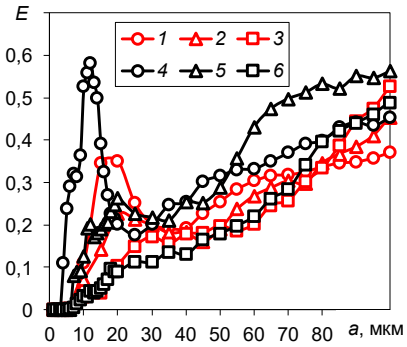


Рисунок 3 – Фракционная эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора при различной степени раскрытия щелей k: *1*, *4* – 0,2; *2*, *5* – 0,6; *3*, *6* – 1. Красные линии (*1–3*) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (*4–6*) – с установленными направляющими элементами. Диаметр внутренней трубы d = 66 мм (d_s = 17,5 мм)

Figure 3 – Fractional efficiency of the multivortex dust collector-classifier at different slot opening levels k: *1*, *4* – 0,2; *2*, *5* – 0,6; *3*, *6* – 1. Red curves (*1–3*) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (*4–6*) represent the configuration with installed guide elements. Inner pipe diameter d = 66 mm (d_s = 17,5 mm)

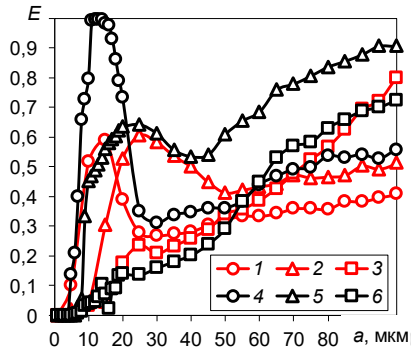


Рисунок 4 – Фракционная эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора при различной степени раскрытия щелей k: *1*, *4* – 0,2; *2*, *5* – 0,6; *3*, *6* – 1. Красные линии (*1–3*) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (*4–6*) – с установленными направляющими элементами. Диаметр внутренней трубы d = 59мм (d_s = 21 мм)

Figure 4 – Fractional efficiency of the multivortex dust collector-classifier at different slot opening levels k: *1*, *4* – 0,2; *2*, *5* – 0,6; *3*, *6* – 1. Red curves (*1-3*) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (*4-6*) represent the configuration with installed guide elements. Inner pipe diameter d = 59 mm (d_s = 21 mm)

При уменьшении диаметра внутренней d до 59 мм расчетный диаметр вихрей d_s составил 21 мм (рис. 4), что способствовало повышению средней фракционной эффективности мультивихревого пылеуловителя-классификатора в диапазоне размера частиц a от 1 до 100 мкм на 15,8 % по сравнению с конфигурацией, представленной на рисунке 3. Использование направляющих дугообразных элементов обеспечило дополнительное повышение эффективности: среднее значение для модифицированной конструкции оказалось выше на 5,2 % по сравнению с базовым вариантом без направляющих. Также следует отметить появление множественных экстремумов на кривых, что может свидетельствовать о формировании более упорядоченной вихревой структуры в кольцевом пространстве (рис. 4).

Уменьшение внутренней трубы d до 54 мм привело к увеличению расчетного диаметра вихрей d_s до 23,5 мм (рис. 5), что обеспечило заметный рост фракционной эффективности, особенно для конструкции с направляющими дугообразными элементами. При степени раскрытия прорезей k от 0,6 до 1 (для конструкции с дугообразными элементами) не наблюдается выраженных экстремумов, что свидетельствует о снижении влияния отражения частиц от стенок и стабилизации мультивихревой структуры. Для k = 0,2 (кривая *4*) пик сохраняется, однако он характеризуется более широким диапазоном частиц. В случае базовой конструкции (красные кривые) экстремумы фиксируются при всех значениях k. Средняя эффективность классификатора с направляющими элементами составила 0,55, базовой конструкции составила 0,47 (рис. 5), что в среднем на 12,1 % выше по сравнению с конфигурацией, представленной на рисунке 4.

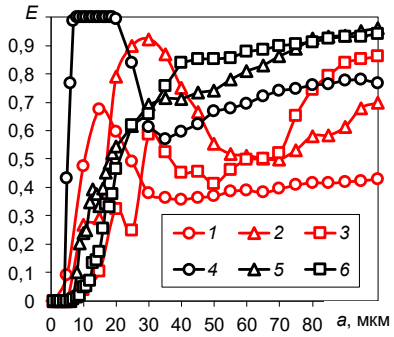


Рисунок 5 – Фракционная эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора при различной степени раскрытия щелей k: *1*, *4* – 0,2; *2*, *5* – 0,6; *3*, *6* – 1. Красные линии (*1–3*) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (*4–6*) – с установленными направляющими элементами. Диаметр внутренней трубы d = 54 мм (d_s = 23,5 мм)

Figure 5 – Fractional efficiency of the multivortex dust collector-classifier at different slot opening levels k: *1*, *4* – 0,2; *2*, *5* – 0,6; *3*, *6* – 1. Red curves (*1–3*) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (*4-6*) represent the configuration with installed guide elements. Inner pipe diameter d = 54 mm (d_s = 23,5 mm)

При диаметре внутренней трубы d = 46 мм, что соответствует расчетному диаметру вихрей d_s 27,5 мм на кривых фракционной эффективности для базовой конструкции мультивихревого классификатора сохраняются выраженные экстремумы (рис. 6). В конструкции с направляющими элементами при k = 0,2 наблюдается увеличение ширины пика, соответствующего диапазону частиц a от 9 до 15 мкм. Средняя эффективность классификатора с направляющими элементами составила 0,71, для базовой конструкции – 0,57 (рис. 6), что на 13,3 % выше по сравнению с предыдущей конфигурацией (рис. 5).

При уменьшении внутренней трубы d до 43 мм расчетный диаметр вихрей d_s составил 29 мм (рис. 7), наблюдается дальнейшее повышение фракционной эффективности мультивихревого пылеуловителя-классификатора по сравнению с предыдущими конфигурациями (рис. 3–6). Средняя эффективность составила 0,78 для конструкции с направляющими

дугообразными элементами и 0,62 для базовой конструкции. Следует отметить, что при k = 0,2 снижение фракционной эффективности у модифицированной конструкции (чёрная кривая) выражено значительно слабее (рис. 7), чем в предыдущих случаях (рис. 3–6).

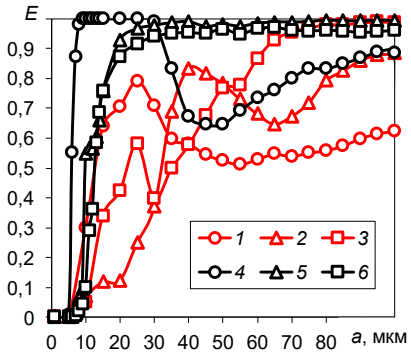


Рисунок 6 – Фракционная эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора при различной степени раскрытия щелей k: *1*, *4* – 0,2; *2*, *5* – 0,6; *3*, *6* – 1. Красные линии (*1–3*) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (*4–6*) – с установленными направляющими элементами. Диаметр внутренней трубы d = 46 мм (d_s = 27,5 мм)

Figure 6 – Fractional efficiency of the multivortex dust collector-classifier at different slot opening levels k: *1*, *4* – 0,2; *2*, *5* – 0,6; *3*, *6* – 1. Red curves (*1-3*) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (*4-6*) represent the configuration with installed guide elements. Inner pipe diameter d = 46 mm (d_s = 27,5 mm)

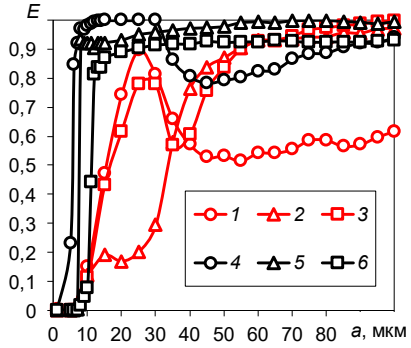


Рисунок 7 – Фракционная эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора при различной степени раскрытия щелей k: *1*, *4* – 0,2; *2*, *5* – 0,6; *3*, *6* – 1. Красные линии (*1–3*) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (*4–6*) – с установленными направляющими элементами. Диаметр внутренней трубы d = 43 мм (d_s = 29 мм)

Figure 7 – Fractional efficiency of the multivortex dust collector-classifier at different slot opening levels k: *1*, *4* – 0,2; *2*, *5* – 0,6; *3*, *6* – 1. Red curves (*1-3*) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (*4-6*) represent the configuration with installed guide elements. Inner pipe diameter d = 43 mm (d_s = 29 mm)

Потери давления в мультивихревом пылеуловителе-классификаторе с направляющими дугообразными элементами при степени раскрытии прорезей k от 0,2 до 1 снижались от 824,9 до 485,9, от 1297,2 до 731,1 и от 992,2 до 548,6 Па при расчетном диаметре вихрей d_s, равным 29, 23,5 и 17,5 мм соответственно. Для базовой конструкции аппарата потери давления Δp изменялись от 843,2 до 500,1, от 1472,2 до 776,2 и от 1020,6 до 612,1 Па при расчетном диаметре вихрей d_s, равным 29, 23,5 и 17,5 мм соответственно (рис. 8).

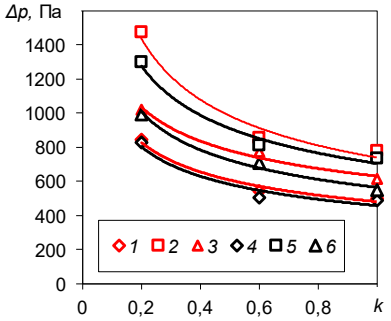


Рисунок 8 – Потери давления в мультивихревом пылеуловителе-классификаторе от степени раскрытия щелей при различном значении диаметра внутренней трубы d, мм: *1*, *4* – 43 (d_s = 29 мм); *2*, *5* – 54 (d_s = 23,5 мм); *3*, *6* – 66 (d_s = 17,5 мм). Красные линии (*1–3*) соответствуют варианту без направляющих дугообразных элементов в кольцевом пространстве, чёрные линии (*4–6*) – с установленными направляющими элементами

Figure 8 – Pressure loss in the multivortex dust collector-classifier depending on the slot opening at different inner pipe diameters d, mm: *1*, *4* – 43 (d_s = 29 mm); *2*, *5* – 54 (d_s = 23,5 mm); *3*, *6* – 66 (d_s = 17,5 mm). Red curves (*1-3*) correspond to the configuration without arc-shaped guide elements in the annular space; black curves (*4-6*) represent the configuration with installed guide elements

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ кривых фракционной эффективности (рис. 3–7) показывает, что конструкция аппарата с направляющими дугообразными элементами обладает высокой гибкостью применения и может быть адаптирована под различные задачи. В режиме работы в качестве классификатора устройство позволяет эффективно выделять узкие фракции. Так, при d_s = 21 мм, k = 0,2 достигается высокая эффективность улавливания частиц в диапазоне от 11 до 20 мкм (рис. 4), при d_s = 23,5 мм, k = 0,2 – от 4 до 20 мкм (рис. 5). В режиме пылеуловителя-классификатора аппарат демонстрирует эффективность выше 0,85 при улавливании частиц крупнее 20 мкм для случая d_s = 27,5 мм, k = 0,6–1 (рис. 6) и эффективность выше 0,9 при улавливании частиц размером более 7 мкм при d_s = 29 мм, k = 0,6 (рис. 7).

Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что введение направляющих дугообразных элементов в кольцевое пространство способствует стабилизации мультивихревой структуры потока и снижению отражения частиц от стенок аппарата в сторону соседних вихрей. Это, в свою очередь, позволяет исключить формирование экстремумов на кривых фракционной эффективности или значительно их сгладить. Однако данный эффект имеет свои ограничения: при определённых значениях расчетного диаметра вихрей d_s (например, при d_s < 21 мм) и степени раскрытия прорезей (например, при k = 0,2) даже наличие направляющих элементов не всегда предотвращает многократное соударение частиц и повторный захват потоком. Таким образом, степень влияния направляющих дугообразных элементов на формирование устойчивой вихревой структуры и эффективность аппарата определяется совокупностью

геометрических и технологических параметров.

Практическое значение результатов заключается в возможности использования модифицированного мультивихревого пылеуловителя-классификатора для задач селективного фракционирования в нефтехимии, фармацевтике, производстве катализаторов и других отраслях, где требуется точное разделение дисперсных частиц.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что наличие направляющих дугообразных элементов способствует формированию более упорядоченной мультивихревой структуры потока, снижает вероятность отражения частиц от стенок и увеличивает фракционную эффективность в среднем на 10,9 % по сравнению с базовой конструкцией.

2. Наибольшая эффективность достигается при расчетном диаметре вихрей d_s, равным 29 мм, и степени раскрытия прорезей k, равным 0,6, которая составляет более 0,9 для частиц $a > 7$ мкм.

3. При среднем раскрытии прорезей $k \rightarrow 0{,}5$ формируется оптимальное соотношение геометрических и гидродинамических параметров.

4. При уменьшении d_s ниже 21 мм эффективность мультивихревого пылеуловителя-классификатора снижается, несмотря на рост центробежных сил, что связано с усилением отражения частиц и их повторным вовлечением в поток. Это указывает на существование предельных геометрических условий, при которых эффективность модификации снижается.

5. Введение направляющих дугообразных элементов оказывает положительное влияние на гидравлические характеристики аппарата. В среднем потери давления снижаются на 6,3 %, что связано с уменьшением рециркуляционных зон и стабилизацией течения. Потери давления при $k = 0{,}6$ в среднем составляют 671,1 Па (конструкция с направляющими элементами) и 720,8 Па (базовая конструкция).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширинова Д.Б. Классификация полидисперсного порошка молибденита // Евразийский научный журнал. 2016. № 2. С. 127–128.

2. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления упрощённой модели мультивихревого классификатора с соосно расположенными трубами / В.Э. Зинуров [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 2. С. 108–116. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.015.

3. Kim S.W., Yeo C.E., Lee D.Y. Effect of fines content on fluidity of FCC catalysts for stable operation of fluid catalytic cracking unit // Energies. 2019. Т. 12, № 2. С. 293. DOI: 10.3390/en12020293.

4. Пахнутова Е.А., Слижов Ю.Г. Физико-химические свойства сорбента на основе силикагеля с привитым комплексом медь-ацетоуксусного эфира // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21. № 4. С. 529–539. DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3637.

5. Videira-Quintela D., Martin O., Montalvo G. Emerging opportunities of silica-based materials within the food industry // Microchemical Journal. 2021. № 167. С. 106318. DOI: 10.1016/j.microc.2021.106318.

6. Silica Gel as a Sorbent and Catalyst Support: Improvement of Technologies and Search for Alternative Production Routes / G.V. Mamontov [et al.] // Catalysis in Industry. 2023. № 3. С. 221–228. DOI: 10.1134/S2070050423030054.

7. Shapiro M., Galperin V. Air classification of solid particles: a review // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2005. № 2. С. 279–285. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.022.

8. CFD simulation and parameter optimization of the internal flow field of a disturbed air cyclone centrifugal classifier / L. Huang [et al.] // Separation and Purification Technology. 2023. Т. 307. С. 122760. DOI: 10.2139/ssrn. 4227862.

9. Ахмадиев Ф.Г., Гиззятов Р.Ф., Назипов И.Т. Расчет многоярусных ситовых классификаторов для разделения зернистых материалов по размерам // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2019. Т. 8. С. 54–61.

10. Повышение производительности ситовых барабанных классификаторов / А.Л. Фалько [и др.] // Вестник Донского государственного аграрного университета. 2015. № 4–1(18). С. 54.

11. Lanzerstorfer C. Application of air classification for improved recycling of sinter plant dust // Resources, Conservation and Recycling. 2015. № 94. С. 66–71. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.11.013.

12. CFD-based structural optimization of rotor cage for high-efficiency rotor classifier / X. Mou [et al.] // Processes. 2021. № 9(7). С. 1148. DOI: 10.3390/pr9071148.

13. Computational fluid dynamics simulation and performance study of a three-separation combined air classifier / C. Hui [et al.] // Thermal Science. 2024. № 28 (2 Part C). С. 1589–1603.

14. Yu Y., Liu J., Li G. Empirical study of classification process for two-stage turbo air classifier in series // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2013. № 26(3). С. 526–531. DOI: 10.3901/CJME.2013.03.526.

15. Cyclone separator for air particulate matter personal monitoring: a patent review / M.O. Rivera-García [et al.] // Atmosphere. 2023. № 14(4). С. 624. DOI: 10.3390/atmos14040624.

16. A new static cyclonic classifier: Flow characteristics, performance evaluation and industrial applications / Z. Sun [et al.] // Chemical Engineering Research and Design. 2019. № 145. С. 141–149. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.03.018.

17. Investigation into the effects of various parameters on the performance and classification potential of a cyclone classifier / M.E. Caliskan [et al.] // Powder Technology. 2019. № 356. С. 102–111. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.104.

18. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля / В. Э. Зинуров [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 205–211. DOI: 10.25712/ ASTU.2072-8921.2021.02.029.

19. Zinurov, V.E., Kharkov, V.V., Madyshev, I.N. Numerical simulation of pressure loss in a classifier with coaxial pipes // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2022. № 10–1, С. 173–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_173.

20. Numerical Study of Vortex Flow in a Classifier with Coaxial Tubes / V. Zinurov [et al.] // International Journal of Engineering & Technology Innovation. 2022. Т. 12, № 4. DOI: 10.46604/ijeti.2022.9568.

21. The Influence of the Design of a Static Multi-Vortex Classifier on the Efficiency Fractionation of Silica Gel Particles / V.E. Zinurov [et al.] // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2024. С. 1–6. DOI: 10.1134/S0040579524600992.

22. Промышленные испытания фракционирования сыпучего материала в мультивихревом классификаторе-сепараторе / В. Э. Зинуров [и др.] // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25, № 4. С. 58–63. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_4_58.

23. Численное исследование влияния геометрических параметров мультивихревого классификатора на эффективность фракционирования частиц / М. А. Прец [и др.] // Вестник Технологического университета. 2025. Т. 28, № 4. С. 63–68. DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_4_63.

Информация об авторах

В. Э. Зинуров – и. о. зав. кафедры «Инженерная графика» Казанского государственного энергетического университета.

М. А. Прец – старший преподаватель кафедры «Инженерная графика» Казанского государственного энергетического университета.

REFERENCES

1. Shirinova, D.B. Classification of polydisperse molybdenite powder // *Eurasian Scientific Journal*. 2016. (2), 127-128. (In Russ.).

2. Zinurov, V.E., Madyshev, I.N., Kayumova, A.A. & Moiseeva, K.S. (2022). Experimental determination of hydraulic resistance of a simplified model of a multi vortex classifier with coaxially arranged pipes. *Polzunovskiy vestnik* (2), 108-116. (In Russ.). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.015.

3. Kim, S.W., Yeo, C.E. & Lee, D.Y. (2019). Effect of fines content on fluidity of FCC catalysts for stable operation of fluid catalytic cracking unit. *Energies*, 12(2), 293. DOI: 10.3390/en12020293.

4. Pakhnutova, E.A. & Slizhov, Yu.G. (2021). Physico-chemical properties of a sorbent based on silica gel with a grafted copper-acetoacetic ester complex. *Sorption and Chromatographic Processes*, (4), 529-539. (In Russ.). DOI: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3637.

5. Videira-Quintela, D., Martin, O. & Montalvo, G. (2021). Emerging opportunities of silica-based materials within the food industry. *Microchemical Journal*, (167), 106318. DOI: 10.1016/j.microc.2021.106318.

6. Mamontov, G.V., Evdokimova, E.V., Savel'eva, A.S., Zubkov, A.V., Mikheeva, N.N., Mazov, I.N. & Knyazev, A.S. (2023). Silica Gel as a Sorbent and Catalyst Support: Improvement of Technologies and Search for Alternative Production Routes. *Catalysis in Industry*, 15(3), 221-228. DOI: 10.1134/S2070050423030054.

7. Shapiro, M. & Galperin, V. (2005). Air classification of solid particles: a review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(2), 279-285. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.022.

8. Huang, L., Yuan, J., Pan, M., Wu, J., Qiao, J., Jiang, H. & Duan, C. (2023). CFD simulation and parameter optimization of the internal flow field of a disturbed air cyclone centrifugal classifier. *Separation and Purification Technology*, 307, 122760. DOI: 10.2139/ssrn.4227862.

9. Akhmadiev, F.G., Gizzatov, R.F. & Nazipov, I.T. (2019). Calculation of multistage screen classifiers for separating granular materials by size. *Matematicheskie Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh - MMTT*, 8, 54-61. (In Russ.).

10. Falko, A.L., Kryvosheya, A.V., Chernysheva, E.A. & Shcherbakov, V.Yu. (2015). Improving the productivity of drum screen classifiers. *Vestnik Donskogo Gosudarstvennogo Agramogo Universiteta*, (4-1(18), 54. (In Russ.).

11. Lanzerstorfer, C. (2015). Application of air classification for improved recycling of sinter plant dust. *Resources, Conservation and Recycling*, (94), 66-71. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.11.013.

12. Mou, X., Jia, F., Fang, Y. & Chen, C. (2021). CFD-based structural optimization of rotor cage for high-efficiency rotor classifier. Processes, 9(7), 1148. DOI: 10.3390/pr9071148.

13. Hui, C., Li, Q., Peng, J. & Fang, Y. (2024). Computational fluid dynamics simulation and performance study of a three-separation combined air classifier. *Thermal Science*, 28(2 Part C), 1589-1603.

14. Yu, Y., Liu, J. & Li, G. (2013). Empirical study of classification process for two-stage turbo air classifier in series. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 26(3), 526-531. DOI: 10.3901/CJME.2013.03.526.

15. Rivera-García, M.O., Reyna, M.A., Camarillo-Ramos, M.A., Reyna-Vargas, M.A., Avitia, R.L., Cuevas-González, D. & Osornio Vargas, A.R. (2023). Cyclone separator for air particulate matter personal monitoring: a patent review. *Atmosphere*, 14(4), 624. DOI: 10.3390/atmos14040624.

16. Sun, Z., Sun, G., Peng, P., Liu, Q. & Yu, X. (2019). A new static cyclonic classifier: Flow characteristics, performance evaluation and industrial applications. *Chemical Engineering Research and Design*, 145, 141-149. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.03.018.

17. Caliskan, M.E., Karagoz, I., Avci, A. & Surmen, A. (2019). Investigation into the effects of various parameters on the performance and classification potential of a cyclone classifier. *Powder Technology*, 356, 102-111. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.104

18. Zinurov, V.E., Madyshev, I.N., Ivakhnenko, A.R. & Petrova, I.V. (2021). Development of a classifier with coaxially arranged pipes for the separation of bulk silica gel-based material. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 205-211. (In Russ.). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029.

19. Zinurov, V.E., Kharkov, V.V. & Madyshev, I.N. (2022). Numerical simulation of pressure loss in a classifier with coaxial pipes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (10-1), 173-181. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_173.

20. Zinurov, V., Kharkov, V., Pankratov, E. & Dmitriev, A. (2022). Numerical study of vortex flow in a classifier with coaxial tubes. *International Journal of Engineering & Technology Innovation*, 12(4). DOI: 10.46604/ijeti.2022.9568.

21. Zinurov, V. E., Dmitriev, A. V., Dmitrieva, O. S. & Muginov, A. M. (2024). The influence of the design of a static multi-vortex classifier on the efficiency fractionation of silica gel particles. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1-6. DOI: 10.1134/S0040579524600992.

22. Zinurov, V. E., Dmitriev, A. V., Dmitrieva, O. S. & Moiseeva, K. S. (2022). Industrial testing of bulk material fractionation in a multi-vortex classifier-separator. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*, 25(4), 58-63. (In Russ.). DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_4_58.

23. Prets, M. A., Zinurov, V. E., Dmitriev, A. V. & Muginov, A. M. (2025). Numerical study of the influence of geometric parameters of a multivortex classifier on particle fractionation efficiency. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*, 28(4), 63-68. (In Russ.). DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_4_63.

Information about the authors

V. E. Zinurov - Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Department of «Engineering Graphics» of the Kazan State Power Engineering University.

M. A. Prets - Senior Lecturer of the Department of «Engineering Graphics» of the Kazan State Power Engineering University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 256–263.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 256–263.

Научная статья
2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК 547.792
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.036 EDN: RDGDYJ

СИНТЕЗ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОМПЛЕКСНЫЙ *INSILICO* АНАЛИЗ НОВОГО МЕТИЛТРИАЗОЛЬНОГО ПРОИЗВОДНОГО

Екатерина Валерьевна Пивоварова [1], Константин Константинович Босов [2], Ирина Александровна Крупнова [3], Геннадий Тимофеевич Суханов [4], Анна Геннадьевна Суханова [5], Юлия Вадимовна Филиппова [6]

[1, 2, 3, 4, 5, 6] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Бийск, Россия
[1] pivovarova.ekaterina@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0001-9806-0770
[2] kosmos070@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8174-5626
[3] irinka-krupnova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0833-7129
[4] suhanovlab7@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1245-1549
[5] nika7_anna@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5124-3796
[6] filippova-yulia@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2356-3140

Аннотация. *Поиск новых эффективных и безопасных лекарственных препаратов остается актуальной задачей медицинской химии. В качестве перспективных кандидатов для создания новых лекарственных средств, в том числе обладающих противоопухолевым действием, активно исследуются производные 1,2,4-триазола. Это обусловлено широким спектром биологической активности и структурным разнообразием соединений, содержащих в своей структуре триазоловые гетероциклы. В представленной работе выполнен направленный синтез нового биологически активного производного на основе 1,2,4-триазолового скаффолда реакцией нуклеофильного замещения нитрогруппы 2-метил-3-нитро-1,2,4-триазола этиленхлоргидрином в присутствии основания. Показано, что взаимодействие протекает преимущественно по заданному направлению с образованием С3-замещенного хлорэтокси-производного 1,2,4-триазола. Структура нового соединения надежно подтверждена методами ^{1}H, ^{13}C ЯМР- и ИК-спектроскопии. Для синтезированного триазольного производного методами компьютерного прогнозирования (insilico) осуществлена комплексная оценка биологической активности (PASS Online), основных физико-химических показателей и фармакокинетического профиля (Swiss ADME), а также токсичности (ProTox 3.0). Сочетание метилтриазольного каркаса с хлорсодержащим алкильным заместителем обеспечивает целевому соединению высокую (Pa = 0,868) противоопухолевую активность в отношении солидных опухолей, благоприятное сочетание физико-химических свойств, полное соответствие критериям лекарственного подобия (правилам Липински, Вебера и Игана), высокую прогнозируемую пероральную биодоступность (0,55) и малую токсичность (LD_{50} = 500 мг/кг, 4 класс токсичности). Полученные результаты исследования демонстрируют, что разработанное триазольное производное является высокоперспективным кандидатом для дальнейших исследований в качестве перорально активного противоопухолевого агента.*

Ключевые слова: *2-метил-3-нитро-1,2,4-триазол, этиленхлоргидрин, S_N^{ipso}-замещение, функциональные производные 1,2,4-триазола, биологическая активность, Pass Online, фармакокинетика (ADME), токсичность.*

Благодарности: *исследование выполнено в рамках «базового» бюджетного финансирования (код научной темы FUFE-2024-0007, номер госрегистрации проекта № 124021200029-1) при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).*

Для цитирования: Синтез, спектральные характеристики и комплексный insilico анализ нового метилтриазольного производного / Е. В. Пивоварова [и др.]. // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 256–263. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.036. EDN: https://elibrary.ru/RDGDYJ.

Original article

SYNTHESIS, SPECTRAL CHARACTERISTICS, AND COMPREHENSIVE *IN SILICO* ANALYSIS OF A NEW METHYLTRIAZOLE DERIVATIVE

Ekaterina V. Pivovarova [1], Konstantin K. Bosov [2], Irina A. Krupnova [3], Gennady T. Sukhanov [4], Anna G. Sukhanova [5], Yulia V. Filippova [6]

[1, 2, 3, 4, 5, 6] Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk, Barnaul, Russia
[1] pivovarova.ekaterina@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0001-9806-0770

© Пивоварова Е. В., Босов К. К., Крупнова И. А., Суханов Г. Т., Суханова А. Г., Филиппова Ю. В., 2026

СИНТЕЗ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОМПЛЕКСНЫЙ IN SILICO АНАЛИЗ НОВОГО МЕТИЛТРИАЗОЛЬНОГО ПРОИЗВОДНОГО

[2] kosmos070@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8174-5626
[3] irinka-krupnova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0833-7129
[4] suhanovlab7@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1245-1549
[5] nika7_anna@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5124-3796
[6] filippova-yulia@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2356-3140

Abstract. *The search for new effective and safe drugs remains a relevant task for medicinal chemistry. 1,2,4-Triazole derivatives are being actively studied as promising candidates for designing new drugs, including those with antitumor activity. This is due to the wide range of biological activity and structural diversity of compounds that structurally contain triazole heterocycles. In this work, a targeted synthesis of a new bioactive derivative based on the 1,2,4-triazole scaffold was performed via nucleophilic substitution of ethylene chlorohydrin for the nitro group in 2-methyl-3-nitro-1,2,4-triazole in the presence of a base. The interaction is shown to proceed predominantly in the specified direction to form a C3-substituted chloroethoxy derivative of 1,2,4-triazole. The structure of the new compound was reliably confirmed by $^{1}H,^{13}C$ NMR and IR spectroscopy. The comprehensive in silico assessment of the biological activity, key physicochemical parameters, pharmacokinetic profile (SwissADME), and toxicity (ProTox 3.0) of the synthesized triazole derivative was performed by computer-aided prediction methods (PASS Online). The methyl triazole framework combined with the chlorine-containing alkyl substituent provides the target compound with high (Pa = 0.868) antitumor activity against solid tumors, a favorable set of physicochemical properties, full compliance with the drug-likeness criteria (according to the rules of Lipinski, Veber, and Egan), high predicted oral bioavailability (0.55), and low toxicity (LD50 = 500 mg/kg, toxicity class 4). The findings demonstrate that the developed triazole derivative holds much promise as a candidate for further research as an orally active antitumor agent.*

Keywords: *2-methyl-3-nitro-1,2,4-triazole, ethylene chlorohydrin, S_N^{ipso}-substitution, functional derivatives of 1,2,4-triazole, biological activity, Pass Online, pharmacokinetics (ADME), toxicity.*

Acknowledgements: *the study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project State Registration ID: 121061500029-7) using instrumentation provided by the Biysk Regional Center for Shared Use of Scientific Equipment of the SB RAS (IPCET SB RAS, Biysk).*

For citation: Pivovarova, E. V., Bosov, K. K., Krupnova, I. A., Sukhanov, G. T., Sukhanova, A. G. & Filippova, Yu. V. (2026). Synthesis, spectral characteristics, and comprehensive in silico analysis of a new methyltriazole derivative. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 248-263. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.036. EDN: https: //elibrary.ru/RDGDYJ.

ВВЕДЕНИЕ

Производные 1,2,4-триазолов привлекают значительное внимание из-за их синтетической и фармакологической важности. Триазольный фрагмент интегрирован в широкий спектр терапевтически интересных молекул лекарственных средств, включая антимикробные, противовирусные, противотуберкулезные, противовоспалительные, противогрибковые, противораковые, цитотоксические, седативные, антидепрессантные, противотревожные и противосудорожные средства [1]. Высокая биологическая активность 1,2,4-триазолового скаффолда определяет его активное использование в качестве основы для создания новых лекарственных препаратов различного спектра действия [2–6].

Реакционная способность 1,2,4-триазоловых производных позволяет включать различные заместители, способствующие разработке соединений с оптимизированными характеристиками с учетом фармакологической ценности. Перспективным направлением является синтез новых галогенсодержащих производных, поскольку значительная часть лекарственных препаратов на основе 1,2,4-триазолового скаффолда содержит также в структуре галогены (чаще всего атом хлора в качестве заместителя в бензольном кольце) [1–6]. Сочетание в единой молекуле двух биологически активных фрагментов – триазолового гетероцикла и хлорсодержащей функциональной группы позволит получить соединения, обладающие спектром фармакологически ценных свойств.

В настоящее время *insilico* исследования, основанные на методах компьютерного моделирования, играют значительную роль в ходе разработки, отборе и синтезе новых биологически активных соединений [7, 8]. Использование доступных и достаточно простых в использовании онлайн инструментов позволяет быстро и с высокой надежностью на ранних этапах отбирать наиболее перспективные соединения-кандидаты для последующих экспериментальных исследований. Такие инструменты позволяют предсказать для интересующей структуры такие важные свойства, как вид биологической активности, физико-химические параметры, липофильность, растворимость в воде, фармакокинетика, токсичность и ряд других показателей.

В данной работе приведены результаты исследований, направленных на получение нового производного 1,2,4-триазола с функциональным хлорсодержащим заместителем. Подробно рассмотрены спектральные характеристики, позволяющие достоверно подтвердить структуру полученного производного. Для целевого соединения методами *insilico* проведен комплексный анализ прогнозируемой биологической активности, основных физико-химических параметров, фармакокинетических свойств и токсичности для оценки и дальнейшего исследования его в качестве основы нового лекарственного средства.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Инфракрасные спектры (ИК-спектры) синтезированного производного 1,2,4-триазола регистрировали с использованием Фурье-спектрометра Симекс ФТ-801 в таблетках KBr.

^{1}H и ^{13}C ЯМР спектры регистрировали на спектрометре Bruker AV-400 с рабочей частотой 400 МГц и 100 МГц для ядер ^{1}H и ^{13}C соответственно. В качестве внутреннего стандарта использовали характеристичные сигналы растворителя ДМСО-d6 (δ 2.5 м.д. для ядер ^{1}H и 39.9 м.д. для ядер ^{13}C).

Термические характеристики полученного соединения определяли с использованием методадифференциальной сканирующей калориметрии (метод ДСК). Эксперименты проводили на термоанализаторе «DSC822e» в диапазоне температур от 25 ºС до 500 ºС. Скорость линейного нагрева исследуемого образца в потоке инертного газа (азот) составляла 10 ºС/мин.

Прогнозирование спектра биологической активности целевого соединения проводили с помощью ресурса PASS Online [9]. Прогноз физико-химических и фармако-

кинетических свойств выполняли с помощью веб-инструмента Swiss ADME [10]. Оценку острой пероральной токсичности и соответствующую классификацию осуществляли с помощью веб-сервера ProTox 3.0 [11].

2-Метил-3-нитро-1,2,4-триазол (1). Исходный 2-метил-3-нитро-1,2,4-триазол получали согласно разработанному в ИПХЭТ СО РАН методу [12], основанному на реакции алкилирования 3-нитро-1,2,4-триазола диметилсульфатом в присутствии щелочи. Выход 19,1 %. $T_{пл.}$ = 81÷82 ºС. ЯМР ^{1}H (400 МГц, ДМСО-d6), δ, м.д.: 8.15 (с, 1H, C*5*–H); 4.18 (с, 3H, N2–CH_3). ЯМР ^{13}C (100 МГц, ДМСО-d6), δ, м.д.: 153.00 (C*3*–NO_2); 148.55 (C*5*–H); 40.25 (N*2*–CH_3). ИК, ν, см$^{-1}$: 3107, 1562, 1505, 1444, 1371, 1336, 1280, 1266, 1024, 838, 702.

Все другие химические вещества приобретены у коммерческих поставщиков и использовались без дополнительной очистки.

5-(2-хлорэтокси)-1-метил-1H-[1,2,4]триазол (3). Раствор, состоящий из 2-метил-3-нитро-1,2,4-триазола (0,1 моль), этиленхлоргидрина (0,2 моль) и трет-бутилового спирта (60 мл), нагревали при перемешивании до кипения. К кипящему раствору порционно дозировали NaOH (0,2 моль). Реакцию проводили до полного расходования 2-метил-3-нитро-1,2,4-триазола по данным ЯМР-спектроскопии. По окончании реакции массу охлаждали до комнатной температуры, неорганические соли отфильтровывали. Раствор упаривали на роторном испарителе при пониженном давлении. Остаток обрабатывали хлористым метиленом, осадок отфильтровывали. Раствор продукта в хлористом метилене последовательно промывали 5%-ным водным раствором Na_2CO_3 и водой, затем осушивали над безводным $MgSO_4$. Растворитель удаляли на роторном испарителе при пониженном давлении. Полученный продукт перегоняли в вакууме (0,6 мм рт.ст.) при температуре 85÷86 ºС.Выход – 65,8 %. $T_{пл.}$ = 47,9 °С.ЯМР ^{1}H (400 МГц, ДМСО-d6), δ, м.д.: 7.57 (с, 1H, C*5*–H); 3.57 (с, 3H, N*2*–CH_3); 4.58÷4.61 (т, 2H, –O–CH_2–); 3.97÷3.99 (т, 2H, –CH_2–CH_2–). ЯМР ^{13}C (100 МГц, ДМСО-d6), δ, м.д.: 147.76 (C*3*–*O*–); 158.46 (C*5*–H); 33.12 (N*2*–CH_3);71.29 (–O–CH_2–); 42.94(–CH_2–Cl). ИК, ν, см$^{-1}$: 3004, 2956, 1554, 1521, 1434, 1372,1174, 1079, 1026, 888, 874, 724.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отличительной особенностью 1,2,4-триазоловых производных является наличие в молекуле нескольких реакционноспособных центров, что открывает широкие синтетические возможности для их структурной модификации. С другой стороны, это затрудняет селективную функционализацию указанных соединений.

Одним из синтетических путей, позволяющих селективно осуществлять функционализацию 1,2,4-триазоловых производных, выступает реакция S_N^{ipso}-замещения нитрогруппы N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов О-нуклеофилами [13–16]. Наиболее реакционноспособный в данном типе реакций 2-метил-3-ниро-1,2,4-триазол (**1**) [15, 16] использован в данной работе в качестве стартовой молекулы для последующей модификации структуры.

Для введения в структуру базовой молекулы хлорсодержащего заместителя в качестве О-нуклеофильного реагента было выбрано бифункциональное галогенсодержащее соединение – этиленхлоргидрин(**2**). Для преобразования исходного спирта в более реакционноспособный в данном типе реакций алкоголят в реакционную среду порционно вводили гидроксид натрия. В качестве растворителя использовали *трет*-бутанол – третичный спирт, в выбранных условиях инертный по отношению к реагенту и субстрату. Реакцию проводили при кипении растворителя. Контроль протекания реакции осуществляли методом ^{1}H ЯМР-спектроскопии.

Установлено, что процесс протекает преимущественно по целевому направлению с образованием продукта нуклеофильного замещения нитрогруппы исходного нитротриазола **1** этиленхлоргидрином – 5-(2-хлорэтокси)-1-метил-1H-[1,2,4]триазола (**3**) (рисунок 1). Помимо целевого соединения в реакционной массе зафиксированы триазолон (**4**) и триазолоновый бицикл (**5**). Соединение **4** является продуктом конкурирующей реакции субстрата **1** с гидроксид-анионом, генерируемым в ходе реакции. В свою очередь, образовавшийся триазолон **4** выступает в качестве N-нуклеофила по отношению к субстрату **1**, что приводит к образованию триазолонового бицикла (**5**). Приведенные параллельные реакции характерны для нуклеофильного замещения нитрогруппы алкилнитротриазолов различными О-нуклеофилами [15, 16].

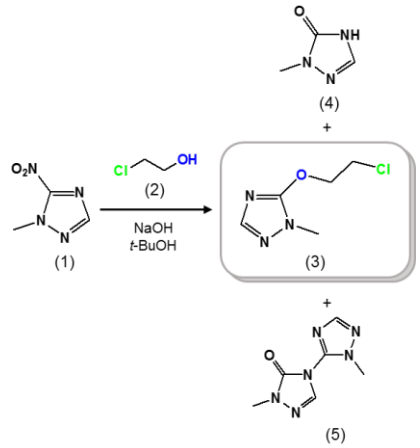


Рисунок 1 – Схема синтеза функционального производного 2-метил-3-нитро-1,2,4-триазола

Figure 1 – Synthetic route to the functional derivative of 2-methyl-3-nitro-1,2,4-triazole

Показано, что проведение реакции в условиях эквимолярного соотношения реагента, субстрата и основания не позволяет достичь полной конверсии нитротриазола **1** в функциональное производное **3**. Обнаружено, что через 3,5 часа реакции соотношение исходных реагентов **1**/**2** в реакционной массе составляет 86,60/13,40 мольн.%, при общей конверсии субстрата 48,7 %. Недостаточное количество реагента по отношению к субстрату при низкой степени превращения свидетельствует о необходимости использования избытка этиленхлоргидрина.

Для достижения высокой степени конверсии нитротриазола использовали двукратный избыток нуклеофила и основания. В выбранных условиях полное расходование субстрата и реагента достигается за 20 часов, при этом соотношение продуктов реакции **3**/**4**/**5** в реакционной массе составляет 93,72/5,33/0,95 мольн.%. После выделения и очистки с выходом более 65 % получали соединение **3** в виде низкоплавкого кристаллического вещества.

Структура целевого соединения подтверждена методами ^{1}H, ^{13}C ЯМР- и ИК-спектроскопии. Показано, что при замещении электроноакцепторной нитрогруппы субстрата **1** на хлорэтокси-группу резонансные сигналы эндоциклического кольцевого протона и экзоциклического метильного заместителя смещаются в область более сильных полей относительно сигналов **1** и регистрируются в форме синглетов при 7.57 м.д. (***a***, C*5*–H); и 3.57 м.д. (***b***, N2–CH_3) соответственно (рисунок 2, ***a***).

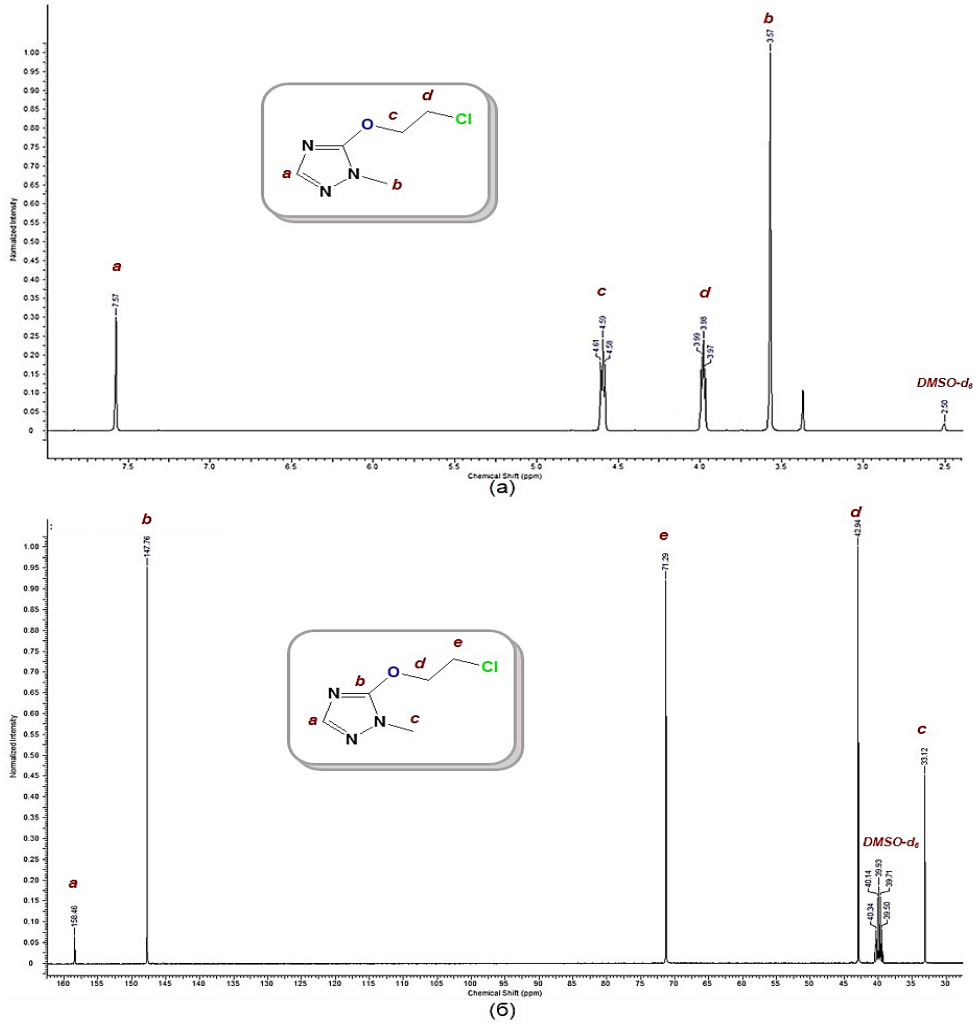


Рисунок 2 – ^{1}H (а) и ^{13}C (б) спектры соединения **3** / Figure 2 – ^{1}H (a) and ^{13}C (б) spectra of the compound **3**

Сигналы протонов углеводородной цепи заместителя при атоме углерода C*3* имеют форму триплетов и резонируют в области более сильных полей при 4.58÷4.61 м.д. (***c***, –O–C$\underline{H}_2$) и 3.97÷3.99 м.д. (***d***, –CH_2–C$\underline{H}_2$–). Сигналы эндоциклических атомов углерода в ЯМР ^{13}C спектре регистрируются в наиболее слабой области спектра при 158.46 м.д. (***a***, C*5*–H) и 147.76 м.д. (***b***, C*3*–O–). Интенсивные сигналы –CH_2– групп хлорэтокси-заместителя резонируют в области 71.29 м.д. (***e***, –O–C$\underline{H}_2$–) и 42.94 м.д. (***d***, –C$\underline{H}_2$–Cl). В сильной области спектра при 33.12 м.д. (***c***, N2–C$\underline{H}_3$) расположен сигнал углерода экзоциклической метильной группы.

В ИК-спектре соединения **3** симметричные и антисимметричные колебания экзоциклических –CH_3 и –CH_2– групп регистрируются в области 2955 см$^{-1}$. Колебания связей атомов триазоловых гетероциклов регистрируются в области 1520÷1556 см$^{-1}$ (C=N), 3045÷3108 см$^{-1}$(C-H). Валентные симметричные и антисимметричные колебания простой эфирной связи C–O–C регистрируются в спектре в виде двух интенсивных полос поглощения в области 1173 см$^{-1}$ и 1026 см$^{-1}$. Полоса поглощения, соответствующая колебаниям связи C–Cl, находится в характеристичной области 724 см$^{-1}$.

Для оценки фармакологического потенциала синтезированного соединения **3** с помощью ресурса PASS Online проведено прогнозирование вероятного спектра его биологической активности. На основе структурной формулы органического соединения указанный ресурс осуществляет прогноз наличия определенного типа биологической активности. Прогнозирование осуществляется путём анализа взаимосвязей «структура–активность» на основе большой обучающей выборки, которая включает: лекарственные вещества, кандидаты в препараты на различных этапах клинических и доклинических исследований, фармакологические агенты и биохимические реагенты, а также соединения с известной информацией о специфической токсичности [17]. При этом считается, что при Pa > 0,5 вероятность экспериментального подтверждения предсказанной биологической активности является высокой [18]. Анализ результатов оценки показывает высокий прогнозируемый потенциал (Pa > 0,6) биологической активности и позволяет выделить наиболее вероятные и значимые перспективные направления биологического действия для исследованного соединения (таблица 1).

Так, прогноз демонстрирует исключительно высокую противоопухолевую активность (*antineoplastic*, Pa = 0,699), которая в значительной степени направлена против солидных злокачественных новообразований (*antineoplastic (solid tumors)*, Pa = 0,868). Столь высокий показатель указанной активности может служить весомым основанием для последующих *invitro* исследований в отношении ряда наиболее активных линий раковых клеток.

Таблица 1 – Прогнозируемая биологическая активность функционального производного 1,2,4-триазола по данным программы PASS Online (Pa > 0,6)

Table 1 – Predictable biological activity of the functional 1,2,4-triazole derivative as per the PASS Online tool (Pa > 0,6)

Активность	Pa	Pi
Противоопухолевые (солидные опухоли)	0,868	0,003
Противоопухолевые	0,699	0,026
Ингибитор NADPH-пероксидазы	0,684	0,030
Ингибитор лейкопоэза	0,653	0,005
Ингибитор полипоропепсина	0,630	0,058
Примечания: Pa – вероятность того, что исследуемое соединение относится к подклассу активных соединений; Pi – вероятность того, что исследуемое соединение относится к подклассу неактивных соединений		

Кроме того, прогноз выявил несколько потенциальных молекулярных мишеней, ингибирование которых может лежать в основе фармакологических эффектов соединения **3**. Так, с высокой вероятностью (Pa = 0,684) целевое соединение может выступать в качестве ингибитора NADPH-пероксидазы, являющегося ключевым источником активной формы кислорода в клетках организма. Избыточная активность указанного ферментного комплекса может свидетельствовать о росте (прогрессировании) и метастазировании опухолей, о развитии воспалительных процессов. Ингибирование работы NADPH-пероксидазы может оказывать как прямое противоопухолевое действие, так и противовоспалительный эффект.

Умеренно-хороший прогноз ингибирования лейкопоэза (Pa = 0,653), может указывать на потенциальную способность соединения **3** к подавлению процесса образования лейкоцитов. Это, в свою очередь, может свидетельствовать о потенциальной активности для лечения аутоиммунных заболеваний, а также для управления побочными эффектами химиотерапии.

Ингибирование полипоропепсина (Pa = 0,630) предполагает наличие возможной противогрибковой активности, что в целом может расширить спектр потенциального применения соединения **3**.

На следующем этапе исследования для детальной оценки потенциальной лекарственной применимости нового триазольного соединения **3** проведен комплексный *in silico* прогноз его ключевых параметров с использованием веб-инструмента Swiss ADME.

Анализ полученных результатов, представленных в таблице 2, выявил ключевые структурные особенности, оказывающие положительный эффект в отношении лекарственного подобия. Так, целевое соединение (брутто-формула $C_5H_8ClN_3O$) характеризуется относительно низкой молекулярной массой (MW = 161,59 г/моль), что является значительным преимуществом с точки зрения лекарственного подобия. Количество вращающихся связей, равное 3, указывает на достаточную гибкость молекулы для оптимального связывания с биологическими мишенями, не нарушая при этом правил адсорбции. Отсутствие доноров водородных связей (nHD = 0) и наличие трех акцепторов (nHA = 3) является положительным фактором для высокой проницаемости через клеточные мембраны. Низкое значение топологической полярной поверхности (TPSA) – 39,94 Å² (значительно ниже порога, установленного на уровне 140 Å²) является одним из ключевых параметров, прогнозирующих высокую кишечную абсорбцию и способность проникать через гематоэнцефалический барьер (ГЭБ). Параметр фракция Csp^3 (0,60) превышает рекомендуемый порог (> 0,25), что будет способствовать лучшей растворимости соединения и более благоприятному метаболическому профилю, снижая при этом вероятность быстрого выведения из организма.

Липофильность, выраженная через коэффициент распределения в системе октанол–вода (Log *P*), является критически важным параметром лекарственного средства, влияющим на его проницаемость, абсорбцию и метаболизм. Прогнозируемое среднее значение Log *P* = 0,87 находится в оптимальном диапазоне (0 < Log *P*< 3), рекомендованном для большинства лекарственных средств. Такое значение предполагает идеальный баланс между гидрофильностью, необходимой для хорошей растворимости в водных средах организма, и липофильностью, обеспечивающей проникновение через липидные слои клеточных мембран.

Все использованные методы прогнозирования (модель ESOL, Ali, SILICOS-IT) предсказывают высокую растворимость соединения **3**. Рассчитанные значения (> 4 мг/мл) позволяют классифицировать его как «очень хорошо растворимое» вещество. Высокая растворимость является преимуществом для пероральной биодоступности, так как она является необходимым условием для абсорбции в желудочно-кишечном тракте и устраняет в дальнейшем потенциальные проблемы, связанные с разработкой лекарственной формы для нового препарата. Прогноз фармакокинетических параметров свидетельствует о высоком потенциальном лекарственном профиле соединения. Прогнозируется высокая кишечная абсорбция, что является прямым следствием оптимальных значений параметров молекулярной массы, TPSA и Log *P*. Способность соединения проникать через ГЭБ может иметь как положительный, так и негативный эффект. С одной стороны, наличие указанной способности открывает возможности для применения соединения в терапии опухолей центральной нервной системы. С другой стороны, может потенциально приводить к побочным эффектам со стороны центральной нервной системы, что требует дополнительных экспериментальных исследований нейротоксичности данного соединения.

Целевое соединение не является ингибитором пяти основных изоферментов CYP450 (1A2, 2C19, 2C9, 2D6, 3A4) и не является субстратом P-гликопротеина, что значительно снижает риск нежелательных лекарственных взаимодействий. Соединение **3** полностью соответствует правилу Липински (MW ≤ 500; Log *P* ≤ 5; nHA ≤ 10; nHD ≤ 5) [19], что свидетельствует о его высоком потенциале в качестве перорально активного агента. Структурное построение нового триазольного производного полностью соответствует критериям правил Вебера (nRot < 10; TPSA < 140 Å^2; nHA+nHD < 12) [20] и Игана (Log*P* ≤ 5,88; TPSA ≤ 131,6 Å^2) [21], которые предъявляют более строгие требования к полярности и растворимости.

Нарушения критерий Госе (160 <MW< 480; -0,4 < Log *P*< 5,6; 40 < молярная рефракция < 130; 20 < количество атомов < 70) [22.] и Мюгге (200 <MW< 600; -2 < Log*P*< 5; TPSA ≤ 150 Å^2; количество циклов ≤ 7; количество атомов углерода > 4; количество гетероатомов > 1; nRot ≤ 15; nHA ≤ 10; nHD ≤ 5) [23], как правило, связаны с низкой молекулярной массой и малым количеством атомов в структуре молекулы и не считается критичным недостатком, а скорее особенностью малых молекул. Показатель биодоступности, равный 0,55, дополнительно подтверждает умеренно-высокую вероятность хорошей пероральной биодоступности.

Таблица 2 – Прогнозируемые значения основных физико-химических параметров для соединения **3**
Table 2 – Predictable values of the main physicochemical parameters for compound **3**

Параметр	Прогноз
Физико-химические свойства	
Брутто формула	$C_5H_8ClN_3O$
Молекулярная масса (MW), г/моль	161,59
Количество «тяжелых атомов»	10
Количество ароматических «тяжелых атомов»	5
Фракция Csp^3 (Fraction Csp^3)	0,60
Количество вращающихся связей (nRot)	3
Количество акцепторов водородной связи (nHA)	3
Количество доноров водородной связи (nHD)	0
Молекулярная рефракция	37,38
Топологическая площадь полярной поверхности (TPSA), Å^2	39,94
Липофильность	
Log $P_{o/w}$ (iLOGP)	1,84
Log $P_{o/w}$ (XLOGP3)	0,90
Log $P_{o/w}$ (WLOGP)	0,43
Log $P_{o/w}$(MLOGP)	0,48
Log $P_{o/w}$ (Silicos-IT)	0,71
Среднее значение Log $P_{o/w}$	0,87
Растворимость	
Log *S* (метод ESOL)	-1,58
Растворимость по методу ESOL, мг/мл	4,24e+00
Растворимость по методу ESOL, моль/л	2,63e-02
Класс по методу ESOL	очень хорошо растворим
Log *S* (метод Ali)	-1,32
Растворимость по методу Ali, мг/мл	7,67e+00
Растворимость по методу Ali, моль/л	4,74e-02
Класс по методу Ali	очень хорошо растворим
Log *S* (метод SILICOS-IT)	-1,58
Растворимость по методу SILICOS-IT, мг/мл	4,25e+00
Растворимость по методу SILICOS-IT, моль/л	2,63e-02
Класс по методу SILICOS-IT	растворим
Фармакокинетика	
Абсорбция в ЖКТ	высокая
Проницаемость через ГЭБ	да
Субстрат для Р-гликопротеина	нет
Ингибитор CYP1A2	нет
Ингибитор CYP2C19	нет
Ингибитор CYP2C9	нет
Ингибитор CYP2D6	нет
Ингибитор CYP3A4	нет
Log K_p, см/с	-6,56
Критерии лекарственного подобия	
Количество нарушений правила Lipinski	0
Количество нарушений правила Ghose	2
Количество нарушений правила Veber	0
Количество нарушений правила Egan	0
Количество нарушений правила Muegge	1
Показатель биодоступности	0,55

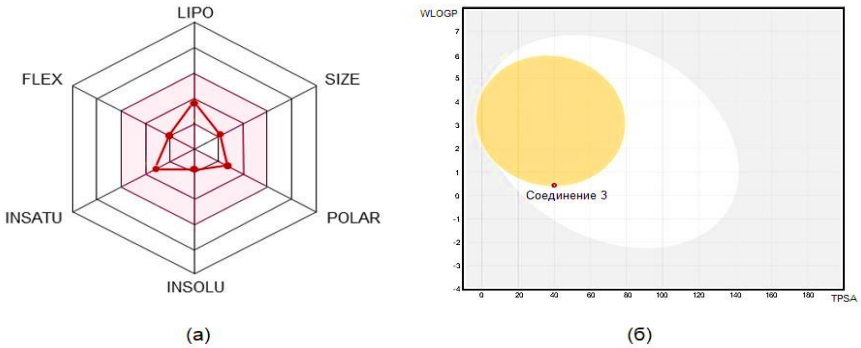
Радарная диаграмма биодоступности, представленная на рисунке 3а (липофильность (LIPO), размер (SIZE), полярность (POLAR), растворимость (INSOLU), насыщенность (INSATU), гибкость (FLEX)), также иллюстрирует для рассматриваемого соединения высокий потенциал для перорального введения (все параметры (красные линии и точки) находятся внутри закрашенного рекомендуемого диапазона).

Модель BOILED-Egg (рисунок 3, *б*) оценивает возможность желудочно-кишечной абсорбции (белая область яйца) и проникновения в мозг (желток) в зависимости от показателей WLog*P* – TPSA. Для соединения **3** прогнозируется возможность проникновения в мозг без последующего активного оттока (красная точка).

Согласно прогнозу острой пероральной токсичности [11], синтезированное триазольное производное может быть отнесено к 4-му классу токсичности (LD_{50} = 500 мг/кг) – малотоксичные вещества (4 класс: 300 < LD_{50} ≤ 2000).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществлен направленный синтез нового хлорсодержащего триазолового производного реакцией нуклеофильного замещения нитрогруппы 2-метил-3-нитро-1,2,4-триазола этиленхлргидрином. Структура нового соединения подтверждена методами ^{1}H, ^{13}C ЯМР- и ИК-спектроскопии.



(а) (б)

Рисунок 3 – Радарная диаграмма биодоступности (а) и модель BOILED-Egg (б) для соединения 3

Figure 3 – (a) Bioavailability radar chart and (b) BOILED-Egg model for compound **3**

Результаты комплексного *insilico* исследования для соединения **3** демонстрируют его высокий прогнозируемый потенциал в качестве противоопухолевого агента, направленного против солидных опухолей (Pa = 0,868), а также наличие возможной противовоспалительной и противогрибковой активности. Значения основных физико-химических параметров (MW, Log *P*, TPSA), высокая прогнозируемая растворимость и проницаемость, а также полное соответствие ключевым правилам лекарственного подобия (Липински, Вебер, Иган) указывают на высокую вероятность его пероральной биодоступности. Благоприятный фармакокинетический профиль, включая отсутствие ингибирования CYP450 и низкий риск лекарственных взаимодействий, а также прогнозируемая низкая острая токсичность (4-й класс), дополнительно подтверждают его высокий потенциал. Анализ результатов позволяет рассматривать соединение **3** в качестве высокоперспективного кандидата для дальнейших исследований в направлении разработки новых противоопухолевых средств на его основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Overview on Medicinal Impacts of 1,2,4-Triazole Derivatives / A.K. Kabi [et al.] // Tailored Functional Materials. 2022. Vol. 15. P. 61–79. doi: 10.1007/978-981-19-2572-6_5.

2. Balavanthapu R., Vedula G.S. Novel 5-((Phenylimino)methyl)-1,2,4-triazol-3-one Derivatives: Synthesis, Anticancer Potential and Molecular Docking Insights // Asian Journal of Chemistry. 2025. Vol. 37. № 6. P. 1257–1265. doi: 10.14233/ajchem.2025.33249.

3. Recent Developments on 1,2,4-Triazole Nucleus in Anticancer Compounds: A Review / R. Kaur [et al.] // Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry. 2016. Vol. 16. P. 465–489. doi: 10.2174/1871520615666150819121106.

4. Identification of 1,2,4-triazoles as new thymidine phosphorylase inhibitors: Future anti-tumor drugs / S.A. Shahzad [et al.] // Bioorganic Chemistry. 2019. Vol. 85. P. 209–220. doi: 10.1016/j.bioorg.2019.01.005.

5. 1,2,4-Triazole Derivatives as Potential Scaffold for Anticonvulsant Activity / V.K. Kamboj[et al.] // Central Nervous System Agents in Medicinal Chemistry. 2015. Vol. 15. P. 17–22. doi: 10.2174/1871524915666150209100533.

6. Song M.-X., Deng X.-Q. Recent developments on triazole nucleus in anticonvulsant compounds: a review // Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry. 2018. Vol. 33. № 1. P. 453–478. doi: 10.1080/14756366.2017.1423068.

7. Computer-aided Prediction of Biological Activity Spectra for Organic Compounds: the Possibilities and Limitations / V.V. Poroikov [et al.] // Russian Chemical Bulletin. 2019. Vol. 12. P. 2143–2154. doi: 10.1007/s11172-019-2683-0.

8. Computer-aided Prediction of Biological Activity Spectra for Chemical Compounds: Opportunities and Limitations / D.A. Filimonov [et al.] // Biomedical Chemistry: Research and Methods. 2018. Vol. 1. P. 1–21. doi: 10.18097/bmcrm00004.

9. PASS: Prediction of Activity Spectra for Biologically Active Substances / A.A. Lagunin [et al.] // Bioinformatics. 2000. Vol. 16. P. 747–748. doi: 10.1093/bioinformatics/16.8.747.

10. An overview on applications of Swiss DME web tool in the design and development of anticancer, antitubercular and antimicrobial agents: A medicinal chemist's perspective / B. Bakchi [et al.] // Journal of Molecular Structure. 2022. Vol. 1259. doi: 10.1016/j.molstruc.2022.

11. ProTox 3.0: a webserver for the prediction of toxicity of chemicals / P. Banerjee [et al.] // Nucleic Acids Research. 2024. Vol. 52. P. W513–W520. doi: 10.1093/nar/gkae303.

12. Суханов Г.Т., Лукин А.Ю. Реакции производных 3-нитро-1,2,4-триазола с алкилирующим агентами 1. Алкилирование в присутствии щелочи // Химия гетероциклических соединений. 2005. № 7. С. 1020–1025.

13. Мерзликина И.А., Суханов Г.Т. Синтез и свойства продуктов замещения нитрогруппы 1-метил-5-нитро-3R-1,2,4-триазолов О-нуклеофилами // Химия в интересах устойчивого развития. 2017. № 25. С. 557–563. doi: 10.15372/KhUR20170511.

14. Синтез и свойства продуктов нуклеофильного замещения нитрогруппы 1-метил-5-нитро-1,2,4-триазола двухатомными спиртами / Г.Т. Суханов [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2018. № 4 (24). С. 287–291. doi: 10.25699/SSSB.2018.24.23173.

15. Влияние структуры алкильного заместителя в положении N(2) гетероцикла на процесс нуклеофильного замещения нитрогруппы N-замещенных 3-нитро-1,2,4-триазолов О- нуклеофилами / И.А. Крупнова [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 4 (38). С. 3–7. doi: 10.25699/SSSB.2021.38.4.014.

16. Мерзликина И.А., Суханова А.Г., Филиппова Ю.В. Влияние C_3-заместителей на процесс S_N^{ipso}-замещения нитрогруппы 1-изопропил-5-нитро-1,2,4-триазолов метиловым спиртом // Ползуновский вестник. 2014. № 3. С. 13–16.

17. Предсказание спектров биологической активности органических соединений с помощью веб-ресурса PASS Online / Д.А. Филимонов [и др.] // Химия гетероциклических соединений. 2014. № 3. С. 483-499. doi: 10.1007/1585.

18. Попова Л.М., Базарнова Ю.Г., Почкаева Е.И. Прогнозирование спектра биологической активности окисленных фторосодержащих эфиров смоляных кислот // Трансляционная медицина. 2023. № 10(5). С. 377–388. doi: 10.18705/2311-4495-2023-10-5-377-388.

19. Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings / C.A. Lipinski [et al.] // Advanced Drug Delivery Reviews. 2001. Vol. 46. P. 3–26. doi:-10.1016/s0169-409x(00)00129-0.

20. Molecular Properties That Influence the Oral Bioavailability of Drug Candidates / D.F. Veber [et al.] // Journal of Medicinal Chemistry. 2002. Vol. 45. № 12. P. 2615–2623. doi: 10.1021/jm020017n.

21. Egan W.J., Merz K.M., Baldwin J.J. Prediction of Drug Absorption Using Multivariate Statistics // Journal of Medicinal Chemistry. 2000. Vol. 43. № 21. P. 3867–3877. doi: 10.1021/jm000292e.

22. Ghose A.K., Viswanadhan V.N., Wendoloski J.J. A Knowledge-Based Approach in Designing Combinatorial or Medicinal Chemistry Libraries for Drug Discovery. 1. A Qualitative and Quantitative Characterization of Known Drug Databases // Journal of Combinatorial Chemistry. 1999. Vol. 1. № 1. P. 55–68. doi: 10.1021/cc9800071.

23. Muegge I., Heald S.L., Brittelli D. Simple Selection Criteria for Drug-like Chemical Matter // Journal of Medicinal Chemistry. 2001. Vol. 44. № 12. P. 1841–1846. doi: 10.1021/jm015507e.

Информация об авторах

Е. В. Пивоварова – младший научный сотрудник лаборатории «Химии и технологии высокоэнергетических азолов» ИПХЭТ СО РАН.

К. К. Босов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Химии и технологии высокоэнергетических азолов» ИПХЭТ СО РАН.

И. А. Крупнова – младший научный сотрудник лаборатории «Химии и технологии высокоэнергетических азолов» ИПХЭТ СО РАН.

Г. Т. Суханов – доктор химических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Химии и технологии высокоэнергетических азолов» ИПХЭТ СО РАН.

А. Г. Суханова – кандидат химических наук, заведующий лабораторией «Химии и технологии высокоэнергетических азолов» ИПХЭТ СО РАН.

Ю. В. Филиппова – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Химии и технологии высокоэнергетических азолов» ИПХЭТ СО РАН.

REFERENCES

1. Kabi, A.K., Gujjarappa, R., Garg, A., Roy, A., Sahoo, A., Gupta, S. & Malakar, C.C. (2022). Overview on Medicinal Impacts of 1,2,4-Triazole Derivatives.*Tailored Functional Materials*, (15), 61-79. doi: 10.1007/978-981-19-2572-6_5.

2. Balavanthapu, R. & Vedula, G.S. (2025). Novel 5-((Phenylimino)methyl)-1,2,4-triazol-3-one Derivatives: Synthesis, Anticancer Potential and Molecular Docking Insights. *Asian Journal of Chemistry*, (37), 1257-1265. doi: 10.14233/ajchem.2025.33249.

3. Kaur, R., Dwivedi, A.R., Kumar, B. & Kumar, V. (2016). Recent Developments on 1,2,4-Triazole Nucleus in Anticancer Compounds: A Review. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*, (16), 465-489. doi: 10.2174/1871520615666150819121106.

4. Shahzada, S.A., Yarb, M., Khanc, Z.A., Shahzadib, L., Naqvic, S.A.R., Mahmoodd, A., Ullaha, S., Shaikha, A.J., Sherazia, T.A., Balea, A.T., Kukułowicze, J. & Bajdae, M. (2019). Identification of 1,2,4-triazoles as new thymidine phosphorylase inhibitors: Future anti-tumor drugs. *Bioorganic Chemistry*, (85), 209-220. doi: 10.1016/j.bioorg.2019.01.005.

5. Kamboj, V.K., Verma, P.K., Dhanda, A. & Ranjan, S. (2015). 1,2,4-Triazole Derivatives as Potential Scaffold for Anticonvulsant Activity. *Central Nervous System Agents in Medicinal Chemistry*, (15), 17-22. doi: 10.2174/1871524915666150209100533.

6. Song, M.-X. & Deng, X.-Q. (2018). Recent developments on triazole nucleus in anticonvulsant compounds: a review. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, (33), 453-478. doi: 10.1080/14756366.2017.1423068.

7. Poroikov, V.V., Filimonov, D.A., Gloriozova, T.A., Lagunin, A.A., Druzhilovskiy, D.S., Rudik, A.V., Stolbov, L.A., Dmitriev, A.V., Tarasova, O.A., Ivanov, S.M. & Pogodin, P.V. (2019). Computer-aided Prediction of Biological Activity Spectra for Organic Compounds: the Possibilities and Limitations. *Russian Chemical Bulletin*, (12), 2143-2154. doi: 10.1007/ s11172-019-2683-0.

8. Filimonov, D.A., Druzhilovskiy, D.S., Lagunin, A.A., Gloriozova, T.A., Rudik, A.V., Dmitriev, A.V., Pogodin, P.V. & Poroikov, V.V. (2018). Computer-aided Prediction of Biological Activity Spectra for Chemical Compounds: Opportunities and Limitations. *Biomedical Chemistry: Research and Methods*, (1), 1-21. doi: 10.18097/bmcrm00004.

9. Lagunin, A., Stepanchikova, A., Filimonov, D. & Poroikov, V. (2000). PASS: Prediction of Activity Spectra for Biologically Active Substances. *Bioinformatics*, (16), 747-748. doi: 10.1093/bioinformatics/16.8.747.

10. Bakchi, B., Krishna, A.D., Sreecharan, E., Ganesh, V.B.J., Niharika, M., Maharshi, S., Babu, P.S., Sigalapalli, D.K., Bhandare, R.R. & Shaik, A.B. (2022). An overview on applications of Swiss ADME web tool in the design and development of anti-cancer, antitubercular and antimicrobial agents: A medicinal chemist's perspective. *Journal of Molecular Structure*, (1259). doi: 10.1016/j.molstruc.2022.132712.

11. Banerjee, P., Kemmler, E., Dunkel, M. & Preissner, R. (2024). ProTox 3.0: a webserver for the prediction of toxicity of chemicals. *Nucleic Acids Research*, (52), W513-W520. doi: 10.1093/nar/gkae303.

12. Sukhanov, G.T. & Lukin, A.Yu. (2005). Reaction of 3-nitro-1,2,4-triazole derivatives with alkylating agents. 1. Alkylation in the presence of alkalil. Chemistry of Heterocyclic Compounds, (7), 1020-1025. (In Russ.).

13. Merzlikina, I.A. & Sukhanov, G.T. (2017). Synthesis and Properties of Products of Nucleophilic Substitution of the Nitro Group in 1-Methyl-5-nitro-3R-1,2,4 Triazoles with O-Nucleophiles. *Chemistry for Sustainable Development*, (25), 557-563. (In Russ.). doi: 10.15372/KhUR20170511.

14. Sukhanov, G.T., Sukhanova, A.G., Krupnova, I.A., Bosov, K.K., Filippova, Yu.V., Istoshina, V.A. & Pivovarova, E.V. (2018). Synthesis and properties of products from nucleophilic substitution of nitro group in 1-methyl-5-nitro-1,2,4-triazole by diatomic alcohols. *South-Siberian scientific bulletin*, (4), 287-291. (In Russ.). doi: 10.25699/SSSB.2018.24.23173.

15. Krupnova, I.A., Sukhanov, G.T., Sukhanova, A.G., Bosov, K.K., Filippova, Yu.V. & Pivovarova, E.V. (2021). Effect of structure of alkyl substituent at N(2) position of heterocycle on nucleophilic substitution of o-nucleophiles for nitro group in n-substituted 3-nitro-1,2,4-triazoles. *South-Siberian scientific bulletin*, (4), 3-7. (In Russ.). doi: 10.25699/SSSB.2021.38.4.014.

16. Merzlikina, I.A., Sukhanova, A.G. & Filippova, Yu.V. (2014). Influence of C3-substituents on the process of S_N^{ipso}-substitution of the nitro group of 1-isopropyl-5-nitro-1,2,4-triazoles with methyl alcohol. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 13-16. (In Russ.).

17. Filimonov, D.A., Lagunin, A.A., Gloriozova, T.A., Rudik, A.V., Druzhilovskii, D.S., Pogodin, P.V. & Poroikov, V.V. (2014). Prediction of the Biological Activity Spectra of Organic Compounds Using the Pass Online Web Resource. *Chemistry of Heterocyclic Compounds*, (3), 483-499. (In Russ.). doi: 10.1007/1585.

18. Popova, L.M., Bazarnova, Yu.G. & Pochkaeva, E.I. (2023). Prediction of the spectrum of biological activity of oxidation products of fluorinated esters of resin acids. *Translational Medicine*, (10), 377-388. (In Russ.). doi: 10.18705/2311-4495-2023-10-5-377-388.

19. Lipinski, C.A., Lombardo, F., Dominy, B.W. & Feeney, P.J. (2001). Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings. *Advanced Drug Delivery Reviews*, (46), 3-26. doi: 10.1016/s0169-409x(00)00129-0.

20. Veber, D.F., Johnson, S.R., Cheng, H.-Y., Smith, B.R., Ward, K.W. & Kopple, K.D. (2002). Molecular Properties That Influence the Oral Bioavailability of Drug Candidates. *Journal of Medicinal Chemistry*, (45), 2615-2623. doi: 10.1021/jm020017n.

21. Egan, W.J., Merz, K.M. & Baldwin, J.J. (2000). Prediction of Drug Absorption Using Multivariate Statistics. *Journal of Medicinal Chemistry*, (43), 3867-3877. doi: 10.1021/jm000292e.

22. Ghose, A.K., Viswanadhan, V.N. & Wendoloski, J.J. (1999). A Knowledge-Based Approach in Designing Combinatorial or Medicinal Chemistry Libraries for Drug Discovery. 1. A Qualitative and Quantitative Characterization of Known Drug Databases. *Journal of Combinatorial Chemistry*, (1), P. 55-68. doi: 10.1021/cc9800071.

23. Muegge, I., Heald, S.L. & Brittelli, D. (2001). Simple Selection Criteria for Drug-like Chemical Matter. *Journal of Medicinal Chemistry*, (44), 1841-1846. doi: 10.1021/jm015507e.

Information about the authors

E.V. Pivovarova - Junior Research Scientist at the Laboratory for Chemistry and Technology of High-Energy Azoles, IPCET SB RAS.

K.K. Bosov - Cand. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist at the Laboratory for Chemistry and Technology of High-Energy Azoles, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS).

I.A. Krupnova - Junior Research Scientist at the Laboratory for Chemistry and Technology of High-Energy Azoles, IPCET SB RAS.

G.T. Sukhanov - Dr. (Chem.), Assoc. Prof., Chief Research Scientist at the Laboratory for Chemistry and Technology of High-Energy Azoles, IPCET SB RAS.

A.G. Sukhanova - Cand. Sci. (Chem.), Head of the Laboratory for Chemistry and Technology of High-Energy Azoles, IPCET SB RAS.

Y.V. Filippova - Cand. Sci. (Chem.), Senior Research Scientist at Laboratory for Chemistry and Technology of High-Energy Azoles, IPCET SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 264–268.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 264–268.

Научная статья
2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК 66.021
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.037 EDN: GVDHXA

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛ-ТРЕТ-БУТИЛОВОГО ЭФИРА НА ОСНОВЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТИЛ-ТРЕТ-БУТИЛОВОГО ЭФИРА

Наталья Ивановна Лосева

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
lni99@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4671-459X

Аннотация. *В статье показана возможность модернизации действующей установки по производству метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) с целью получения этил-трет-бутилового эфира (ЭТБЭ) как целевого продукта. ЭТБЭ обладает сходными физико-химическими и эксплуатационными свойствами в сравнении с МТБЭ, но является более экологичным продуктом и обладает рядом таких преимуществ, как более высокая теплотворная способность, меньшее давление насыщенных паров и гораздо меньшая гигроскопичность. Показано соответствие описываемой технологии производства ЭТБЭ, основанной на взаимодействии изобутилена с этанолом на кислотном сульфокатионитном катализаторе, основным критериям современного нефтехимического производства. Основное изменение в модернизированной технологии производства – замена метанола на этанол. Развитие данной отрасли позволит России выйти на зарубежный рынок производства присадок автомобильных бензинов, организовать экспорт и стать одной из лидирующих стран в этом сегменте нефтехимии. Использование установки для производства как МТБЭ, так и ЭТБЭ позволит осуществить своевременный переход от синтеза одного эфира к другому, удовлетворить потребности новых потребителей и поддерживать импортозамещение в России.*

Ключевые слова: *метил-трет-бутиловый эфир, этил-трет-бутиловый эфир, присадки к моторному топливу, модернизация установки, катализаторы производства эфиров.*

Для цитирования: Лосева Н. И. Организация производства этил-трет-бутилового эфира на основе действующего производства метил-трет-бутилового эфира // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 264–268. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.037. EDN: https://elibrary.ru/GVDHXA.

Original article

ORGANIZATION OF PRODUCTION OF ETHYL -TRET-BUTYL ETHER BASED ON CURRENT PRODUCTION OF METHYL TRET-BUTYL ETHER

Natalya I. Loseva

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
lni99@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4671-459X

Abstract. *The article shows the possibility of upgrading the existing methyl tert-butyl ether (MTBE) production plant in order to produce ethyl tert-butyl ether (ETBE) as a target product. ETBE has similar physico-chemical and operational properties in comparison with MTBE, but it is a more environmentally friendly product and has a number of advantages such as higher calorific value, lower saturated vapor pressure and much less hygroscopicity. The described technology of ETBE production, based on the interaction of isobutylene with ethanol on an acid sulfocationite catalyst, is shown to meet the main criteria of modern petrochemical production. The main change in the upgraded production technology is the replacement of methanol with ethanol. The development of this industry will allow Russia to enter the foreign market for the production of gasoline additives, organize exports and become one of the leading countries in this segment of petrochemicals. The use of the plant for the production of both MTBE and ETBE will allow for a timely transition from the synthesis of one ether to another, meet the needs of new consumers and support import substitution in Russia.*

Keywords: *methyl tert-butyl ether, ethyl tert-butyl ether, additives to motor fuel, modernization of the plant, catalysts for the production of esters.*

For citation: Loseva, N. I. (2026). Organization of production of ethyl -tret-butyl ether based on current production of methyl tret-butyl ether. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 264-268. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.037. EDN: https: //elibrary.ru/GVDHXA.

© Лосева Н. И., 2026

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛ-ТРЕТ-БУТИЛОВОГО ЭФИРА НА ОСНОВЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТИЛ-ТРЕТБУТИЛОВОГО ЭФИРА

ВВЕДЕНИЕ

Еще в 1979 году было найдено применение метил-трет-бутиловому эфиру (МТБЭ) как присадки к моторному топливу, которая существенно повышает его качество ввиду своих физико-химических свойств, и уже через несколько лет эфир доминировал на рынке по сравнению с другими присадками типа монометиланилина и метил-трет-амилового эфира [1].

МТБЭ в смеси с бензином улучшает антидетонационные свойства топлива, позволяет сократить расход топлива, снижает температуру запуска двигателя, образование отложений и нагара, и тем самым позволяет уменьшить износ деталей двигателя. В скором времени в США и Европе встала задача расширения применения биотоплива, что позволило бы отказаться от нефти и газа как источников энергии и перейти на возобновляемые виды топлива. Параллельно с этим свою роль сыграли недостатки МТБЭ. Низкая температура кипения и высокое давление насыщенных паров МТБЭ обусловливают понижение октанового числа моторного топлива в летнее время. Кроме того, доказано негативное влияние МТБЭ на экологию окружающей среды. Из-за возможных утечек эфира из резервуаров хранения происходит его миграция в водозаборные сооружения, и как следствие, образование токсичного метанола.

В 2018 г. в Финляндии произошла экологическая катастрофа – в результате схода с рельсов из российской железнодорожной цистерны в почву вылилось около 35 тыс. л МТБЭ. Из-за возможных экологических проблем в 1990 г. были пересмотрены требования к качеству и стандартам присадок моторного топлива.

Необходимость в альтернативе и развитие химической промышленности способствовали тому, что к концу XX века в США было налажено производство этил-трет-бутилового эфира (ЭТБЭ), который, сохраняя все достоинства МТБЭ, имел множество положительных отличий: более высокая доступность биоэтанола по сравнению с метанолом и отличная биоразлагаемость в естественных условиях. ЭТБЭ обладает схожими физико-химическими свойствами, что и МТБЭ, однако имеет более высокую теплотворную способность, меньшее давление насыщенных паров и гораздо меньшую гигроскопичность [2].

Цель данной работы – сравнительный анализ технологических схем производства МТБЭ и ЭТБЭ, включая каталитические системы, а также обоснование модернизации существующего производства МТБЭ с целью получения ЭТБЭ как целевого продукта.

МЕТОДЫ

Для производства ЭТБЭ нужен этанол. Производство технического этанола в 2023 году составило 2,0 миллиона баррелей в сутки, или 92 млн. тонн. Это составляет 7,5 % от объёма спроса на автомобильный бензин. Мировой рынок этанола достиг около 100 миллионов тонн в 2021 году и, как ожидается, будет расти в среднем на 4,75 % в течение прогнозируемого периода до 2032 года [3]. Важными компаниями рынка этанола являются POET Biorefining, Archer Daniels Midland, Valero Energy, Green Plains LLC, Sao Martinho, SDIC Bio Co., Ltd., Flint Hills Resources LP, Atvos, COFCO Biochemical, The Andersons, Inc., Marquis Energy LLC и другие.

С точки зрения экономики переход с МТБЭ на ЭТБЭ практически никогда не диктуется прямыми рыночными преимуществами, а всегда является вынужденным решением под давлением экологических норм. МТБЭ остаётся более дешевым продуктом, но в условиях политики декарбонизации и регуляторных ограничений, переход на ЭТБЭ открывает доступ к премиальным рынкам и позволяет выполнить требования по сокращению углеродного следа. Сравнительная экономическая оценка перехода с МТБЭ на ЭТБЭ представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная экономическая оценка перехода с МТБЭ на ЭТБЭ

Table 1 – Comparative economic assessment of the transition from MTBE to ETBE

Критерий	МТБЭ	ЭТБЭ	Экономический вердикт
Сырье	**метанол** + изобутилен	**этанол** + изобутилен	**МТБЭ** (метанол дешевле этанола)
Капитальные затраты (CAPEX)	стандартная технология	**ниже**, так как возможна адаптация существующих установок МТБЭ	**ЭТБЭ** (модернизация дешевле нового строительства)
Операционные расходы (OPEX)	**ниже** (из-за низкой стоимости метанола)	**выше**, из-за более высокой стоимости этанола	**МТБЭ**
Экологические риски	**высокие**	**низкие** (безопаснее для окружающей среды)	**ЭТБЭ** (стоимость утилизации рисков несоизмерима)
Доступ к рынку	**ограничен** (не принимается на многих «бензиновых» рынках)	**премиальный**	**ЭТБЭ** (открывает доступ в страны строгой юрисдикции)
Соответствие «зеленой» повестке	**низкое**	**высокое**	**ЭТБЭ**

На сегодняшний день производство МТБЭ является устаревшим, не соответствующим европейским стандартам присадок моторных топлив. Страны АТР также переходят на производство и потребление ЭТБЭ, что требует модернизации производства и перехода к новым технологиям получения присадок и биотоплива для формирования конкурентоспособной позиции на рынке.

ЭТБЭ получают в аналогичных условиях и на том же оборудовании, что и МТБЭ. Условия синтеза ЭТБЭ из изобутилена и этилового спирта: температура ниже 100 ºС и давление 1–2 МПа с кислотным катализатором [4].

Высокооктановые простые эфиры (МТБЭ, ЭТБЭ, МТАЭ) в промышленности получают реакцией селективного присоединения спирта к третичному олефину (изобутилену или изоамиленам: 2-метил-бутену-1 и 2-метил-бутену-2), например:

$$(CH_3)_2C{=}CH_2 + CH_3OH \longrightarrow (CH_3)_3C{-}O{-}CH_3.$$

Условия проведения процесса достаточно мягкие (температура – 50÷80 ºС, давление – 4÷12 атм) в зависимости от получаемого продукта [5].

Рассмотрим возможность модернизации производства МТБЭ с целью получения ЭТБЭ на примере Тобольской промышленной площадки ООО «ЗапСибНефтехим». Установка мощностью 155 тыс.

тонн в год МТБЭ с трубчатым реактором, трубки которого заполнены катализатором.

Технологические параметры работы установки – давление до 13 атм и температура синтеза до 60 ºС в зоне реакции. При таких условиях реагенты находятся в жидком состоянии. Мольное соотношение метанола к изобутилену – 0,95–1,08 ÷ 1. Отвод тепла осуществляется за счет циркуляции в межтрубном пространстве парового конденсата с температурой 10–50 ºС.

После реакторного блока продуктовый поток попадает в узел разделения реакционной массы, представленный тарельчатой колонной ректификации (48 контактных устройств, давление до 6 атм, температура верха 40–60 ºС, куба – 120–140 ºС), колонны экстракции спирта и двух колонн ректификации водного раствора спирта. Непрореагировавший спирт возвращается в реактор.

Параметры колонны ректификации определяют качество выпускаемой продукции.

Для синтеза МТБЭ на ООО «ЗапСибНефтехим» используют макропористый сульфокатионит в Н-форме, ионообменный катализатор КУ-2-ФПП [6].Это активный и стабильный катализатор для реакций с участием первичных спиртов, в том числе и этанола. [7].

Условная схема материальных потоков представлена на рисунке 1.

Синтез ЭТБЭ – гетерогенный каталитический процесс в жидкой фазе при избыточном давлении 6–12 атм и температурном режиме до 80 ºС. Катализатор – сульфокатионитная смола – размещена на полках реактора. Время пребывания в реакторе 30–40 мин.

Так как метанол и этанол – гомологи, их химические свойства одинаковы. Теплота испарения этилового спирта чуть меньше, чем метилового. Плотности спиртов и эфиров также отличаются незначительно. Это позволяет предположить, что замены теплообменного оборудования не потребуется. И объемные расходы спирта практически не изменятся при той же производительности установки.

Таким образом, основное изменение в технологии для производства ЭТБЭ будет заключаться в замене метилового спирта на этиловый. При проектировании установки в теплообменное оборудование уже заложен некоторый запас по производительности, поэтому потребуется лишь только его перенастройка.

Технологическая схема производства ЭТБЭ будет включать те же основные стадии, что и для производства МТБЭ:

1) подготовка сырья;
2) собственно химическое превращение;
3) выделение целевого продукта;
4) утилизация непрореагировавших реагентов и направление их на рецикл.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сырьевые потоки бутан-бутиленовой фракции и этилового спирта нагревают в кожухотрубчатых теплообменниках до 60 ºС и 50–60 ºС соответственно. Если температура материальных потоков не превышает 200 ºС, в качестве теплоносителя на заводах применятся водяной пар под давлением до 12 атм [4].

Целевой продукт синтеза – ЭТБЭ – содержит определённое количество примесей. Процесс очистки и разделения непрореагировавшего сырья проводят более дешевым, чем ректификация, методом сухой отпарки в тарельчатой колонне с кипятильником. Смесь поступает вверх колонны, далее стекая вниз через контактные устройства, жидкость насыщается более высококипящим компонентом – ЭТБЭ. Пары этанола и углеводородов поднимаются вверх и поступают в куб ректификационного аппарата первой ступени, а из куба аппарата сухой отпарки выходит очищенный ЭТБЭ.

Физические свойства сырья и продуктов представлены в таблице 2. Полученный продукт ЭТБЭ охлаждают водой в теплообменнике и далее перекачивают в хранилище предприятия.

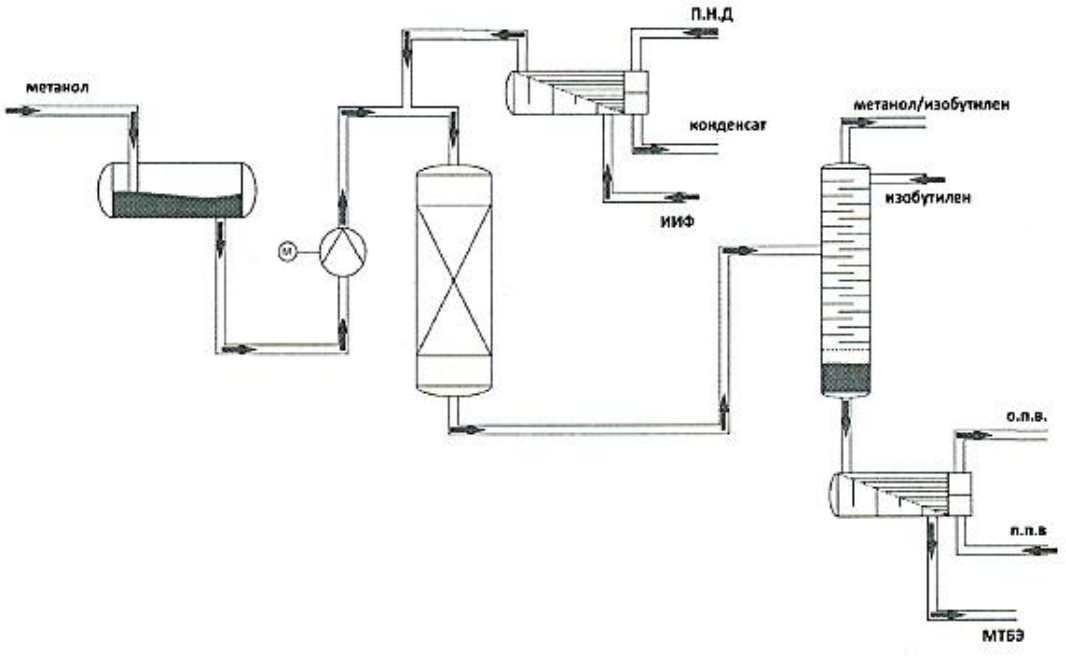


Рисунок 1 – Условная схема материальных потоков установки получения МТБЭ на ООО «ЗапСибНефтехим»

Figure 1 – Conditional flow diagram of the MTBE production facility at ZapSibNeftekhim LLC

Таблица 2 – Физические свойства сырья и продуктов / Table 2 – Physical properties of raw materials and products

Характеристика	МТБЭ	Метанол	ЭТБЭ	Этанол
ИОЧ	118	116	118	120
Плотность, кг/м^3	746	810	750	794
Температура кипения, ºС	55,3	64,7	72,8	78,3
Теплота сгорания, низшая кДж/л	26260	22700	26910	21285

Паровой поток, выходящий с верха колонны ректификации, содержит спирт, углеводородную фракцию, воду и небольшое количество ЭТБЭ. Пары этих веществ конденсируют в конденсаторе. Часть этого конденсата направляют на орошение колонны ректификации для поддержания температуры и соотношения материальных потоков. Разделение углеводородной фракции и водноспиртового раствора проводится совмещенным процессом экстракции и отстаивания в колонном аппарате. Контактные устройства могут быть разными, подбор их осуществляется с целью увеличения массообмена.

Затем ректификацией разделяют этанол и воду. Спирт идет на рецикл. Для эффективности целесообразно установить две емкости – для этанола, поступающего с парка хранения, и для полученного ЭТБЭ (рисунок 2).

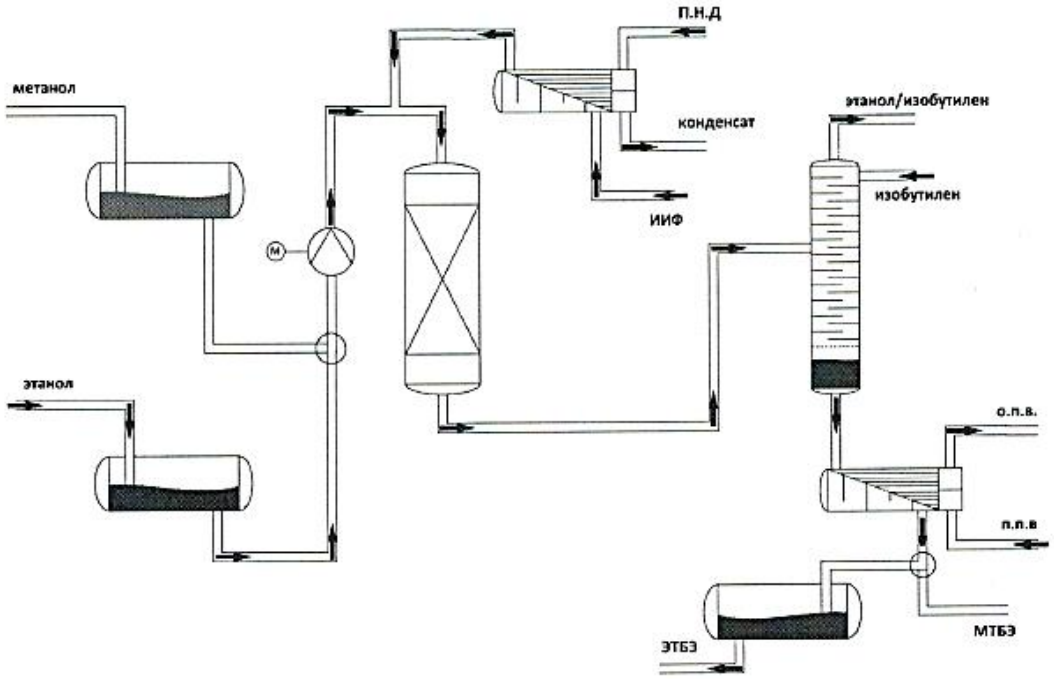


Рисунок 2 – Схема материальных потоков модернизированной установки

Figure 2 – Scheme of material flows of the upgraded installation

Для повышения эффективности производства ЭТБЭ необходимо продолжать поиск оптимальных каталитических систем и параметров технологического режима [8]. Наиболее эффективным аналогом зарубежного сульфокатионитного катализатора для производства МТБЭ и ЭТБЭ в настоящее время является КИФ-Т, сравнительная характеристика которого с катализатором КУ-2ФПП представлена в таблице 2 [9, 10].

ВЫВОДЫ

Для определения экономической эффективности производства каждой присадки необходимо учитывать такие факторы, как затраты на модернизацию и стоимость присадок на мировом рынке, а также цены на катализаторы и первоначальное сырье. С учетом затрат на приобретение технического этанола, можно сделать вывод, что разработка технологии для производства собственного биоэтанола является более выгодным вложением, которое быстро окупится в будущем [11].

Таким образом, технология производства ЭТБЭ реакцией изобутилена с этиловым спиртом на кислотном сульфокатионитном катализаторе характеризуется следующими критериями:

- обеспечивает эффективное производство ЭТБЭ из доступного сырья;
- гарантирует высокое качество производимой продукции;
- оптимально использует сырье и энергию;
- обеспечивает экологически безопасную работу производства.

Развитие данной отрасли позволит России выйти на зарубежный рынок производства присадок автомобильных бензинов, осуществить экспорт и стать одной из лидирующих стран в этом сегменте нефтехимии. Использование установки для производства как МТБЭ, так и ЭТБЭ позволит осуществить своевременный переход от синтеза одного эфира к другому, удовлетворить потребности новых потребителей и поддерживать импортозамещение в России.

Таблица 2 – Характеристика катализаторов КУ-2ФПП и КИФ-Т / Table 2 – Characteristics of KU-2FPP and KIF-T catalysts

Показатели	КУ-2ФПП			КИФ-Т	
	Марка А	Марка А1	Марка А2	Марка А1	Марка А2
Внешний вид гранул	цилиндр	кольцо		цилиндр	
Гранулометрический состав, мм - диаметр гранул - длина - диаметр отверстия - толщина стенки, не менее	 6–10 6–15 – –	 9–13 8–15 3–6 2,0	 11–16 10–20 6–9 2,5	 5–8 5–15 – –	 2,5–4,0 3–15 – –
Полная статическая обменная емкость, мг-экв/г, не менее	2,5	2,5	5	4	4
Каталитическая активность, %, не менее	55	55	55	70	75
Насыпная плотность, не более, г/см^3	0,6	0,6	0,6	0,75	0,75
Массовая доля влаги, %, не более	30	30	30	30–60	30–60

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор. Метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ) / Агентство по охране окружающей среды США. URL : https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.bf6ae69b-678b9c98-3896be22-74722d776562/https/archive.epa.gov/mtbe/web/html/faq.html. (дата обращения: 17.01.2025).

2. Шевченко В.С. Топливные присадки: МТБЭ на пике потребления в России // Вестник химической промышленности : Интернет-портал. URL : http://vestkhimprom.ru/posts/toplivnye-prisadki-mtbe-na-pike-potrebleniya-v-rossii. (дата обращения: 17.01.2025).

3. Мировой рынок этанола. Сайт ПНХ. Поволжьенефтехим. https://petrochemvr.ru/blog/spirty-i-rastvoriteli/mirovoy-rynok-etanola/ (дата обращения: 17.01.2025).

4. Кравченко, Н. А. Разработка технологии производства этил-трет-бутилового эфира на базе технологической схемы производства метил-трет-бутилового эфира / Н.А. Кравченко, А.Д. Морковкина, Н.А. Рахимова // Молодой ученый: Интернет-портал. URL : https://moluch.ru/archive/179/46434/. (дата обращения: 29.06.2024).

5. Техническая информация по технологиям производства высокооктановых эфиров ОАО НИИ «ЯРСИНТЕЗ». Ярославль, 2015. 14 с.

6. Способ получения метил-трет-бутилового эфира: пат. 2248344 Росс. Федерация № 2003132587/04; заявл. 06.11.2003; опубл. 20.03.2005, Бюл. № 8. 7 с.

7. Шукин Н.И. Действие катионообменной смолы КУ-2 на первичные спирты нормальной структуры / Н.И. Щукин, Н.А. Поздняк, Т.П. Добрынина // Russ Chem Bull 13, 1613–1614 (1964). https://doi.org/10.1007/BF00846305.

8. Производство этилтретбутилового эфира – перспективное направление использования биоэтанола в России / Ф.Ш. Вильданов [и др.] // Башкирский химический журнал. 2013. № 3. С. 145–149.

9. Способ определения каталитических свойств катионитных катализаторов синтеза метил-трет-бутилового эфира: пат. 2161302 Росс. Федерация № 99100522/28; заявл. 05.01.1999; опубл. 27.12.2000, 8 с.

10. Насырова Л.А. Исследование и модифицирование катализаторов синтеза эфиров – оксигенатов реформулированных бензинов : автореф. дис. … канд. хим. наук. Уфа, 1999, 23 с.

11. Эффективная практика глубокой переработки газового сырья в химическую продукцию на предприятиях ОАО «СИБУР Холдинг» и используемые технологические процессы / под общ. ред. канд. хим. наук Э.А. Майера. Томск : Издательский дом Томского государственного университета, 2014. 476 с.

Информация об авторах

Н. И. Лосева – кандидат химических наук, доцент кафедры «Общей и физической химии» Тюменского индустриального университета.

REFERENCES

1. Review. Methyl tert - butyl ether (MTBE) / United States Environmental Protection Agency (2025). Retrieved from https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.bf6ae69b-678b9c98-3896be22-74722d776562/https/archive.epa.gov/mtbe/web/html/faq.html. (In Russ.).

2. Shevchenko, V.S. (2016). Fuel additives: MTBE at the peak of consumption in Russia // Bulletin of the Chemical Industry. Retrieved from http://vestkhimprom.ru/posts/toplivnye-prisadki-mtbe-na-pike-potrebleniya-v-rossii. (In Russ.).

3. The global ethanol market. - PNH website. Volga Region-Neftekhim. Retrieved from https://petrochemvr.ru/blog/spirty-i-rastvoriteli/mirovoy-rynok-etanola/. (In Russ.).

4. Kravchenko, N.A. (2017). Development of technology for the production of ethyl tert-butyl ether based on the technological scheme for the production of methyl tert-butyl ether. Retrieved fromhttps://moluch.ru/archive/179/46434. (In Russ.).

5. Technical information on the production technologies of high-octane ethers of JSC Scientific Research Institute YARSINTEZ. (2015). Yaroslavl. (In Russ.).

6. Shcherban, G.T., Li, V.A., Nikitin, V.M., Magsumov, I.A., Yerkhov, A.V. & Zhavoronkov, A.P. (2005). Method of obtaining methyl tert-butyl ether. *Pat. 2248344. Russian Federation, published on 20.03.2005*. Bull. No. 8. (In Russ.).

7. Shukin, N.I. The effect of KU-2 cation-exchange resin on primary alcohols of normal structure / N.I. Shukin, N.A. Pozdnyak, and T.P. Dobrynina // Russ Chem Bull 13, 1613-1614 (1964). https://doi.org/10.1007/BF00846305.

8. Wildanov, F.S. & [others]. (2013). Ethyltretbutyl ether production is a promising area of bioethanol use in Russia. *Bashkir Chemical Journal* (3), 145-149. (In Russ.).

9. Galimov, J.F., Nasyrova, L.A., Gazizov, M.H., Gibadullina, H.M., Kvitko, V.J. & Usmanov, M.R. A method for determining the catalytic properties of cationic catalysts for the synthesis of methyl tert-butyl ether. *Pat. 2161302. Russian Federation, published on 27.12.2000*. (In Russ.).

10. Nasyrova, L.A. (1999). Research and modification of catalysts for synthesis of ethers - oxygenates of reformed gasoline. Extended abstract of candidate's thesis. Ufa. (In Russ.).

11. Effective practice of deep processing of gas raw materials into chemical products at the enterprises of JSC SIBUR Holding and the technological processes used. (2014). Tomsk : Publishing House of Tomsk State University.(In Russ.).

Information about the authors

N.I. Loseva - Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of General and Physical Chemistry at Tyumen Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 269–272.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 269–272.

Научная статья
2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК 534-8
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.038 EDN: BNFAHV

ЧИСЛЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫРОЖДЕННОЙ КАВИТАЦИИ ДЛЯ МАКСИМАЛЬНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ГАЗА

Владимир Николаевич Хмелёв [1], Александр Романович Барсуков [2], Роман Николаевич Голых [3]

[1,2,3] Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия
[1] vnh@bti.secna.ru, https://orcid.org/0000-0001-7089-3578
[2] barsukov.ar@bti.secna.ru, https://orcid.org/0000-0003-3804-3340
[3] grn@bti.secna.ru, https://orcid.org/0000-0002-7708-0665

Аннотация. *В работе рассматривается численное и теоретическое исследование характера распределения амплитуд звукового давления в жидкой среде, окружающей пузырь газа, для решения задач высокоэффективного газопоглощения жидкими средами при воздействии высокоинтенсивного ультразвука. Обоснована необходимость формирования зоны вырожденной кавитации для интенсификации массообменных процессов в системах «газ–жидкость». Изучено влияние амплитуды ультразвукового давления и частоты ультразвука, а также положения газового пузырька относительно излучателя на формирование зон развитой и вырожденной кавитации и характер взаимодействия ударных волн с межфазной границей. Для моделирования использовано уравнение распространения акустического поля в кавитирующей жидкости, преобразованное к уравнению Гельмгольца и дополненное соответствующими граничными условиями. Границы зон кавитации определялись на основе модели Гилмора. Полученные результаты показывают, что газовый пузырёк всегда локально и существенно изменяет структуру акустического поля и окружён пристеночным слоем с отсутствующей кавитацией и следующей за ней зоной развитой кавитации. При этом формирование зоны вырожденной кавитации приводит к уменьшению толщины слоя без кавитации у межфазной границы, что снижает затухание ударных волн и способствует увеличению межфазной поверхности «газ–жидкость». Показано, что максимальная интенсивность кавитационного воздействия достигается в области оптимальных расстояний пузырька от излучателя при частоте около 22 кГц. Результаты работы подтверждают перспективность создания зоны вырожденной кавитации для интенсификации процессов газопоглощения и могут служить основой для разработки и модернизации энергоэффективных ультразвуковых абсорбционных технологий.*

Ключевые слова: *ультразвук, вырожденная кавитация, абсорбция, межфазная поверхность.*

Благодарности: *Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, https://rscf.ru/project/23-12-00278/.*

Для цитирования: Хмелёв В. Н., Барсуков А. Р., Голых Р. Н. Численное обоснование необходимости реализации вырожденной кавитации для максимального увеличения поверхности поглощения газа // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 269–272. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.038. EDN: https://elibrary.ru/BNFAHV.

Original article

NUMERICAL JUSTIFICATION OF NEED TO IMPLEMENT DEGENERATE CAVITATION TO MAXIMUMLY INCREASE GAS ABSORPTION SURFACE

Vladimir N. Khmelev [1], Aleksandr R. Barsukov [2], Roman N. Golykh [3]

[1, 2, 3] Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia
[1] vnh@bti.secna.ru, https://orcid.org/0000-0001-7089-3578
[2] barsukov.ar@bti.secna.ru, https://orcid.org/0000-0003-3804-3340
[3] grn@bti.secna.ru, https://orcid.org/0000-0002-7708-0665

Abstract. *The study examines a numerical and theoretical investigation of the distribution of sound-pressure amplitudes in the liquid medium surrounding a gas bubble, aimed at solving problems of highly efficient gas absorption by liquids under high-intensity ultrasound. The necessity of forming a region of degenerate cavitation to intensify mass-transfer processes in «gas-liquid" systems is substantiated. The influence of the ultrasound pressure amplitude and frequency, as well as the position of the gas bubble relative to the emitter, on the formation of regions of developed and degenerate cavitation and on the interaction of shock waves with the interfacial boundary is investigated. To perform the modeling, the acoustic-field propagation equation in a cavitating liquid was used, transformed into the Helmholtz equation and supplemented with the appropriate boundary conditions. The boundaries of the cavitation zones were determined based on the Gilmore model. The results obtained show that a gas bubble always locally and significantly alters the structure of the acoustic field and is surrounded by a*

© Хмелёв В. Н., Барсуков А. Р., Голых Р. Н., 2026

near-wall layer without cavitation, followed by a region of developed cavitation. At the same time, the formation of a region of degenerate cavitation reduces the thickness of the non-cavitating layer at the interfacial boundary, which decreases shock-wave attenuation and increases the gas-liquid interfacial area. It is shown that the maximum intensity of cavitation action is achieved at optimal bubble-emitter distances at a frequency of about 22 kHz. The results confirm the promise of creating a region of degenerate cavitation for enhancing gas-absorption processes and may serve as a basis for the development and improvement of energy-efficient ultrasonic absorption technologies.

Keywords: *ultrasound, degenerate cavitation, absorption, interfacial surface.*

Acknowledgements: *The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 23-12-00278, https://rscf.ru/project/23-12-00278/.*

For citation: Khmelev, V. N., Barsukov, A. R. & Golykh, R. N. (2026). Numerical justification of need to implement degenerate cavitation to maximumly increase gas absorption surface. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 269-272. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.038. EDN: https: //elibrary.ru/BNFAHV.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективная реализация процесса поглощения газа жидкими средами имеет важное значение при реализации многих химико-технологических процессов. При реализации процессов, в которых большую роль играют: скорость и полнота проходящего массообмена, устойчивость реализуемых режимов и экономическая эффективность разрабатываемых установок, – основной задачей является обеспечение эффективных интенсификационных условий.

К подобным процессам относятся, например, интенсификация химических реакций, регулирование pH, формирование структуры растворов и суспензий. При функционировании газоочистных систем высокая скорость и эффективность газопоглощения напрямую влияют на своевременное извлечение целевых или вредных компонентов газовых выбросов и достижение минимально возможных остаточных концентраций токсичных газов или технологически нежелательных веществ [1–2].

Известные подходы реализации массообмена в системах «газ–жидкость» имеют ограничения, связанные с малой удельной межфазной поверхностью и низкой скоростью диффузии, что снижает эффективность реализации поглощения газов и приводит к увеличению энергозатрат [3].

Один из наиболее эффективных способов увеличения поверхности поглощения газов является реализация технологического процесса при участии ультразвуковых (УЗ) колебаний. Эффективность ультразвука в контексте интенсификации поглощения газов обусловлена формированием устойчивых кавитационных полей, сопровождающихся возникновением большого числа газовых и парогазовых пузырьков и увеличением межфазной поверхности, и, как следствие, увеличением коэффициента массообмена [4–6].

При использовании ультразвука как интенсифицирующего фактора в процессе абсорбции степень развитости формируемой кавитационной зоны и характер распределения амплитуды звукового давления в озвучиваемой области определяют степень роста межфазной границы «газ–жидкость». Исследования влияния высокоинтенсивного ультразвука [7] показывают эффективность режима формирования развитой кавитации в обрабатываемой среде для увеличения поверхности поглощения газа (за счёт высокой концентрации кавитационного облака и высокоамплитудного гидродинамического воздействия коллапсирующих кавитационных пузырьков).

При этом интерес также представляет создание области с вырожденной кавитацией при повышенном уровне звукового давления (> 2,5 атм), характеризующейся мелкодисперсной, насыщенной и динамически стабильной пузырьковой структурой. Потенциально формирование условий (определённые частота, интенсивность ультразвука, расстояние от УЗ излучателя и т.п.) для возникновения зоны вырожденной кавитации может обеспечить скорость интенсификации массообменных процессов «газ–жидкость» недостижимую при воздействии развитого кавитационного облака на межфазную поверхность.

Ввиду вышесказанного, численное обоснование необходимости реализации вырожденной кавитации и экспериментальная верификация предложенного подхода приобретают высокую практическую значимость для задачи высокоэффективного поглощения газов.

МЕТОДЫ

В рамках данной работы было проведено теоретическое исследование посредством математического моделирования, позволяющего произвести оценку эффективности формирования зоны вырожденной кавитации, окружающей газовый пузырёк (например, при барботажной абсорбции).

Анализ влияния частоты УЗ колебаний на интенсивность кавитационных процессов показал, что её увеличение в широком диапазоне свойств жидкости (от низких до повышенных значений вязкости и поверхностного натяжения) ведёт к уменьшению максимального радиуса кавитационного пузырька, а также снижает отношение максимального радиуса к минимальному при фиксированной амплитуде звукового давления [8]. Это, в свою очередь, уменьшает энергию, высвобождаемую при схлопывании пузырьков, а значит и удельную мощность ударных волн, что приводит к снижению общей эффективности кавитационного воздействия.

В то же время чрезмерное уменьшение частоты колебаний оказывает противоположный эффект: хотя амплитуда схлопывания возрастает, число ударных волн, формируемых в единицу времени, заметно сокращается, что также ограничивает интенсивность кавитации.

С повышением частоты ультразвукового воздействия выше 40 кГц по сравнению с 20 кГц происходит заметное уменьшение давления, развиваемого в пузырьке в момент его схлопывания. Одновременно возрастает пороговая амплитуда акустического давления, необходимая для инициирования кавитации. Совокупность этих факторов приводит к ослаблению ультразвукового воздействия, снижающему способность кавитации эффективно увеличивать межфазную поверхность пузырьков.

При дальнейшем увеличении частоты этот эффект лишь усиливается: например, уже при 100 кГц максимальное давление при коллапсе оказывается существенно ниже, чем при 20 кГц или 40 кГц, а с последующим ростом частоты происходит монотонное падение величины. Таким образом, определено [9], что кавитационные пузырьки совершают максимальную работу на частоте ~22 кГц, поэтому данную частоту УЗ озвучивания следует считать оптимальной для ультразвуковой обработки жидкостей и подходящей для расчётов распределения амплитуд звукового давления.

Распределение кавитационных зон в объёме зависит от распределения амплитуд звукового давления, которое, в свою очередь, связано с эквивалентными акустическими характеристиками кавитирующей среды.

Для выявления распределения амплитуд звукового давления и эквивалентных акустических характеристик кавитирующей среды использовано уравнение (1) [10], описывающее распространение акустического поля в

жидкости, содержащей кавитационные пузырьки, заполненные паром или газом.

$$\Delta p - \frac{1}{c_0^{\,2}} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где t – время, с; ρ_0 – плотность сплошной жидкой фазы, кг/м^3; p – мгновенное значение давления жидкости, Па; c_0 – скорость звука в сплошной жидкой фазе, м/с; δ – объёмное содержание пузырьков в текущий момент времени t.

Для решения уравнения использовалось разложение Фурье звукового давления и объёмного содержания кавитационных пузырьков (2–3).

$$\overline{p}(\mathbf{r},t) = \sum_{n=1}^{\infty} \overline{p_n}(\mathbf{r}) e^{-in\omega t}, \quad (2)$$

$$\overline{\delta}(\mathbf{r},t) = \sum_{n=1}^{\infty} \overline{\delta_n}(\mathbf{r}) e^{-in\omega t}, \quad (3)$$

где ω – круговая частота колебаний акустического излучателя в жидкой среде, с$^{-1}$; r – радиус-вектор точки жидкости, м.

В результате разложения Фурье уравнение сведено к уравнению Гельмгольца (4) для первой гармоники.

$$\Delta \overline{p_1} + \left(K_{**}\left(\left|\overline{p_1}\right|\right) + iK_*\left(\left|\overline{p_1}\right|\right)\right)^2 \overline{p_1} = 0, \quad (4)$$

где K_{**} – эффективное волновое число кавитирующей среды, м$^{-1}$; K_* – эффективный коэффициент поглощения в кавитирующей среде, м$^{-1}$.

Данное уравнение дополняется граничным условием на поверхности ультразвукового излучателя (5):

$$\frac{\partial \overline{p_1}}{\partial \mathbf{n}} = \rho \omega^2 A_n; \quad (5)$$

на твёрдой границе технологического объёма (6):

$$\overline{p_1} = 0; \quad (6)$$

на границе барботажного пузырька (7).

$$\frac{\partial \overline{p_1}}{\partial \mathbf{n}} = 0. \quad (7)$$

Следует отметить, что вдали от пузырька газа капиллярная волна практически не влияет на поле звукового давления. При этом вблизи пузырька капиллярная волна оказывает лишь незначительное влияние на звуковое давление – это объясняется тем, что давление фиксировано и равно нулю на границе пузыря, а также тем, что длина и амплитуда капиллярных волн невелики.

По этой причине обратное воздействие капиллярных волн на поле давления игнорируется и все расчёты выполняются так, как если бы воздушный пузырёк не был возмущён.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведённых расчётов выявлено, что барботажный пузырёк всегда локально нарушает поле давления и зону кавитации и непосредственно окружён зоной развитой кавитации, а не вырожденной.

Была получена визуализация распределения амплитуды звукового давления для пузырька, находящегося в зоне развитой кавитации (на удалении от УЗ излучателя 40 мм), представленная на рисунке 1.

Также получена визуализация распределения амплитуды звукового давления для пузырька, находящегося в зоне вырожденной кавитации (вблизи УЗ излучателя), представленная на рисунке 2. Границы между типами зон кавитации разделялись с использованием модели Гилмора для диапазона внешних давлений. На основе этих расчётов устанавливалось, приводит ли воздействие к его схлопыванию с последующим формированием ударной волны (режим развитой кавитации) либо же пузырёк сохраняет устойчивые колебания без разрушения (режим вырожденной кавитации).

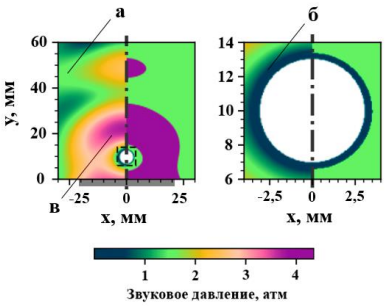


Рисунок 1 – Распределение амплитуды звукового давления (пузырь газа в зоне развитой кавитации)

Figure 1 – Distribution of the sound pressure amplitude (gas bubble in the zone of developed cavitation)

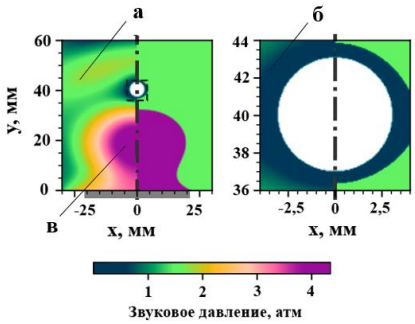


Рисунок 2 – Распределение амплитуды звукового давления (пузырь газа в зоне вырожденной кавитации)

Figure 2 – Distribution of the sound pressure amplitude (gas bubble in the zone of degenerate cavitation)

На основе значения уровня звукового давления можно выделить следующие зоны развития кавитации:

– зона развитой кавитации: при звуковом давлении от 0,50 до 2,27 атм – зона, где кавитационные пузыри схлопываются и генерируют ударные волны (область (а) на рисунках 1–2);

– зона отсутствия кавитации: при звуковом давлении ниже 0,50 атм – кавитационные пузырьки отсутствуют (область (б) на рисунках 1–2);

– зона вырожденной кавитации: при звуковом давлении выше 2,27 атм – зона, где кавитационные пузыри крупные, колеблются, но не схлопываются (область (в) на рисунках 1–2).

Из рисунков 1–2 видно, что в непосредственной близости к межфазной границе присутствует очень тонкий пристеночный слой, где кавитационных пузырей нет. Это объясняется градиентом звукового давления, вызванным условием нулевого нормального давления на стенке пузыря.

В результате ударные волны, создаваемые схлопыванием кавитационных пузырьков в близлежащей зоне локальной развитой кавитации, меньше затухают до достижения воздушного пузыря, если слой без кавитации тоньше (режим вырожденной кавитации), в отличие от ситуации, когда слой толще (режим развитой кавитации). Толщина этого слоя зависит от положения барботажного пузырька относительно УЗ излучателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты математического моделирования демонстрируют следующее: формирование зоны вырожденной кавитации приводит к уменьшению толщины слоя без кавитации у межфазной границы, что снижает затухание ударных волн и способствует увеличению межфазной поверхности «газ–жидкость».

Теоретически обоснована эффективность способа повышения скорости массопереноса газа в жидкости, основанного на формировании волн на поверхности стабильных

газовых пузырьков в жидкости при схлопывании кавитационных пузырьков, создаваемых ультразвуком в режиме вырожденной кавитации. Выполнена оценка режимов и условий, позволяющих достичь предельно возможное увеличение межфазной поверхности с помощью ультразвукового способа. Выполненная оценка показала, что необходимо воздействовать на частоте ультразвуковых колебаний, близкой к 22 кГц, поскольку при данной частоте совершается максимальная работа по расширению кавитационного пузырька, переходящего в схлопывание. При этом амплитуда звукового давления вблизи излучателя должна обеспечивать зону вырожденной кавитации и положение барботажного пузырька в зоне вырожденной кавитации обеспечивает максимальное увеличение межфазной поверхности.

Таким образом, результаты, полученные в данной работе, подтверждают перспективность данного подхода для интенсификации процессов газопоглощения и могут служить фундаментом для последующей разработки и модернизации энергоэффективных ультразвуковых абсорбционных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amin R., Islam A., Islam R., Islam S. Simulation of N_2 Gas Separation Process from Air // IOSR Journal of Applied Chemistry. 2014. Vol. 6, № 5. pp. 9–13.

2. Liang Y., Yang L., Liu S., Xu R., Jiang W., Wu P. Study on the process intensification of superaerophobic materials to improve CO_2 mass transfer efficiency // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2023. Vol. 183. p. 109213. doi: 10.1016/j.cep.2022.109213.

3. Новоселов А.Г., Дужий А.Б., Голикова Е.Ю. Молекулярная диффузия газов в жидкости. Коэффициенты молекулярной диффузии диоксида углерода в воде // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 2.

4. Калинина И.В., Фаткуллин Р.И. Применение эффектов ультразвукового кавитационного воздействия как фактора интенсификации извлечения функциональных ингредиентов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2016. Т. 4, № 1. С. 64–70.

5. Никонова А.С. Совершенствование процесса получения коптильной жидкости с применением ультразвука в целях интенсификации абсорбционных и коагуляционных процессов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2015. № 2. С. 90–97.

6. Hoo D.Y., Low Z.L., Low D.Y.S., Tang S.Y., Manickam S., Tan K.W., Ban Z.H. Ultrasonic cavitation: An effective cleaner and greener intensification technology in the extraction and surface modification of nanocellulose // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. Vol. 90. p. 106176. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.106176.

7. Yuan S., Li C., Zhang Y., Yu H., Xie Y., Guo Y., Yao W. Ultrasound as an emerging technology for the elimination of chemical contaminants in food: A review // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 109. pp. 374–385. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.048.

8. Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В., Жуйков А.В. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 9. С. 209–218. doi: 10.18799/24131830/2022/9/3623.

9. Brenner M.P., Hilgenfeldt S., Lohse D. Single-bubble sonoluminescence // Reviews of Modern Physics. 2002. Vol. 74. pp. 425–484.

10. Golykh R., Shalunov A., Khmelev V. [et al.]. Evaluation of optimum modes and conditions providing increasing ultrasonic cavitation area in high-viscous and non-Newtonian fluids // Romanian Journal of Acoustics and Vibration. 2020. № 2. pp. 101–108.

Информация об авторах

В. Н. Хмелёв – доктор технических наук, профессор кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» БТИ АлтГТУ.

А. Р. Барсуков – старший преподаватель кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» БТИ АлтГТУ.

Р. Н. Голых – доктор технических наук, профессор кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» БТИ АлтГТУ.

REFERENCES

1. Amin, R., Islam, A., Islam, R. & Islam, S. (2014). Simulation of N_2 gas separation process from air. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 6(5), 9-13.

2. Liang, Y., Yang, L., Liu, S., Xu, R., Jiang, W. & Wu, P. (2023). Study on the process intensification of superaerophobic materials to improve CO_2 mass transfer efficiency. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 183, 109213. doi: 10.1016/j.cep.2022.109213.

3. Novoselov, A.G., Duzhiy, A.B. & Golikova, E.Yu. (2014). Molecular diffusion of gases in liquids. Diffusion coefficients of carbon dioxide in water. *ITMO University Scientific Journal. Series "Food Production Processes and Equipment"*, (2). (In Russ.).

4. Kalinina, I.V. & Fatkullin, R.I. (2016). Application of ultrasonic cavitation effects as a factor of intensification in extracting functional ingredients. *Bulletin of South Ural State University. Series "Food and Biotechnology"*, 4(1), 64-70. (In Russ.).

5. Nikonova, A.S. (2015). Improvement of the smoke liquid production process using ultrasound to intensify absorption and coagulation processes. *ITMO University Scientific Journal. Series "Food Production Processes and Equipment"*, (2), 90-97. (In Russ.).

6. Hoo, D.Y., Low, Z.L., Low, D.Y.S., Tang, S.Y., Manickam, S., Tan, K.W. & Ban, Z.H. (2022). Ultrasonic cavitation: An effective cleaner and greener intensification technology in the extraction and surface modification of nanocellulose. *Ultrasonics Sonochemistry*, 90, 106176. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.106176.

7. Yuan, S., Li, C., Zhang, Y., Yu, H., Xie, Y., Guo, Y. & Yao, W. (2021). Ultrasound as an emerging technology for the elimination of chemical contaminants in food: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 374-385. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.048.

8. Radzyuk, A.Yu., Istyagina, E.B., Kulagina, L.V. & Zhuikov, A.V. (2022). Current state of the application of cavitation technologies (a brief review). *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 333(9), 209-218. (In Russ.). doi: 10.18799/24131830/2022/9/3623.

9. Brenner, M.P., Hilgenfeldt, S. & Lohse, D. (2002). Single-bubble sonoluminescence. *Reviews of Modern Physics*, 74, 425-484.

10. Golykh, R., Shalunov, A., Khmelev, V.Yu. & others. (2020). Evaluation of optimum modes and conditions providing increased ultrasonic cavitation area in high-viscous and non-Newtonian fluids. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, (2), 101-108.

Information about the authors

V.N. Khmelev - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the BTI (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.

A.R. Barsukov - Senior Lecturer of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the of the BTI (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.

R.N. Golykh - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the of the BTI (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 273–280.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 273–280.

Научная статья
2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 620.18, 620.181.4
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.039 EDN: HGMGRY

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НЕЛЕГИРОВАННОГО ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО ЧУГУНА МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Артём Михайлович Шишкин [1], Алексей Геннадьевич Панов [2], Дмитрий Андреевич Гуртовой [3], Надежда Георгиевна Дегтярёва [4]

[1, 2, 4] Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО КФУ, Набережные Челны, Россия
[2] ФГБОУ ВО «ЯГТУ», Ярославль, Россия
[1, 3] ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия
[1] zaretm@mail.ru
[2] panov.ag@mail.ru
[3] gurtovoyda@mail.ru
[4] dnadegda@list.ru

Аннотация. *В статье продемонстрированы результаты исследований в области термического анализа затвердевания доэвтектического нелегированного чугуна с различными типами микроструктур. Отмечена важность первичной кристаллизации как ключевого этапа в формировании микроструктуры будущей отливки. Приведены материалы, методы и оборудование, применяемые при реализации метода термического анализа в собственных экспериментах. Представлены параметры модели структурообразования, которая включает в себя перечень ключевых температурных точек фазовых превращений, теоретические показатели кристаллизации эвтектики и теоретические показатели качества чугунного расплава. Показаны микроструктуры 4-х образцов, исследованные при помощи метода световой микроскопии. Описаны закономерности поведения кривой охлаждения в зависимости от технологических особенностей изготовления образцов. Экспериментально доказано, что модели кристаллизации до- и околоэвтектических чугунов имеют различное поведение, связанное с отличиями в механизме их фазовых превращений при первичной кристаллизации. Сделаны выводы, согласно которых параметры моделей первичной кристаллизации могут быть использованы для прогноза процессов структурообразования при кристаллизации доэвтектического расплава.*

Ключевые слова: *доэвтектический чугун, нелегированный чугун, термический анализ, кривые охлаждения, микроструктура, модель структурообразования.*

Для цитирования: Шишкин А. М., Панов А. Г., Гуртовой Д. А., Дегтярёва Н. Г. Построение моделей структурообразования нелегированного доэвтектического чугуна методом термического анализа // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 273–280. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.039. EDN: https://elibrary.ru/HGMGRY

Original article

BUILDING MODELS OF STRUCTURE FORMATION OF UNALLOYED HYPOEUTECTIC CAST IRON USING THERMAL ANALYSIS

Artem M. Shishkin [1], Alexey G. Panov [2], Dmitry A. Gurtovoy [3], Nadezhda G. Degtyareva [4]

[1, 2, 4] Naberezhnye Chelny Institute (branch) K(P)FU, Naberezhnye Chelny, Russia
[2] FGBOU VO "YAGTU", Yaroslavl, Russia
[1, 3] KAMAZ PTC, Naberezhnye Chelny, Russia
[1] zaretm@mail.ru
[2] panov.ag@mail.ru
[3] gurtovoyda@mail.ru
[4] dnadegda@list.ru

Abstract. *The article presents the results of research in the field of thermal analysis of the solidification of hypoeutectic unalloyed cast iron with various types of microstructures. The importance of primary crystallisation as a key stage in the formation of the microstructure of the future casting is noted. It details the materials, methods, and equipment used in the implementation of the thermal analysis method in the authors' experiments. The parameters of the structural formation model are provided, which include a list of key temperature points of phase transformations, theoretical indicators of eutectic crystallisation, and theoretical quality indicators of the cast iron melt. Microstructures of four samples, investigated using light microscopy, are presented. The patterns of the cooling curve behaviour are described in relation to the technological features of sample production. It is experimentally demonstrated that the crystallisation models of*

© Шишкин А. М., Панов А. Г., Гуртовой Д. А., Дегтярёва Н. Г., 2026

both hypoeutectic and near-eutectic cast irons exhibit different behaviours associated with the differences in the mechanisms of their phase transformations during primary crystallisation. Conclusions are drawn indicating that the parameters of the primary crystallisation models can be used to predict the structural formation processes during the crystallisation of hypoeutectic melts.

Keywords: *hypoeutectic cast iron, unalloyed cast iron, thermal analysis, cooling curves, microstructure, structure formation model.*

For citation: Shishkin, A. M., Panov, A. G., Gurtovoy, D. A. & Degtyareva, N. G. (2026). Building models of structure formation of unalloyed hypoeutectic cast iron using thermal analysis. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 273-280. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.039. EDN: https: //elibrary.ru/HGMGRY.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на стремительное развитие новых машиностроительных материалов, чугун остается одним из наиболее востребованных сплавов благодаря сочетанию высокой прочности, износостойкости, демпфирующих свойств, низкой стоимости и хорошей обрабатываемости резанием. Механические, физические и эксплуатационные свойства чугуна напрямую зависят от его микроструктуры – соотношения феррита и перлита, наличия графита – его формы и распределения, а также присутствия цементита.

В условиях жесткой рыночной конкуренции производители отливок должны постоянно стремиться к улучшению качества своей продукции. В теории и практике контроля качества расплавов чугуна известен метод термического анализа (ТА). С помощью метода ТА можно создавать графические модели структурообразования отливок в области кристаллизации и последующего охлаждения путём записывания, анализа и вербального описания кривых охлаждения расплава, которые коррелируют с процессом зарождения, роста и трансформации твёрдых фаз [1].

Суть термического анализа заключается в том, что с помощью одной или нескольких термопар, вставляемых в литейную форму, измеряется и записывается зависимость температуры расплава от времени. Фиксация температуры расплава происходит несколько раз в секунду. Формой могут быть стандартные испытательные стаканчики, выполненные из формовочной песочной смеси, или металлические (рисунок 1).

Процесс формирования микроструктуры (структурообразование) чугунов является совокупностью сложных физико-химических явлений. Данный процесс можно разделить на два этапа: первичная и вторичная кристаллизация. При первичной кристаллизации доэвтектического чугуна из расплава формируются твердые фазы – первичные зерна аустенита (дендриты аустенита) и эвтектика (аустенитно-графитная или аустенитно-цементитная). При вторичной кристаллизации происходит так называемая «перекристаллизация», связанная с распадом аустенита на феррит и перлит, т.е. происходят структурные изменения уже имеющихся твердых фаз [2].

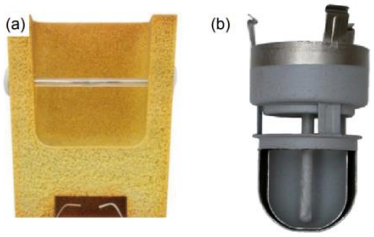


Рисунок 1 – Примеры испытательных стаканчиков для анализа кривых охлаждения: (a) стаканчик из смеси на песочной основе с одноразовой термопарой (Heraeus Electro-Nite); (b) стальной стаканчик (Sinter Cast AB) с двумя термопарами, помещёнными в защитную трубку [3]

Figure 1 – Examples of test cups for cooling curve analysis: (a) sand cup with disposable thermocouple (Heraeus Electro-Nite); (b) steel cup (Sinter Cast AB) with two thermocouples in the protective tube [3].

Авторы работы [4] приводят наглядную иллюстрацию кривой охлаждения с критическими точками фазовых превращений (рисунок 2). Для полноты картины добавим на данное изображение границы первичной (I) и вторичной (II) кристаллизации. Первичная кристаллизация ограничена линиями TL и TS, которые обозначают критические точки ликвидус и солидус соответственно, вторичная же кристаллизация ограничена линиями TS и PSK, где последняя обозначает критическую точку эвтектоидного превращения и завершение процесса перекристаллизации.

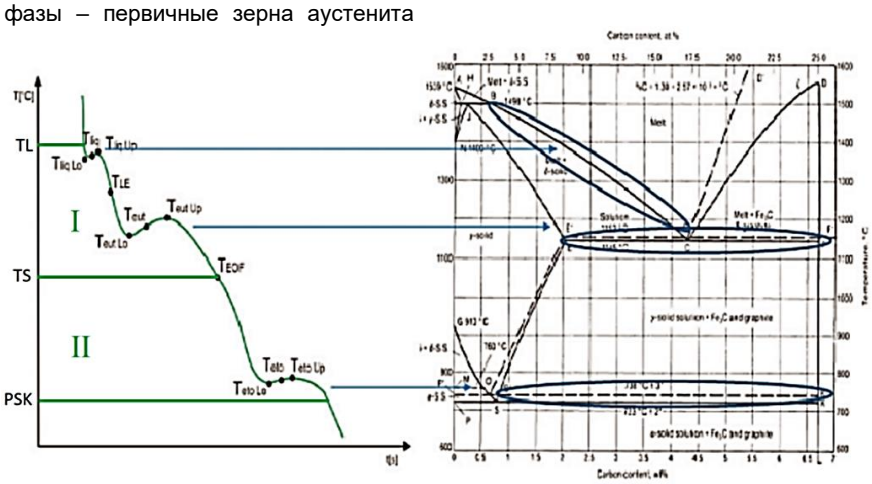


Рисунок 2 – Иллюстрация кривой охлаждения с критическими точками фазовых превращений [4]

Figure 2 – Illustration of a cooling curve with critical points of phase transformations [4]

Первичная кристаллизация чугуна является ключевым этапом формирования микроструктуры и зависит от многих технологических параметров: химического состава и строения расплава, скорости охлаждения, количества добавляемых модификаторов и др. Таким образом, первичная кристаллизация закладывает начальную структуру чугуна, которая определяет последующие фазовые превращения и механические свойства отливки. Понимание процесса первичной кристаллизации позволит управлять качеством расплава и принимать оперативные меры по устранению несоответствий микроструктуры.

Целью данной работы является получение графических моделей первичной кристаллизации доэвтектических чугунов с различными типами микроструктур путем проведения экспериментального исследования в производственных условиях.

МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Исследование проведено на производственных площадках ООО «Центр Цифровых Технологий» в городе Казань. Для проведения эксперимента применялось оборудование производства компании Heraeus Electro-Nite. На рисунке 3 приведена схема измерительной системы, состоящей:

- из кристаллизационного стаканчика;
- из стенда для установки кристаллизационного стаканчика с контактным блоком Quik-Cup;
- из компенсационного кабеля;
- из разъема для подключения кабеля к регистрирующему прибору;
- из регистрирующего прибора Quik-LabE.

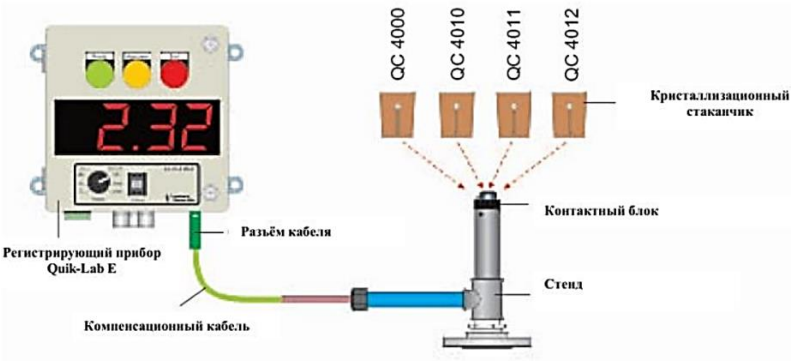


Рисунок 3 – Схема измерительной системы для проведения ТА [5]

Figure 3 – Diagram of the measuring system for TA conducting [5]

Измерительная система работает под управлением программы Melt Control, состоящей из нескольких регистрирующих приборов Quik-Lab E Win Process. В её состав также входит прибор Digitemp E Win Process для измерения температуры ванны и центральный компьютер, принимающий и обрабатывающий данные с регистрирующих приборов.

Кристаллизационный стаканчик – это инструмент термического анализа, при помощи которого происходит формирование литого образца определенных размерных характеристик. В нашем исследовании применяли стаканчики QC4000 Cover (рисунок 4).

Рисунок 4 – Кристаллизационный стаканчик QC4000 Cover [5]

Figure 4 – Crystallization cup QC4000 Cover [5]

Их отличительной особенностью является наличие «крышки», которая необходима для получения образца на анализ химического состава.

В качестве плавильного агрегата использовалась индукционная печь объемом 0,4 тонны с корундовой (нейтральной) футеровкой. Шихтовые материалы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Шихтовыематериалы

Table 1 – Charge materials

Наименование материала	Масса, кг
Чугун передельный ПЛ2-1-А-1 ГОСТ 805-95	143
Стальной лом и отходы 8А ГОСТ 2787-75	22
Возврат собственного производства (ВЧ, согласно СТП)	55
Медь	1,3

Резку образцов для исследования методом световой оптической микроскопии проводили в двух местах: вначале отрезали «крышку» для анализа химического состава, затем разрезали «слиток» на две равные части (по центру). Изображение образца с линиями резания приведено на рисунке 5.

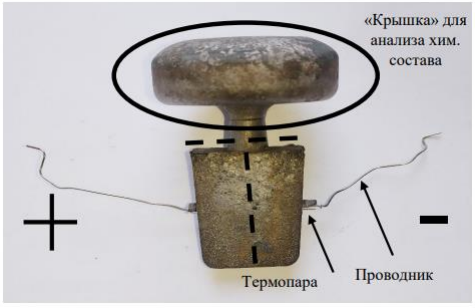


Рисунок 5 – Фото образца с обозначением линий резания (пунктирные линии)

Figure 5 – Photo of the sample with cutting lines indicated (dotted lines)

Рисунок 6 – Фото образцов

Figure 6 – Photo of the samples

Микроструктуру образцов исследовали после шлифовки и полировки в области термопары (рисунок 7).

Рисунок 7 – Фото образцов с указанием места исследования микроструктуры

Figure 7 – Photo of the samples with the location of the microstructure examination

Исследование микроструктуры проведено при помощи металлографического микроскопа Neophot-32 (рисунок 8).

Рисунок 8 – Фото металлографического микроскопа Neophot-32

Figure 8 – photo of the Neophot-32 metallographic microscope

Для получения образцов проведено 2 плавки. Первая цифра в обозначении образцов соответствует номеру плавки, вторая месту отбора – печь (1) или ковш (2). Описание технологических особенностей изготовления образцов:

- образец 1-1 – печной, без обработки;
- образец 1-2 – ковшевой, обработан ФС75 (0,3 %), Сферомаг 631 (1,8 %) и Сибар 4 (0,3 %);
- образец 2-1 – печной, обработан БСК-2 (0,3 %) с добавлением науглероживателя для корректировки химического состава расплава по углероду;
- образец 2-2 – ковшевой, обработан ФС75 (0,3 %), Сферомаг 631 (1,8 %) и Сибар 4 (0,3 %) с добавлением Р20 (0,3 %).

Для анализа химического состава образцов применялся оптический эмиссионный спектральный анализ (ОЭСА). Химический состав образцов приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав образцов / Table 2 – Chemical composition of the samples

Образец	C	Si	Mn	Cr	Cu	P	S	Mg
1-1	3,72	1,00	0,15	0,018	0,25	0,02	0,013	-
1-2	3,29	2,60	0,18	0,023	0,48	0,03	0,010	0,058
2-1	3,83	1,00	0,17	0,013	0,25	0,03	0,010	-
2-2	3,65	2,65	0,18	0,018	0,50	0,04	0,008	0,050

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенного эксперимента получены кривые охлаждения для каждого образца (рисунок 9).

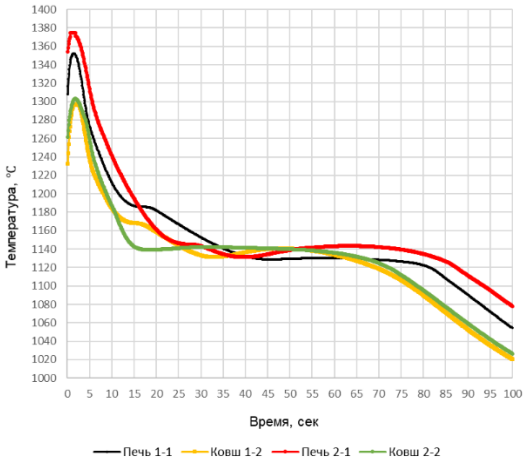


Рисунок 9 – Кривые охлаждения образцов

Figure 9 – Sample cooling curves

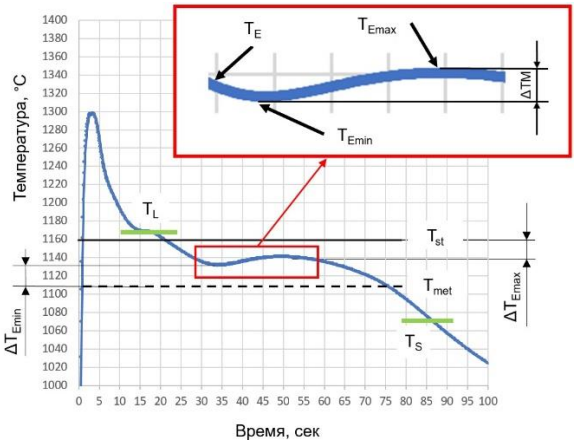


Рисунок 10 – Графическая иллюстрация ключевых температурных точек кривой охлаждения доэвтектического чугуна

Figure 10 – Graphical illustration of the key temperature points of the cooling curve of hypoeutectic cast iron

Исследование кривых охлаждения расплава заключается в анализе ключевых температурных точек

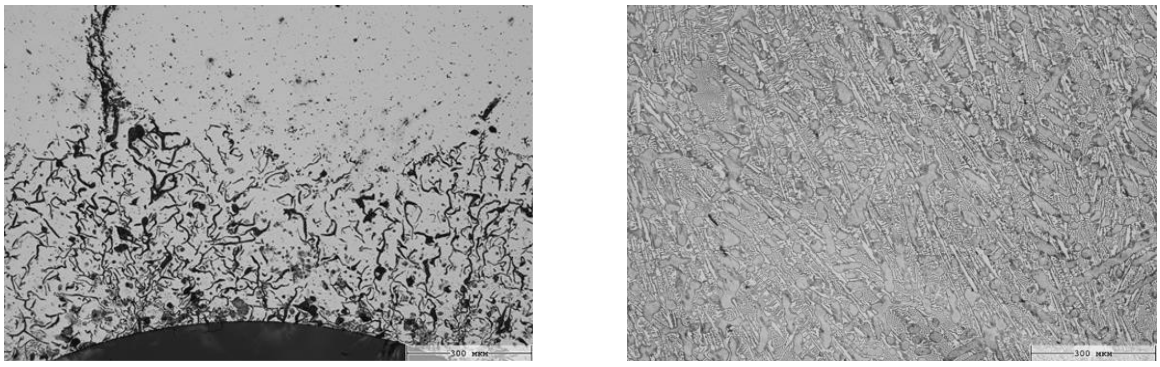
кривой охлаждения (точек перегиба и экстремумов графика), которые показывают начало и/или завершение процессов фазовых превращений. На основании ключевых температурных точек проводится расчет теоретических показателей качества чугунного расплава. На рисунке 10 приведена графическая иллюстрация ключевых температурных точек кривой охлаждения.

В таблице 3 приведен перечень ключевых температурных точек при первичной кристаллизации, полученных в результате эксперимента, а также рассчитанные на их основе теоретические показатели качества чугунного расплава. Теоретические показатели кристаллизации эвтектики рассчитаны по результатам анализа химического состава образцов. Показатели, приведенные ниже, в сочетании с графиками рисунка 9, можно рассматривать как элементы графической модели первичной кристаллизации до- и околоэвтектических чугунов. На рисунке 11 приведены фотографии микроструктуры образцов, сделанные в области термопары.

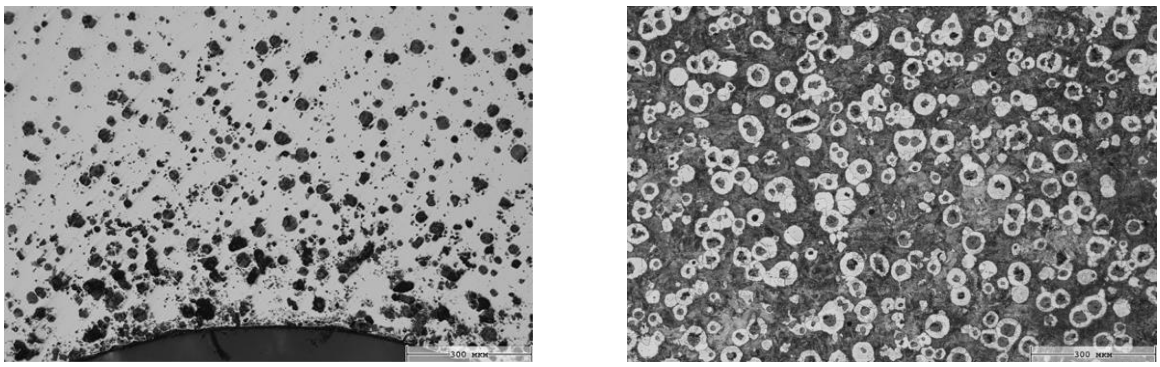
Таблица 3 – Перечень ключевых температурных точек фазовых превращений при первичной кристаллизации, теоретические показатели кристаллизации эвтектики и теоретические показатели качества чугунного расплава (элементы моделипервичной кристаллизации до- и околоэвтектических чугунов)

Table 3 – List of key temperature points of phase transformations during primary crystallization, theoretical indicators of eutectic crystallization, and theoretical indicators of the quality of cast iron melt (elements of the primary crystallization model of hypo- and near-eutectic cast irons)

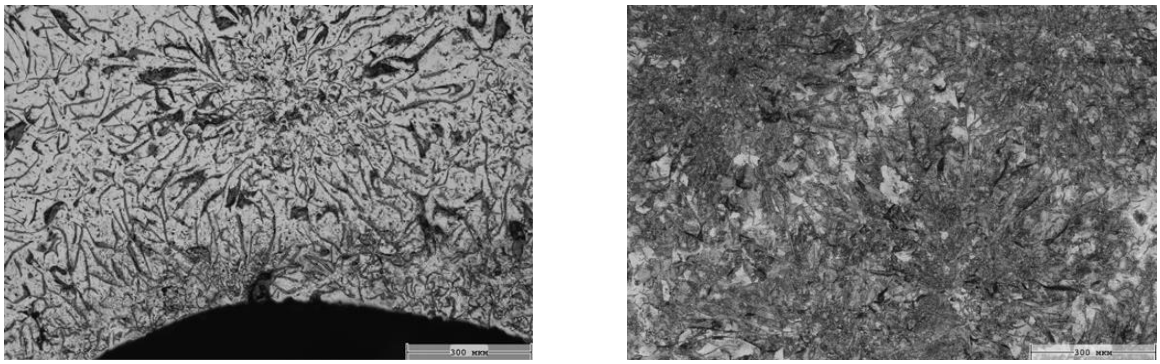
	Символ	Значения для образцов				Описание
		1-1	1-2	2-1	2-2	
Ключевые температурные точки кривой охлаждения, °С	T_L	1185,3	1168,3	1145,1	1139,1	Температура ликвидуса – температура, при которой в расплаве, вследствие его охлаждения, появляются либо первые кристаллы аустенита в доэвтектических чугунах, либо эвтектики в эвтектических чугунах
	T_E	1129,3	1135,2	1135,2	1141,1	Температура эвтектики – температура начала эвтектического превращения
	T_{Emin}	1128,5	1131,3	1131,4	1139,1	Температура переохлаждения эвтектики
	T_{Emax}	1129,8	1140,7	1143,3	1142,3	Максимальная эвтектическая температура, обусловленная выделением скрытой теплоты кристаллизации
	ΔTM	1,3	9,4	11,9	3,2	Значение рекалесценции – разница между T_{Emax} и T_{Emin}
	T_S	1072,8	1070,5	1089,1	1068,6	Температура солидуса – температура окончания процесса кристаллизации расплава
Теоретические показатели кристаллизации эвтектики	T_{st}	1152,8	1160,3	1153,7	1160,4	Теоретическая температура кристаллизации стабильной эвтектики, рассчитываемая по формуле: $T_{st} = 1149{,}1+4{,}7\%Si - 4\%Mn - 44\%P + 2{,}7\%Cu + \%Ni + 1{,}8\%Co + 13{,}9\%Al – 17{,}7\%Mo – 10{,}5\%Cr – 9{,}3\%Sn – 5{,}2\%Sb – 6{,}1\%W – 3{,}7\%Nb – 14{,}8\%V – 80{,}3\%B$
	T_{met}	1129,7	1110,4	1130,6	1109,4	Теоретическая температура кристаллизации метастабильной эвтектики, рассчитываемая по формуле: $T_{met} = 1142{,}6 – 11{,}6\%Si –0{,}75\%Mn –46{,}2\%P –1{,}4\%Cu – 1{,}1\%Ni– 0{,}7\%Co –1{,}8\%Al – 14{,}5\%Mo +5{,}9\%Cr – 6\%Sn – 5{,}1\%Sb – 2{,}8\%W +3{,}3\%V – 26\%B$
Теоретические показатели качества чугунного расплава	tg (α)	0,124	0,614	0,509	0,237	Тангенс угла наклона α касательной к участку рекалесценции, рассчитываемый по формуле: $\mathrm{tg}(\alpha) = \frac{T_{Emax} - T_{Emin}}{(t_{Emax} - t_{Emin})}$
	α, °	7,06	31,58	26,97	13,34	Угол наклона α касательной к участку рекалесценции, рассчитанный по формуле: $\alpha^\circ = arctg\big(tg(\alpha)\big) * \frac{180}{\pi}$
	CEL	3,90	4,01	4,26	4,27	Углеродный эквивалент, рассчитываемый по формулам: $CEL = 14{,}45 – 0{,}0089*T_L$ - для ЧПГ; $CEL = 14{,}45 – 0{,}0089*(T_L+5)$ - для ЧВГ и ЧШГ
	ΔT_{Emax}	23,0	19,6	10,4	18,1	Разница между теоретической температурой кристаллизации стабильной эвтектики и фактической максимальной эвтектической температурой, рассчитываемая по формуле: $\Delta T_{Emax} = T_{st} - T_{Emax}$
	ΔT_{Emin}	-1,22	20,9	0,8	29,7	Разница между фактической минимальной эвтектической температурой и теоретической температурой кристаллизации метастабильной эвтектики, рассчитываемая по формуле: $\Delta T_{Emin} = T_{Emin} - T_{met}$



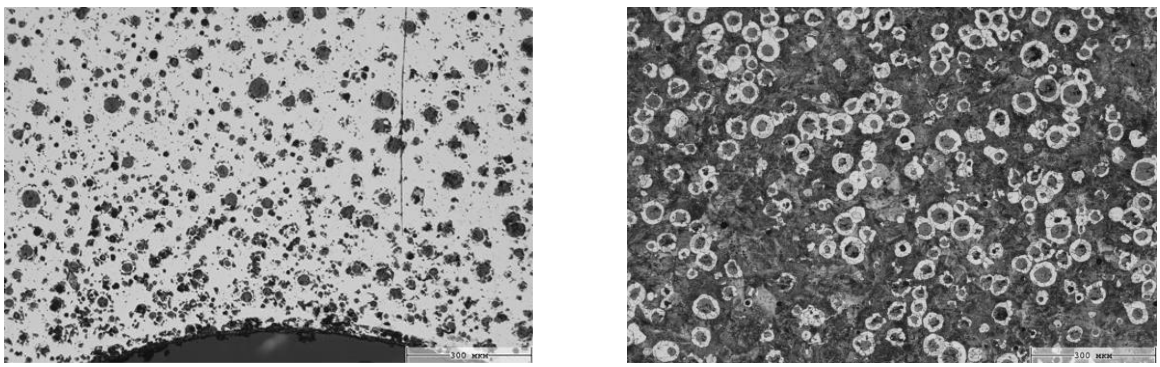
Печной образец 1-1 (без обработки): слева – не травлено х100; справа – травлено х100



Ковшевой образец 1-2 (обработан ФС75 (0,3 %), Сферомаг 631 (1,8 %) и Сибар 4 (0,3 %)):
слева – не травлено х100; справа – травлено х100



Печной образец 2-1 (обработан БСК-2 (0,3%) с добавлением науглероживателя):
слева – не травлено х100; справа – травлено х100



Ковшевой образец 2-2 (обработан ФС75 (0,3 %), Сферомаг 631 (1,8 %) и Сибар 4 (0,3 %) с добавлением Р20 (0,3 %)):
слева – не травлено х100; справа – травлено х100

Рисунок 11 – Фотографии микроструктуры образцов в области термопары

Figure 11 – Photos of the microstructure of samples in the thermocouple area

Образец 1-1, полученный из первого печного расплава, имеет наименьшее значение рекалесценции ΔТМ (1,3 ºС) и угол наклона α (7,06°) касательной к участку рекалесценции. Наряду с этим наблюдается переохлаждение эвтектики ниже теоретической температуры кристаллизации метастабильной эвтектики ΔT_{Emin} (-1,22 ºС), и большая разница между теоретической температурой кристаллизации стабильной эвтектики и фактической максимальной эвтектической температурой ΔT_{Emax} (23,0 ºС). Микроструктура образца представляет собой преимущественно аустенитно-цементитную эвтектику с первичным аустенитом, а вокруг термопары дополнительно с тонкопластинчатым графитом в виде каймы (порядка 0,4 мм).

Образец 1-2 представляет собой чугун из расплава образца 1-1, обработанного графитизирующим и сфероидизирующим модификатором. Значения рекалесценции ΔТМ (9,4 ºС) и угла наклона α (31,58°) касательной к участку рекалесценции увеличились. Значение разницы переохлаждения эвтектики оказалось существенно выше печного образца ΔT_{Emin} (20,9 ºС), показатель ΔT_{Emax} (19,6 ºС) уменьшился. Микроструктура образца состоит из перлитно-ферритной металлической основы и графита шаровидной формы (ШГф5,4 ШГд25, ШГр1, ШГ10).

Образец 2-1 из печного расплава 2 в сравнении с печным аналогом 1-1 имеет большее значение рекалесценции ΔТМ (11,9 ºС) и угол наклона α (26,97º) касательной к участку рекалесценции. Значение разницы переохлаждения эвтектики незначительно больше - ΔT_{Emin} (0,8 ºС), однако имеет положительное значение. Показатель ΔT_{Emax} (10,4 ºС) значительно уменьшился. Микроструктура образца состоит из металлической основы в виде перлита, розеточных колоний пластинчатого графита и незначительного количества участков ледебурита.

Кривая охлаждения образца 2-2, полученного из расплава образца 2-1, обработанного графитизирующим и сфероидизирующим модификатором, аналогично образцу 1-2, но с дополнительной обработкой гомогенизирующим модификатором, в отличие от остальных, не имеет четко выраженной температурной площадки T_L, что в совокупности с углеродным эквивалентом CEL=4,27 говорит нам об околоэвтектическом составе данного образца. Вместе с тем, микроструктура образца 2-2 схожа с микроструктурой образца 1-2 и аналогично последней состоит из перлитно-ферритной металлической основы и графита шаровидной формы (ШГф5,4 ШГд25, ШГр1, ШГ10). Несмотря на схожесть микроструктур и теоретических показателей кристаллизации эвтектики (хим. состава), отличия заключаются в ключевых температурных точках кривой охлаждения и теоретических показателях качества чугунного расплава.

ОБСУЖДЕНИЕ

При построении модели структурообразования нужно учитывать тот факт, что термический анализ дает различные результаты для до- и околоэвтектических чугунов. Это связано с тем, что с увеличением значения CEL, температурная площадка ликвидус T_L приближается к значению температуры кристаллизации эвтектики T_E и при околоэвтектическом составе (CEL≈4,3) практически совпадает с ней, либо вовсе отсутствует. Таким образом происходит «наложение» двух ключевых температурных точек кривой охлаждения, что отражается на записи остальных ключевых точек и теоретических показателях качества чугунного расплава.

Наглядный пример «наложения» двух ключевых температурных точек при кристаллизации околоэвтектического чугуна можем наблюдать на образце 2-2 – температурная точка T_E находится выше T_L, при этом последняя имеет одинаковое значение 1139,1 ºС с температурой T_{Emin}. Это явление может быть связано с особенностью программного обеспечения, при которой авторы не учли возможность «отсутствия» точки T_L при анализе околоэвтектических чугунов.

Различие в показаниях термоанализа между до- и околоэвтектическим чугуном также можно объяснить механизмами фазовых превращений, происходящих при кристаллизации.

Известно, что ведущей фазой при кристаллизации доэвтектического чугуна является аустенит (рисунок 12). По достижении расплавом температуры T_L, начинается процесс кристаллизации аустенита, который сопровождается ростом дендритов от стенок стаканчика (вовнутрь, зона 1). Процесс кристаллизации продолжается до достижения расплавом температуры начала кристаллизации эвтектики T_E. В доэвтектическом чугуне сразу же после начала кристаллизации эвтектики дендриты аустенита продолжают оказывать доминирующее воздействие на процесс роста, поскольку количество образующейся эвтектики со временем увеличивается медленно (зона 2). После достижения максимального переохлаждения (T_{Emin}) увеличивающееся количество образующейся эвтектики вызывает смещение кристаллизации из зон 1 и 2, где преобладают дендриты аустенита, в зоны 3 и 4, где преобладает графит.

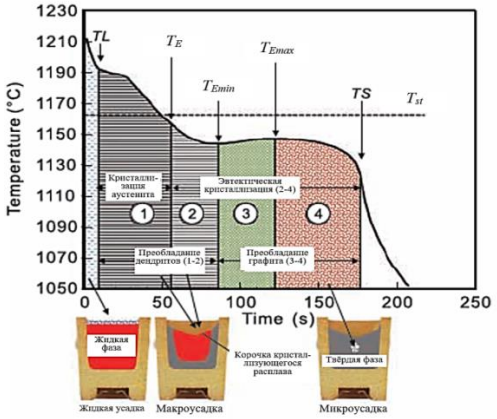


Рисунок 12 – Кривая охлаждения доэвтектического чугуна с характерными температурами, показывающими диапазоны кристаллизации [3]

Figure 12 – Cooling curve of hypoeutectic cast iron with characteristic temperatures showing the crystallization ranges [3]

В околоэвтектических чугунах процесс кристаллизации начинается в температурной точке T_E (зона 2) – эвтектика является ведущей структурной составляющей. Разницу в значении рекалесценции ΔТМ, а следовательно, и других показателей между образцами 1-2 и 2-2, можно объяснить отсутствием затрат свободной энергии в последнем на конкурирующий рост эвтектики с дендритами аустенита.

Таким образом, можно сделать **первый** вывод – модели кристаллизации до- и околоэвтектических чугунов иллюстрируют различное поведение, связанное с отличиями в механизме их фазовых превращений при первичной кристаллизации.

Полученные данные также показывают, что переохлаждение расплава ниже теоретической температуры кристаллизации метастабильной эвтектики T_{met}, даже на -1,22 ºС в образце 1-1, с очень близкими значениями температур эвтектики и максимальной температуры эвтектики, что соответствует минимальному углу наклона α, приводит к практически полному отбеливанию микроструктуры (помимо графитовой каймы вокруг термопары).

В то же время в печном образце 2-1, в котором фактическое переохлаждение так же близко к теоретической температуре кристаллизации стабильной эвтектики, отличается лишь на 0,8 ºС, но в более высокую сторону и сочетается с более высокими ΔT_{Emin} и α, цементит в структуре почти отсутствует.

Можно сделать **второй** вывод о том, что показатель ΔT_{Emin} может быть использован как показатель степени риска формирования метастабильной эвтектики (ледебурита) в структуре при кристаллизации расплава.

Сравнивая значения параметров ΔТМ и угла наклона α для печных образцов, можно увидеть, что в образце 2-1 оба показателя увеличили свои значения в связи с ростом степени графитизации. Показатель ΔT_{Emax} уменьшился, что означает сближение фактической температуры кристаллизации стабильной эвтектики с теоретической. Наличие ледебурита в микроструктуре образца 2-1 также можно объяснить разницей фактической и теоретической эвтектических температур на 10,4 ºС.

Таким образом, можно сделать **третий** вывод, что показатели ΔТМ, угол наклона α и ΔT_{Emax} могут служить индикаторами степени графитизации расплава – при увеличении ΔТМ и угла наклона α и уменьшении ΔT_{Emax} степень графитизации в образце 2-1 увеличилась.

Ковшевой образец 1-2 имеет отличающиеся от печных образцов параметры. В сравнении с ними можем наблюдать значительное снижение теоретической температуры кристаллизации метастабильной эвтектики T_{met} (примерно на 20 ºС) за счет высокого содержания кремния (см. формулу расчета T_{met} в таблице 3). Значение параметра ΔT_{Emin} составляет 20,9 ºС, что, согласно **второму** выводу, говорит о существенном снижении риска отбела расплава. Показатели ΔТМ и угол наклона α увеличились, но также увеличился показатель ΔT_{Emax}. Однако увеличение последнего не привело к образованию ледебурита, как в образце 1-1, что противоречит **третьему** выводу. Данное противоречие может быть вызвано различиями между образцами, заключающемся в форме графита и механизму его образования в целом.

Задачей будущих исследований является получение статистических данных о моделях кристаллизации чугунных расплавов с различными типами микроструктур, а также поиск закономерностей их изменения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье представлены графические модели кристаллизации чугунных образцов, полученных из расплавов с различным химическим составом, структурным состоянием и формами графита.

1. Показано, что модели структурообразования для до- и околоэвтектических чугунов ведут себя по-разному в связи с различиями в механизме фазовых превращений.

Сделаны выводы, согласно которых элементы моделей первичной кристаллизации могут быть использованы для прогноза процессов структурообразования при затвердевании доэвтектического расплава:

2. Показатель ΔT_{Emin} может быть использован как показатель степени риска формирования метастабильной эвтектики (ледебурита) в структуре при кристаллизации расплава.

3. Показатели ΔТМ, угол наклона α и ΔT_{Emax} могут служить индикаторами степени графитизации расплава, однако требуется сбор дополнительных статистических данных для устранения выявленных в эксперименте противоречий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология стабильного получения вермикулярного графита в отливках массового производства / С. Доусон [и др.] // Литейное производство. 2018. № 4. С. 7–12.

2. Гиршович Н.Г. Чугунное литье : учеб. пособие для металлург. специальностей высш. учеб. заведений : Москва, Ленинград : Металлургиздата, 1949. 708 с.

3. Stefanescu D.M., Suarez R., Kim S.B. 90 years of thermal analysis as a control tool in the melting of cast iron // China Foundry. 2020. 17(2). P. 69–84. doi: 10.1007/s41230-020-0039-x.

4. Термический анализ как средство контроля процесса получения ЧВГ / А.А. Токарев [и др.] // Литейщик России. 2021. № 5. С. 19–25.

5. Heraeus Electro-Nite официальный сайт. Челябинск. URL : https://www.heraeus-electro-nite.com. (дата обращения: 27.10.2025).

Информация об авторах

А. М. Шишкин – аспирант 2 года обучения кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО КФУ.

А. Г. Панов – доктор технических наук, профессор кафедры технологий материалов, стандартизации и метрологии ФГБОУ ВО ЯГТУ, профессор кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО КФУ.

Д. А. Гуртовой – кандидат технических наук, консультант первого заместителя генерального директора – исполнительного директора ПАО КАМАЗ.

Н. Г. Дегтярёва – старший преподаватель кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО КФУ.

REFERENCES

1. Dawson, S., Panov, A.G., Gurtovoy, D.A. & Anikin, S.A. (2018). *Technology of stable production of vermicular graphite in castings of mass production*. Foundry production, (5), 7-12. (In Russ.).

2. Girshovich, N.G. (1949). *Cast iron casting: Training manual.* Moscow, St. Petersburg : Metallurgizdat. (In Russ.).

3. Stefanescu, D.M., Suarez, R. & Kim, S.B. (2020). 90 years of thermal analysis as a control tool in the melting of cast iron. *China Foundry, 17(2), 69-84.* doi: 10.1007/s41230-020-0039-x.

4. Tokarev, A.A., Bakin, I.V., Barkhatov, A.V., Boldyrev, D.A. & Kulakov, B.A. (2021). *Thermal analysis as a means of controlling the production process of CGI.* Foundrymen of Russia, (5), 19-25. (In Russ.).

5. *Sait the company "Heraeus Electro-Nite". Retrieved from* https://www.heraeus-electro-nite.com. (In Russ.).

Information about the authors

A.M. Shishkin - is a 2nd year postgraduate student at the "Department of Materials, Technologies, and Quality" at the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University.

A.G. Panov - Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of "Materials Technology, Standardization, and Metrology" at the Yaroslavl State Technical University, and Professor at the Department of "Materials, Technology, and Quality" at the Naberezhnye Chelny Institute (Branch) of the Kazan Federal University.

D.A. Gurtovoy - Candidate of Technical Sciences and a consultant to the First Deputy General Director and Executive Director of KAMAZ PTC.

N.G. Degtyareva- Senior Lecturer at the Department of "Materials, Technologies, and Quality" at the Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan Federal University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 281–284.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 281–284.

Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 679.826:621.892
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.040 EDN: PIPQKX

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАСЛЯНОЙ НАНОАЛМАЗНОЙ ПРИСАДКИ НА РАБОТУ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

Андрей Ефимович Буров [1], Алексей Петрович Пузырь [2]

[1] Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия, aeburov@ict.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0002-4360-0335
[2] Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия, apuzyr@mail.ru

Аннотация. *Эксплуатационные характеристики машин и механизмов, имеющих узлы трения, напрямую зависят от используемых смазочных материалов, поэтому улучшение их трибологических свойств является актуальной задачей. Наноалмазы детонационного синтеза являются одним из перспективных материалов для присадок в смазочные композиции из-за уникальных механических, физических и химических свойств. В данной работе приводятся результаты длительных натурных испытаний двух одинаковых воздушных компрессоров поршневого типа максимальной мощностью 3.6 кВт и рабочим давлением до 10 бар с использованием смазочного масла, содержащего и не содержащего присадку на основе модифицированных наноалмазов детонационного синтеза. Исследования проводились при комнатной температуре на стенде, оборудованном устройствами для автоматического задания цикла нагружения и регистрации потребляемой электроэнергии, температуры масла и времени, необходимого для достижения заданного уровня давления. Компрессоры непрерывно функционировали при идентичном режиме циклической эксплуатации в течение 576 часов. Полученные результаты свидетельствуют, что добавление 0,01 мас.% модифицированных детонационных наноалмазов в смазочное масло ведет к улучшению эксплуатационных характеристик компрессора, уменьшая потребляемую мощность и время, необходимое для достижения заданного уровня давления, а также снижая рабочую температуру масла.*

Ключевые слова: *детонационные наноалмазы, присадка к маслам, поршневой компрессор, натурные испытания, эксплуатационные характеристики.*
Благодарности: *Авторы благодарны г. Чанг Ку Ри за возможность проведения экспериментов.*

Для цитирования: Буров А. Е., Пузырь А. П. Исследование влияния масляной наноалмазной присадки на работу поршневого компрессора // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 281–284. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.040. EDN: https://elibrary.ru/PIPQKX.

Original article

STUDY OF INFLUENCE OF NANODIAMOND OIL ADDITIVE ON OPERATION OF A PISTON COMPRESSOR

Andrey E. Burov [1], Alexey P. Puzyr [2]

[1] Federal Research Centre for Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia, aeburov@ict.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0002-4360-0335
[2] Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia, apuzyr@mail.ru

Abstract. *The performance of machines and mechanisms with friction units directly depend on lubricants used, so improving their tribological properties is an important problem. Detonation nanodiamonds are a promising nanomaterial for lubricant additives due to their unique mechanical, physical, and chemical properties. This paper presents the results of long-term full-scale tests of two identical piston air-compressors with a maximum power of 3.6 kW and an operating pressure of up to 10 bar, using lubricating oil with and without an additive based on modified nanodiamonds. The compressors continuously operated under identical cyclic operation conditions for 576 hours. The studies were conducted at room temperature on a rig equipped with devices for automatically setting the loading cycle and recording the energy consumption, oil temperature, and the time required to reach the specified pressure level. The obtained results indicate that the addition of 0.01 wt% modified detonation nanodiamonds to the lubricating oil leads to an improvement in the performance characteristics of the compressor, reducing the power consumption and the time required to reach a given pressure level, as well as lowering the operating temperature of the oil.*

Keywords: *Detonation nanodiamonds, oil additive, piston type compressor, full-scale test, performance characteristics.*
Acknowledgements: *The authors are grateful to Mr. Chang Ku Rhee for the opportunity to conduct the experiments.*

For citation: Burov, A. E., Puzyr, A. P. (2026). Study of influence of nanodiamond oil additive on operation of a piston compressor. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 281-284. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.040. EDN: https: //elibrary.ru/PIPQKX.

ВВЕДЕНИЕ

Трение и износ являются основными причинами энергетических потерь и отказов контактирующих элементов узлов механических систем. Анализ, выполненный в работе [1], показывает, что внедрение новых смазочных материалов и технологий может

© Буров А. Е., Пузырь А. П., 2026

потенциально снизить затраты энергии, потребляемой на преодоление трения и износа, на 40 %.

Включение функциональных присадок в масла является одним из эффективных способов улучшения их трибологических характеристик. Как правило, такие присадки содержат фосфор (P), серу (S), хлор (Cl) и другие активные группы, которые адсорбируясь на поверхности трения или вступая в реакцию с металлической поверхностью, образуют пленки, обладающие противоизносными и антифрикционными свойствами. Однако присутствие соединений, включающих P, S и Cl будет вызывать коррозию деталей и загрязнение окружающей среды [2]. Существование этих проблем обуславливает проведение исследований по разработке экологически чистых присадок к смазочным композициям и изучение их влияния на работоспособность машин и механизмов.

Помимо других технических приложений, наноалмазы детонационного синтеза (НА) являются одним из перспективных наноматериалов для присадок для смазочных композиций из-за уникальных механических, физических и химических свойств, таких как высокая теплопроводность, удельная поверхность, химическая стабильность, легкая функционализация поверхности и нетоксичность [3–5]. Кроме того, за счет малого размера частицы НА лучше внедряются в неровности трущихся поверхностей, чем более крупные частицы пакета присадок. При условии их равномерного распределения в масле, большое количество частиц будет находиться в объеме даже при относительно невысоких концентрациях. Использование НА в качестве добавок показало улучшение антифрикционных, противозадирных и противоизносных свойств, а также более высокую несущую способность смазочных материалов, не снижая при этом их термоокислительную стабильность и сопротивление воздействию коррозии [6–11].

Было предложено несколько гипотез, объясняющих влияние НА на снижение износа и трения: формирование поверхностной защитной пленки с повышенной несущей и теплообменной способностью; внедрение наночастиц в поверхности трения, приводящее к их упрочнению; действие в качестве наноподшипников качения между контактирующими поверхностями; ингибирование окисления смазочных материалов при высоких температурах; эффект полировки шероховатостей [6, 8]. Привлекательной особенностью смазочных композиций на основе наноалмазов является тот факт, что для обеспечения улучшенных трибологических свойств требуется относительно небольшое количество наночастиц (0,01–0,4 мас.%) [11, 12].

Улучшение трибологических характеристик масел в результате введения НА было продемонстрировано в стандартных лабораторных исследованиях при относительно небольшом времени тестирования и ограниченном числе регистрируемых параметром. Поэтому вопрос смазочной эффективности масел с НА в натурных экспериментах на реальных технических устройствах остается открытым [13]. Например, формирования устойчивого трибослоя на трущихся поверхностях, которое относят к одной из причин улучшения свойств смазочных материалов с НА, вряд ли возможно за короткий временной отрезок испытаний.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование эксплуатационных характеристик воздушного поршневого компрессора при использовании масла, содержащего и не содержащего модифицированные наноалмазы.

МЕТОДЫ

В работе использовался порошок коммерческих наноалмазов детонационного синтеза (ООО «Реал-Дзержинск», Россия), модифицированный по технологии, которая подробно описана в работе [14], для получения материала, обладающего высокой коллоидной стабильностью и малым содержанием примесей. После процедуры модифицирования водную суспензию НА с помощью центрифугирования разделяли на несколько фракций различной дисперсности и затем высушивали. Для экспериментов применяли фракцию со средним размером частиц 70,0 нм и индексом полидисперсности 0,21, значения которых были определены методом динамического светорассеяния. Масляную суспензию (присадку) с содержанием 1 мас.% НА получали постепенным добавлением 0,45 г порошка к 50 мл масла. Однородному диспергированию НА способствовали обработкой ультразвуком с помощью аппарата серии «Волна» (U-Sonic, Россия). Затем присадку постепенно разбавляли коммерческим синтетическим маслом класса ISO VG 100 (базовое масло) до получения 0,01 мас. % НА. Ранее [12] было показано, что данная концентрация НА в моторных маслах является оптимальной с точки зрения их противоизносных свойств.

Для проведения натурных испытаний были приобретены от одного производителя два новых идентичных воздушных компрессора поршневого типа максимальной мощностью 3.6 кВт и рабочим давлением до 10 бар. Исследования проводились при комнатной температуре на стенде, оборудованном устройствами для автоматического задания цикла нагружения и регистрации потребляемой электроэнергии, температуры масла и времени, необходимого для достижения заданного уровня давления. Указанные параметры, которые являются эксплуатационными характеристиками и представляют собой интегральную совокупность различных свойств, в комплексе определяющих работоспособность и функциональность объекта. Поэтому их использование, по нашему мнению, дает более полное представление и количественные показатели для оценки эффективности присадок по сравнению с лабораторными исследованиями. Параметры фиксировались трижды в день, их средние значения приведены ниже.

Первоначально резервуары для смазки обоих машин были заполнены базовым маслом (200 мл), после чего для осуществления приработки компрессоры эксплуатировали в течение суток по циклу – 1 мин. работы при давлении 2.5 бар с последующим сбросом давления и 5 мин. охлаждением. После этапа приработки масло было удалено и заменено на свежее базовое масло в одном из компрессоров. В масляный бак другого компрессора было залито масло, содержащее НА. В дальнейшем машины эксплуатировались в следующем режиме: увеличение давление до 7 бар – выдержка 1 мин. – сброс давления и охлаждение в течение 5 мин. Суммарное время испытаний машин после смены масла составило 576 часов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Благодаря высокой поверхностной энергии частицы НА склонны к агломерации, образуя кластеры микронных размеров [3]. Плохие дисперсия и седиментационная устойчивость в смазочных средах являются основной проблемой, ограничивающей применение НА в качестве присадок и требующая использование различных стабилизирующих агентов [2,

9]. Проблема менее выражена в лабораторных исследованиях, поскольку трибологические тесты, как правило, являются непрерывными и непродолжительными, но может иметь первостепенное значение в реальных условиях эксплуатации узлов трения.

Модификация позволяет вводить в масла НА в количестве до 8–10 масс.% без применения дополнительных мер стабилизации. Для проверки седиментационной стабильности частиц образцы полученной масляной суспензии модифицированных НА выдерживали более трех месяцев перед испытанием. В течение всего срока хранения не отмечалось образование осадка частиц, которое сопровождается «просветлением» суспензии в верхних слоях (рисунок 1, *а*), как это хорошо проявляется для суспензии, содержащей немодифицированные НА, при значительно меньшем времени хранения (рисунок 1, *б*).

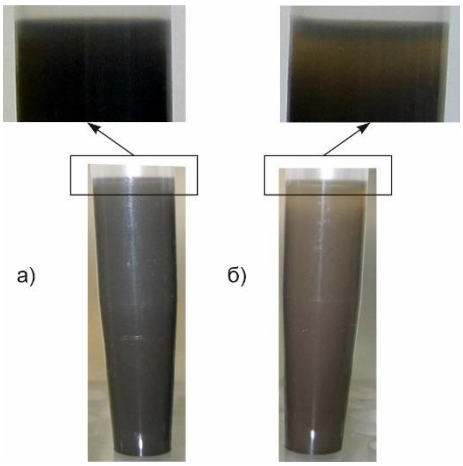


Рисунок 1 – Масляная суспензия 1 масс.% НА:
а) модифицированных после трех месяцев хранения,
б) исходных после недели хранения

Figure 1 – Oil suspension of 1 wt.%:a) modified after three months storage, b) original NA after week storage

Высокая коллоидная устойчивость НА сохраняется и при внесении присадки в масло. Это позволяет сохранить постоянную концентрацию частиц в объеме масла во время простоя и избежать ускоренного износа поверхностей трения вследствие образования областей высоких локальных концентраций, а также снижения трибологических характеристик масла из-за образования зон с пониженным содержанием НА.

Использование присадки, содержащей НА, показало ее положительный эффект на все параметры работы компрессоров, регистрируемые в испытаниях. В результате ее введения в смазочное масло существенно сократилось время, необходимое для достижения уровня рабочего давления 6 и 7 бар в среднем на 7 и 10%, соответственно (рисунок 2). Следует отметить общую тенденцию снижения значений этого показателя со временем эксплуатации, которая, очевидно, обусловлена приработкой контактирующих поверхностей двигателя.

Об улучшении фрикционных свойств масла за счет добавления НА говорит сравнение температуры смазывающей композиции при эксплуатации машин. Представленные на рисунке 3 данные, регистрируемые после работы компрессоров в течение 1 мин. при 7 давлении бар, свидетельствуют о более низкой температуре рабочего масла с НА, по сравнению с температурой базового масла (в среднем на 8 %).

Резкое повышение температуры масел (точки графика при 120 и 192 ч. работы) можно объяснить аварийным отключением системы кондиционирования помещения, в котором проводились испытания.

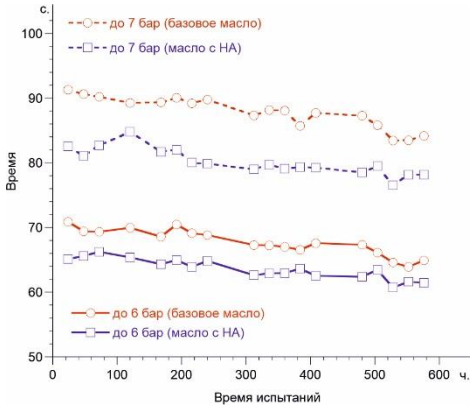


Рисунок 2 – Время работы компрессоров, необходимое для достижения заданного уровня давления

Figure 2 – The operating time of compressors required to achieve a given pressure level

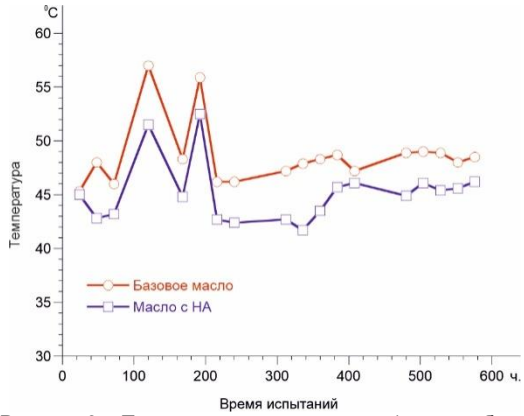


Рисунок 3 – Температура масла после 1 мин. работы компрессоров при давлении 7 бар

Figure 3 – The oil temperature after operating 1 min at 7 bar pressure

Потребляемая мощность является основной характеристикой энергозатратности работы машин и служит основным интегральным показателем эффективности присадки с НА. Динамика потребляемой мощности электродвигателей компрессоров представлена на рисунке 4.

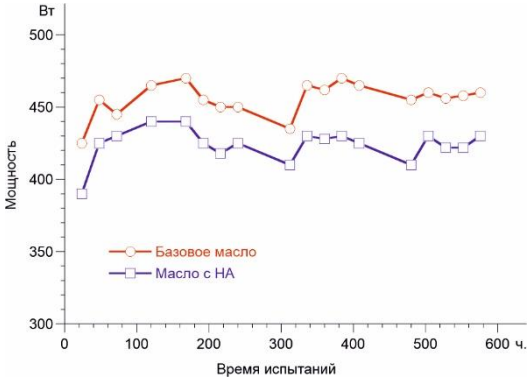


Рисунок 4 – Потребляемая мощность электродвигателей компрессоров

Figure 4 – Power consumption of compressor electric motors

На всем протяжении испытаний потребляемая мощность электродвигателя компрессора с НА была ниже его аналога без использования НА присадки на 7–11 %. Суммарная экономия энергии за счет использования НА за все время эксплуатации машин составила 18.4 кВт·ч (8 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показали, что добавление 0,01 мас.% модифицированных детонационных наноалмазов в смазочное масло ведет к улучшению эксплуатационных характеристик компрессора, уменьшая потребляемую мощность (на 8 %) и время, необходимое для достижения заданного уровня давления (до 10 %), а также снижая рабочую температуру масла (на 8 %).

Проведение длительных натурных испытаний машин и механизмов с использованием смазочных материалов, содержащих и не содержащих наноалмазные присадки, дает более полное представление и количественные показатели для оценки эффективности присадок по сравнению с лабораторными исследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holmberg K., Erdemir A. The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars // Tribology international. 2019. Vol. 135. P. 389–396. doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.024.

2. Characterization and tribology performance of polyaniline-coated nanodiamond lubricant additives / Huang R. [et al.] // Nanotechnology Reviews. 2022. V. 11. P. 2190–2201. doi: 10.1515/ntrev-2022-0135.

3. Новиковский Е.А., Ананьева Е.С. Экспериментальное исследование зависимости физико-механических характеристик модифицированных эпоксидных композиций от степени их наполнения углеродными ультрадисперсными частицами // Ползуновский вестник. 2016. № 3. С. 177–181.

4. Kausar A. Polymer/Nanodiamond Nanocomposites: Fundamentals, Properties and Applications. Elsevier. 2024. 294 p. doi: 10.1016/B978-0-443-15908-4.00005-6.

5. Nanodiamonds - Advanced Material Analysis, Properties and Applications / Ed. by J.-C. Arnault. Amsterdam: Elsevier, 2017. 507 p.

6. О механизме смазочного действия присадок наноалмазов детонационного синтеза в смазочных композициях / А. А. Шепелевский [и др.] // ЖТФ. 2017. том 87, вып. 9. С. 1354–1361. doi: 10.21883/JTF.2017.09.44909.2139.

7. Effect of Nanodiamonds on Friction Reduction Performance in Presence of Organic and Inorganic Friction Modifiers / A.K. Piya [et al.] // Lubricants. 2025. Vol. 13. P. 1. doi: 10.3390/lubricants13010001.

8. Application of Nano-Crystalline Diamond in Tribology / Y. Xia [et al.] // Materials. 2023. V. 16. P. 2710. doi: 10.3390/ma16072710.

9. Dispersion of reduced nanodiamond and its application in lubrication / H. Zhong [et al.] // Materials Today Communications. 2023. Vol. 37. P. 106999. doi: 10.3390/ma16072710.

10. Bawa'neh H., Albiss B.A., Ocak Y.S. Improving tribological performance of lubricating oil using functionalized nanodiamonds as an additive material // RSC Advances. 2025. Vol. 15. P. 26766–26775. doi: 10.1039/d5ra03156g.

11. Ivanov I., Shenderova O. Nanodiamond-based nanolubricants for motor oils // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2017. Vol. 21. P. 17–29. doi: 10.1016/j.cossms.2016.07.003.

12. Modified nanodiamonds as antiwear additives to commercial oils / A.P. Puzyr [et al.] // Tribology Trans. 2012. Vol. 55. P. 149–154. doi: 10.1080/10402004.2011.637662.

13. Styer J. Fuel Economy Beyond ILSAC GF-5: Correlation of Modern Engine Oil Tests to Real World Performance // SAE International Journal of Fuels and Lubricants. 2012. Vol. 5, № 3. P. 1025–1033. doi: 10.4271/2012-01-1618.

14. Puzyr A.P., Burov A.E., Bondar V.S. Modification and Comparative Study of Commercial Nanodiamonds // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2015. Vol. 23. P. 93–97. doi: 10.1080/1536383X.2013.794338.

Информация об авторах

А. Е. Буров – кандидат технических наук, директор Красноярского филиала ФИЦ ИВТ, старший научный сотрудник Института биофизики СО РАН.

А. П. Пузырь – старший научный сотрудник Института биофизики СО РАН.

REFERENCES

1. Holmberg, K. & Erdemir, A. (2019). The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars. *Tribology international,* (135), 389-396. doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.024.

2. Huang, R., Han, S. Zhang, T., Wang, Z., Grinkevych, K., Chen, X. & Xu, J. (2022). Characterization and tribology performance of polyaniline-coated nanodiamond lubricant additives. *Nanotechnology Reviews*, (11), 2190-2201. doi: 10.1515/ntrev-2022-0135.

3. Novikovskiy, E.A. & Ananyeva, E.S. (2016). Experimental study of the dependence of the physical and mechanical characteristics of modified epoxy compositions on the degree of their filling with carbon ultradispersed particles. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 177-181. (In Russ.).

4. Kausar, A. (2024). Polymer/Nanodiamond Nanocomposites: Fundamentals, Properties and Applications. Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-443-15908-4.00005-6.

5. Ed. by Arnault, J.-C. (2017). Nanodiamonds - Advanced Material Analysis, Properties and Applications. Amsterdam: Elsevier.

6. Shepelevskiy, A.A., Esina, A.V., Voznyakovskiy, A.P. & Fadin, Yu.A. (2017). On the mechanism of lubricating action of detonation synthesis nanodiamond additives in lubricant compositions. *JTF,* (87), 1354-1361. (In Russ.). doi: 10.21883/JTF.2017.09.44909.2139.

7. Piya, A.K., Yang, L., Emami, N. & Morina, A. (2025). Effect of Nanodiamonds on Friction Reduction Performance in Presence of Organic and Inorganic Friction Modifiers. *Lubricants*, (13), 1. doi: 10.3390/lubricants13010001.

8. Xia, Y., Lu, Y., Yang, G., Chen, C., Hu, X., Song, H., Deng, L., Wang, Y., Yi, J. & Wang, B. (2023). Application of Nano-Crystalline Diamond in Tribology. *Materials*, (16), 2710. doi: 10.3390/ma16072710.

9. Zhong, H., Wang, Q., Qu, J., Li, X., Mukerabigwi, J.F., Asibaike, L., Fang, Y. & Cao, Yu. (2023). Dispersion of reduced nanodiamond and its application in lubrication. *Materials Today Communications,* (37), 106999. doi: 10.3390/ma16072710.

10. Bawa'neh, H., Albiss, B.A. & Ocak, Y.S. (2025). Improving tribological performance of lubricating oil using functionalized nanodiamonds as an additive material. *RSC Advances*, (15), 26766-26775. doi: 10.1039/d5ra03156g.

11. Ivanov, I. & Shenderova, O. (2017). Nanodiamond-based nanolubricants for motor oils. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, (21), 17-29. doi: 10.1016/j.cossms.2016.07.003.

12. Puzyr, A.P., Burov, A.E., Selyutin, G.E., Voroshilov, V.A. & Bondar, V.S. (2012). Modified nanodiamonds as antiwear additives to commercial oils. *Tribology Transactions*, (55), 149-154. doi: 10.1080/10402004.2011.637662.

13. Styer, J. (2012). Fuel Economy Beyond ILSAC GF-5: Correlation of Modern Engine Oil Tests to Real World Performance. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, (5), 1025-1033. doi: 10.4271/2012-01-1618.

14. Puzyr, A.P., Burov, A.E. & Bondar, V.S. Modification and Comparative Study of Commercial Nanodiamonds. (2015). *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, (23), 93-97. doi: 10.1080/1536383X.2013.794338.

Information about the authors

A.E. Burov - Candidate of Technical Sciences, Director of the Krasnoyarsk Branch of the FRC ICT, Senior Researcher at the Institute of Biophysics SB RAS.

A.P. Puzyr - Senior Researcher at the Institute of Biophysics SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 285–290.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 285–290.

Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 691.175
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.041 EDN: FJMUGT

РАЗРАБОТКА ФИЛАМЕНТОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ ВОЛОКНОМ ДЛЯ FDM ПЕЧАТИ

Ленар Нургалеевич Шафигуллин [1], Наталья Владимировна Романова [2], Азат Талгатович Габдрахманов [3], Эдуард Владимирович Панфилов [4], Андрей Михайлович Сотников [5]

[1, 2, 3, 4, 5] Набережночелнинский институт (филиала) Казанского Федерального Университета, Набережные Челны, Россия
[1] misharin_82@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7947-801X
[2] romnatav@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2484-346X
[3] veyron000@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-4667-8311
[4] panfilovev@kamaz.ru, http://orcid.org/0009-0009-1066-8219
[5] sotnikovand@mail.ru, http://orcid.org/0009-0006-6164-8806

Аннотация. *Полимерные композиционные материалы конструкционного и функционального назначения являются одними из самых многочисленных и разнообразных видов материалов. Их применение в различных областях техники обеспечивает значительный экономический эффект по сравнению с традиционными, изготовленными из металла, узлами и деталями. Применение филаментов с непрерывным волокном для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом FDM печати позволяет создавать прототипы и масштабные модели в короткие сроки при минимальных затратах, что соответствует современным тенденциям перехода к кастомизированному производству. Изготовлены лабораторные образцы филаментов на основе полиэтилена высокого давления и сополимера этилена с винилацетатом, армированного непрерывным базальтовым волокном. Проведён анализ полученных композиций по внешнему виду, геометрическим размерам, плотности, содержанию связующего, микроструктуре, количеству нитей в базальтовом волокне. Анализ внешнего вида деталей, изготовленных из полимерных композиций, выявил наличие незначительных видимых дефектов (коробления, деформации, прижоги, расслоение). Система «Полиэтилен–базальтовое волокно» подходит для производства анизотропных композиционных изделий автомобильной промышленности, беспилотных летальных аппаратов в виду своей низкой стоимости, доступности большого марочного ассортимента полиэтилена в РФ и отечественного производителя базальтового волокна.*

Ключевые слова: *филамент, непрерывное волокно, полимерный композиционный материал, FDM печать.*

Благодарности: *Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан (соглашение № 49/2024-ПД от 16.12.2024 г.).*

Для цитирования: Разработка филаментов с непрерывным волокном методом для fdm печати / Л. Н. Шафигуллин [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 285–290. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.041. EDN: https://elibrary.ru/FJMUGT.

Original article

DEVELOPMENT OF CONTINUOUS FILAMENTS FOR FDM PRINTING

Lenar N. Shafigullin [1], Natalia V. Romanova [2], Azat T. Gabdrakhmanov [3], Eduard V. Panfilov [4], Andrey M. Sotnikov [5]

[1, 2, 3, 4, 5] Kazan Federal University, Kazan, Russia
[1] misharin_82@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7947-801X
[2] romnatav@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2484-346X
[3] veyron000@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-4667-8311
[4] panfilovev@kamaz.ru, https://orcid.org/0009-0009-1066-8219
[5] sotnikovand@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-6164-8806

Abstract. *Polymer composite materials for structural and functional purposes are among the most numerous and diverse types of materials. Their use in various fields of technology provides a significant economic effect compared to traditional units and parts made of metal. The use of filaments with continuous fiber for the manufacture of products from polymer composite materials by FDM printing allows you to create prototypes and scale models in a short time at minimal cost, which corresponds to modern trends in the transition to customized production. Laboratory samples of filaments based on high-density polyethylene and ethylene-vinyl acetate copolymer reinforced with continuous basalt fiber were manufactured. The obtained*

© Шафигуллин Л. Н., Романова Н. В., Габдрахманов А. Т., Панфилов Э. В., Сотников А. М., 2026

compositions were analyzed for appearance, geometric size, density, binder content, microstructure, and the number of threads in the basalt fiber. Analysis of the appearance of parts made from polymer composites revealed the presence of minor visible defects (warping, deformation, burns, delamination). The Polyethylene-Basalt Fiber system is suitable for the production of anisotropic composite products for the automotive industry, the production of unmanned aerial vehicles due to its low cost, the availability of a large range of polyethylene brands in the Russian Federation and a domestic manufacturer of basalt fiber.

Keywords: *filament, continuous fiber, polymer composite material, FDM printing.*

Acknowledgements: *The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan (agreement No. 49/2024-PD dated 16.12.2024).*

For citation: Shafigullin, L. N., Romanova, N. V., Gabdrakhmanov, A. T., Panfilov, E. V., Sotnikov, A. M. (2026). Development of filaments with continuous fiber method for fdm printing. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 285-290. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.041. EDN: https: //elibrary.ru/FJMUGT.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных и важных задач, входящих в приоритетные «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.», является разработка конструкционных полимерных композиционных материалов (ПКМ) со специальными свойствами на основе термореактивных или термопластичных матриц (в том числе наномодифицированных), углеродных, стеклянных или органических наполнителей, а также технологий изготовления полуфабрикатов и изделий из них [1, 2].

ПКМ конструкционного и функционального назначения являются одними из самых многочисленных и разнообразных видов материалов. Их применение в различных областях техники обеспечивает значительный экономический эффект по сравнению с традиционными, изготовленными из металла, узлами и деталями. При изготовлении деталей из ПКМ упрощается технология их изготовления и сборки, снижается масса, сокращается стоимость и расходы на эксплуатацию готовых изделий. Более 40 лет в качестве полимерной матрицы использовались термореактивные материалы. Однако многокомпонентность термореактивных связующих, их ограниченная жизнеспособность, длительность процесса отверждения, многооперационность процесса переработки, недостаточная воспроизводимость свойств материалов, сложности утилизации брака и отходов переработки и создание безопасных для окружающей среды условий стимулировали поиски использования в качестве альтернативы связующих в виде термопластичных матриц [1–4]. Термопластичные матрицы обладают рядом преимуществ: заданная молекулярная масса; гораздо более долгий (до 10 лет) срок хранения полуфабриката; короткий технологический цикл получения изделия; способность к обратимым деформациям; возможность вторичной переработки; не токсичность; минимальное, по сравнению с реактопластами выделение летучих веществ.

Процесс производства изделий из термопластичного композиционного материала менее трудоемок в условиях крупномасштабного производства, хотя и требует специальной производственной линии. Это упрощает получение деталей сложной конфигурации, повышает производительность оборудования, создавая предпосылки для его автоматизации [5–7].

Безусловным трендом последних десятилетий является автоматизация ручного труда. Большую роль в этом сыграла популяризация 3D-принтеров, благодаря которым возможно создание прототипов и масштабных моделей в короткие сроки при минимальных затратах. Наиболее распространенными типами принтеров являются принтеры, работающие по технологиям FDM, SLA: FDM – печать основывается на послойном создании объема изделия с помощью полимерного расплава; SLA/DLP – печать основывается на послойном отверждении фотополимера под действием луча лазера или света светодиода [8–9].

В технологии FDM используется филамент, также называемый прутком, а в технологии SLA/DLP используется жидкая смола, которая при воздействии УФ отверждается в изделие. Производство непрерывно армированного материала на основе смолы достаточно проблематично, так как чтобы изготовить изделие, придется повторно перевести смолу в жидкое состояние без потери физико-механических свойств смолы.

Перспективным направлением является освоение и внедрение технологий, позволяющих печатать дискретно- и непрерывно- армированными полимерными композиционными материалами, что позволит не только существенно увеличить качество, скорость и точность выкладки, но и, самое главное, снизить стоимость конечного изделия. Таким образом, разработка филамента с непрерывно армированным волокном является актуальной задачей для технологии FDM [10–15].

Целью исследований является разработка филаментов с непрерывным волокном для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом FDM печати.

МЕТОДЫ

Изготовление лабораторных образцов филамента, армированного непрерывным волокном для FDM печати производилось на экструзионной линии на базе экструдера Brabender Plasti Corder.

В качестве полимерных матриц использованы полиэтилен высокого давления (ПВД) марки 15803-020 и сополимер этилена с винилацетатом с высоким показателем текучести расплава (ПТР) Сэвилен СЭВ марки 11808-340.

В качестве армирующего наполнителя выбраны базальтовый ровинг трощеный с замасливателем КВ42 и базальтовый ровинг UD (директ) с замасливателем КВ-42а производства ООО «Каменный век».

Сравнительный анализ полученных композиций проведён по следующим характеристикам: внешний вид [16], геометрические размеры [16], плотность [17], содержание связующего [18], микроструктура [19], количество нитей в базальтовом волокне [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Лабораторная партия филамента из полиэтилена, армированного непрерывным базальтовым волокном, изготавливалась по технологическому режиму, представленному в таблице 1. Температура переработки ПВД 15803-020 завышена для повышения ПТР,

что позволило на выходе из экструзионной оснастки получить расплав с более высокой температурой, следовательно, увеличить время контакта расплавленного полимера с волокном. Таким образом, увеличена адгезия полимера к армирующему компоненту.

Производство филамента производилось в экспериментальном режиме со скоростью волокна 5 м/мин, в результате удается получить поверхность филамента гладкой, без дефектов. Таким образом, в час возможно производить до 300 метров филамента, а за смену можно получить около 1800 метров, что приблизительно равняется 6 катушкам.

Таблица 1 – Технологический режим изготовления лабораторной партии филамента
Table 1 – Technological mode of manufacturing a laboratory batch of filament

№	Параметры	Значение
1	Температура по зонам, ºС	
	Зона 1	230
	Зона 2	230
	Зона 3	230
	Зона 4	230
	Оснастка	230
2	Производительность экструдера, г/мин	5
3	Скорость волокна, м/мин	2

Проведены эксперименты по получению филамента на основе СЭВ с высоким ПТР (28-40 г/10 мин при температуре 125 ºС). Эксперименты проводились на технологических режимах переработки ПВД 15803-020 для сравнительного анализа. Установлено, что базальтовое волокно лучше смачивается расплавом Сэвилена, однако не удается достичь равномерного покрытия из-за высокой текучести материала. При этом производительность линии получения филамента, непрерывно армированного волокном, может быть увеличена до 10–20 м/мин.

Изготовлена лабораторная партия филамента, армированного непрерывным базальтовым волокном. Вид катушки филамента представлен на рисунке 1.

Филамент имеет эллиптическую форму. Это вызвано неравномерным охлаждением и большой величиной усадки ПВД-15803-020. Филамент армирован непрерывным базальтовым волокном по всей длине произведенного филамента.

Рисунок 1 – Филамент из ПВД 15803-020, непрерывно армированного базальтовым волокном

Figure 1 – Filament made of HDPE 15803-020, continuously reinforced with basalt fiber

Проведен эксперимент по получению филамента из высокотекучего Сэвилена марки СЭВ 11808-340. Вид катушки филамента представлен на рисунке 2.

По внешнему виду катушки филамента установлено, что полимеры марки Сэвилена и на основе полиолефинов с ПТР более 10 г/мин не пригодны для получения филаментов с непрерывным волокном. Высокая текучесть при воздушном охлаждении филамента приводит к формированию элипсоидной формы филаментов. При этом нужно отметить темный цвет филамента, что свидетельствует о пропитке некоторых волокон базальта.

Рисунок 2 – Образцы филамента из Сэвилена СЭВ 11808-340 и базальтового волокна

Figure 2 – Samples of filament from Sevilen SEV 11808-340 and basalt fiber

При сравнении филамента из Сэвилена с филаментом из ПВД, видно, что по внешнему виду филамент из полиэтилена более равномерный по диаметру и длине.

Исследуя открытую пористость, установлено, что значение открытой пористости при измерении по изооктану находится в районе 7 %, что означает наличие пор и ламинацию волокна полимером.

Установлено, что содержание полимера в филаменте находится в диапазоне 30±5 %, что свидетельствует о ламинации базальтового волокна полимером (таблица 2).

Расчет количества мононитей в базальтовом ровинге проводился аналитически с использованием ГОСТа для углеродного волокна. Количество нитей в базальтовом волокне для композиции ПВД – базальт трощеный составило 3000, для ПВД – базальт UD 3100 соответственно.

Для базальтового волокна проведены оценочные испытания воздействия замасливателя волокна на адгезию к полимеру. Использовался базальтовый ровинг трощеный с замасливателем КВ42, который совместим с эпоксидными, винилэфирными и полиэфирными смолами и базальтовый ровинг UD (однонаправленный) с замасливателем КВ42А, который совместим с полипропиленовыми, полиамидными и полиуретановыми. Так как в процессе экструзии время контакта полимера с волокном значительное, то влияние замасливателя на свойства незначительно.

С целью апробации полученных результатов провели пробную печать образцов филамента из Сэвилена СЭВ 11808-340 и базальтового волокна. В качестве FDM

принтера использовали пятиосевой 3D принтер EPIT 5.1 Carbon производство ООО «Воплощение», находящийся в Центре прототипирования КФУ ПИШ КиберАвтоТех. Особенностями принтера являются возможность изготовления изделий методом послойного наплавления с пятиосевым управлением. Моделирование обработки выполняли в слайсере FASP (Five Axis Slicer Program), предназначенное для настройки параметров печати и генерации управляющей программы печати на 3D принтерах «EPIT».

Таким образом, анализ внешнего вида деталей, изготовленных из филамента с непрерывным базальтовым волокном, выявил наличие незначительных видимых дефектов (коробления, деформации, прижоги, расслоение).

Таблица 2 – Параметры композиционных материалов
Table 2 – Appearance and geometric dimensions of the composite material

Материал	№	Внешний вид	Внешний диаметр, мм	Плотность композита, г/см^3	Содержание армирующего наполнителя (базальтовый ровинг), %	Содержание связующего (полиэтилен 15803-020), %
ПВД – базальт трощеный	1	Поверхность гладкая, без посторонних включений, трещин, изломов, механических повреждений и пор	1,66	1,83	71	29
	2		1,80	1,80	70	30
	3		1,75	1,81	71	29
	4		1,90	1,81	69	31
	5		1,84	1,82	70	30
	6		1,71	1,80	73	27
	7		1,78	1,81	70	30
	8		1,67	1,80	71	29
	9		1,87	1,83	70	30
	10		1,88	1,80	70	30
ПВД – базальт UD	1	Поверхность гладкая, без посторонних включений, трещин, изломов, механических повреждений и пор	1,70	1,80	70	30
	2		1,80	1,80	70	30
	3		1,62	1,81	71	29
	4		1,89	1,81	71	29
	5		1,74	1,81	69	31
	6		1,67	1,80	70	30
	7		1,88	1,83	73	27
	8		1,91	1,81	70	30
	9		1,64	1,80	71	29
	10		1,75	1,80	70	30

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований было выявлено, что для изготовления изделий методом FDM с непрерывном волокном необходимо провести модернизацию технологии. Данная модернизация заключается в следующих изменениях технологической линии:

- все шпули необходимо использовать только с наружной размоткой, в том числе UD. Если размотка будет наружной, можно будет стабильно разматывать больше одной бобины с базальтовым волокном;

- необходимо установить предварительный нагрев волокна перед входом последнего в экструзионную оснастку, так как скорость прохождения волокна через оснастку будет существенно выше, чем на лабораторной линии;

- в части экструзионной оснастки возможно два возможных варианта исполнения:

1) оснастка кабельного типа, рассчитанная на большую производительность линии. Такой подход предполагает создание нескольких экструзионных линий, но при этом нет необходимости серьезной переработки экструзионной оснастки;

2) многоручьевая экструзионная оснастка, в которую подается несколько ровингов с нескольких шпуль, а на выходе получается несколько потоков филамента. В этом случае нет необходимости создания нескольких линий, но потребуются финансовые затраты на проектирование многоручьевой экструзионной оснастки.

- необходима ванна охлаждения для быстрого охлаждения получаемого филамента, так как скорость производства филамента существенно возрастает;

- необходим накопитель филамента для смены катушки на узле смотки. Накопитель дает возможность сменить катушку с полученным филаментом без остановки линии;

- необходимо добавить узел перемотки филамента с большой катушки на маленькие, так как на промышленной линии целесообразно устанавливать узел смотки с большой бобиной.

В применении оборудования для 3D печати можно выделить следующие моменты:

- 3D принтер должен быть оборудован прямой (direct) системой подачи филамента в печатающую голову. Это обусловлено тем, что филамент из полиэтилена достаточно гибкий и по поведению подобен каучукообразным филаментам, например, TPU или SEBS. Пример такой печатающей головки приведен на рисунке 3.

- печатающая головка 3D принтера должна содержать полностью металлический термобарьер;

- 3D принтер должен обладать закрытой камерой, так как у полиэтилена плохая смачиваемость поверхности (краевой угол смачивания около 170°) и велика вероятность деламинации;

- при подготовке модели к печати необходимо ПО собственной разработки, так как печать филаментом, непрерывно армированным волокном, предполагает либо то, что печатающая голова не отрывается от детали, либо предусмотрен механизм резки филамента;

- необходим механизм резки филамента.

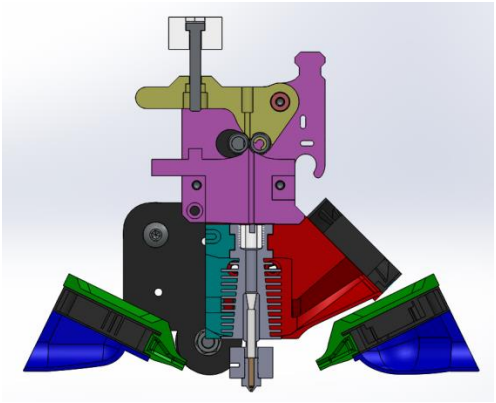


Рисунок 3 – Печатающая головка 3D принтера с прямой (direct) подачей филамента

Figure 3 – 3D Printer Print Head with Direct Filament Feed

На основании предложенных модификаций разработана модернизация принтера EPIT 5.1 Carbon, включающая: разработку новой печатающей головки (рисунок 4); разработку обрезного механизма (рисунок 5).

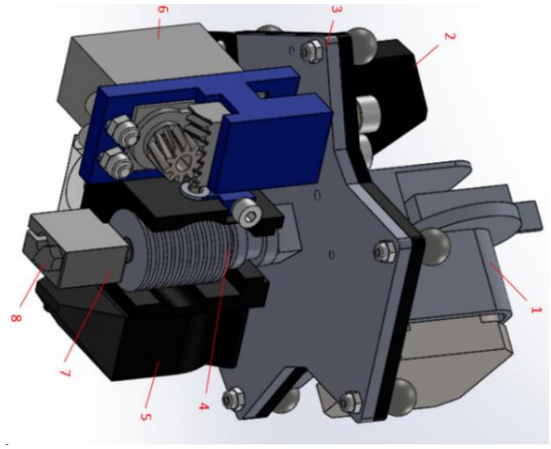


Рисунок 4 – Модернизованная печатающая головка для принтера EPIT 5.1 Carbon: 1 – экструдер подачи филамента; 2 – электро-контакт подключения головки; 3 – площадка печатающей головки; 4 – радиатор охлаждения филамента; 5 – вентилятор охлаждения расплава; 6 – механизм обрезки филамента; 7 – блок нагрева филамента; 8 – сопло

Figure 4 – Upgraded print head for EPIT 5.1Carbon printer: 1 – filament feed extruder; 2 – head connection electrical contact; 3 – print head platform; 4 – filament cooling radiator; 5 – melt cooling fan; 6 – filament cutting mechanism; 7 – filament heating unit; 8 – nozzle

В результате проведенных модификаций выявлено, что поскольку филамент после обрезки проходит некоторое расстояние внутри печатающей головки, то данная дистанция должна учитываться при генерации g-кода печати модели. Для этого в слайсере введен дополнительный параметр печати «Дистанция отреза филамента», который учитывается при генерации g-кода, и устанавливает команду обрезки филамента за указанное количество миллиметров до конца рабочего хода печатающей головки.

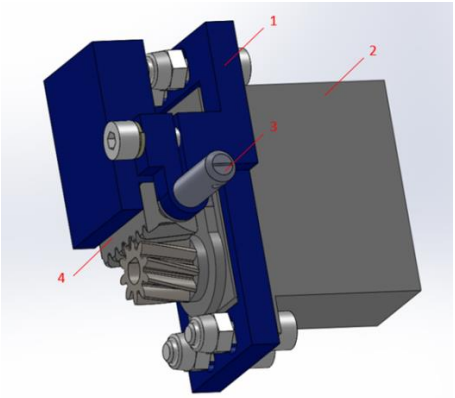


Рисунок 5 – Обрезной механизм: 1 – кронштейн; 2 – серводвигатель; 3 – направляющая; 4 – рейка

Figure 5 – Trimming mechanism: 1 – bracket; 2 – servo motor; 3 – guide; 4 – rack

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

3D печать непрерывно армированным филаментом является развивающимся направлением, в котором работает небольшое количество производителей материала и оборудования. Система «Полиэтилен–базальтовое волокно» подходит для производства анизотропных композиционных изделий автомобильной промышленности, производства беспилотных летальных аппаратов в виду своей низкой стоимости, доступности большого марочного ассортимента полиэтилена в РФ и отечественного производителя базальтового волокна. Таким образом, для производства, непрерывно-армированного филамента «полиэтилен–базальтовое волокно» в РФ уже есть сырьевая база.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице / Е.Н. Каблов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия химия и химическая технология. 2016. Т. 59, № 10. С. 61–71. doi: 10.6060/tcct.20165910.536.

2. Синтез простых и сложных эфиров вицинальных триазолов / М.В. Казанцева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия химия и химическая технология. 2016. Т. 59, № 10. С. 4–10. doi: 10.6060/tcct.20165910.5365.

3. Композиционный материал на основе полиолефинов и модифицированных растительных наполнителей/ А.В. Горбачев [и др.] // Пластические массы. 2023. № 1–2. С. 48–52. doi: 10.35164. 0554-2901-2023-1-2-48-52.

4. Мусин И.Н., Файзуллин И.З., Вольфсон С.И. Влияние добавок на свойства древесно-полимерных композитов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 24. С. 97–99.

5. Кириченко Н.Б. Автомобильные эксплуатационные материалы : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. 9-е изд., стер. Москва : Издательский центр «Академия», 2014. 208 с.

6. Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях: учеб.-справ. Руководство / В.А. Струк [и др.]. Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2010. 536 с.

7. Васильева Л.С. Автомобильные эксплуатационные материалы : учебник для вузов. 2-е изд. Москва : Наука-Пресс, 2004. 421 с.

8. Максимов Н.М. Стратегия развития аддитивных технологий // Аддитивные технологии. 2021. № 4. С. 10.

9. Сацкая З.М. О развитии аддитивных технологий в России // Аддитивные технологии. 2021. № 3. С. 16–20.

10. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) [Электронный ресурс] / С.В. Кондрашов [и др.] // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 34–49. URL: http://www.viam-works.ru/(дата обращения: 29.05 2025).

11. Балашов А.В., Маркова М.И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью [Электронный ресурс] // Инженер. вестн. Дона. 2019. № 1. URL: ivdon/ru/ru/magazine/ archive/nly2019/5618/ (дата обращения: 29.05 2025).

12. Разработка методики испытаний материалов для FDM-печати, применяемых для изготовления автокомпонентов / Л.Н. Шафигуллин [и др.] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. Казань. 2024. № 2. С. 119–124.

13. Шафигуллин Л.Н., Габдрахманов А.Т., Романова Н.В. Анализ материалов и технологий гранульной 3d печати для изготовления деталей автомобилей // Сборник статей всероссийской научно-практической конференции «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования». Севастополь. 2025. С. 61–66.

14. Рашевский Д.А. 3D-печать переработанным пластиком // Научный альманах ассоциации FRANCE-KAZAKHSTAN. 2024. № 2. С. 142–145.

15. Хаширов А.А. Влияние технологических режимов FDM-печати на свойства изделий из полифениленсульфона и его композита с дискретным углеродным волокном : дис. ... канд. тех. наук. Нальчик, 2019. 124 с.

16. ГОСТ Р 59100-2020. Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования: введ. 2021-07-01. Москва, 2020, 11 с.

17. ГОСТ Р 56679-2015. Композиты полимерные. Метод определения пустот: введ. 2017-01-01. Москва, 2016, 12 с.

18. ГОСТ Р 56796-2015. Композиты полимерные. Прегеги. Метод определения содержания исходных компонентов в препреге : введ. 2017-01-01. Москва, 2016, 19 с.

19. ГОСТ Р 57800-2017. Композиты полимерные. Подготовка образцов для микроструктурных исследований : введ. 2018-06-01. Москва, 2017, 7 с.

20. ГОСТ 32666-2014 (ISO 11567:1995). Волокно углеродное. Определение диаметра и площади поперечного сечения элементарной нити: введ. 2015-09-01. Москва, 2014, 19 с.

Информация об авторах

Л. Н. Шафигуллин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы, технологии и качества» Набережночелнинского института КФУ.

Н. В. Романова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы, технологии и качества» Набережночелнинского института КФУ.

А. Т. Габдрахманов – кандидат технических наук, доцент кафедры «высокоэнергетических процессов и агрегатов» Набережночелнинского института КФУ.

Э. В. Панфилов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы, технологии и качества» Набережночелнинского института КФУ.

А. М. Сотников – аспирант Набережночелнинского института КФУ.

REFERENCES

1. Kablov, E.N., Semenova, L.V., Petrova, G.N., Larionov, S.A. & Perfilova, D.N. (2016). Polymer composite materials on a thermoplastic matrix. *News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology series*, Vol. 59,(10), 61-71. (In Russ.). doi 10.6060/tcct.20165910.536.

2. Kazantseva, M.V., Golobokova, T.V., Proiydakov, A.G., Vereshchagin, L.I. & Kizhnyaev, V.N. (2016). Synthesis of ethers and esters of vicinal triazoles. *News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology series*, Vol. 59, (10), 4-10. (In Russ.). doi 10.6060/tcct.20165910.5365.

3. Gorbachev, A.V., Faizullin, I.Z., Wolfson, S.I., Kanarsky, A.V., Zakharov, I.V. & Kazakov, Yu.M. (2023). Composite material based on polyolefins and modified plant fillers. *Plastics,* (1-2), 48-52. (In Russ.).

4. Musin, I.N., Faizullin, I.Z. & Wolfson, S.I. (2012). The influence of additives on the properties of wood-polymer composites. *Bulletin of Kazan Technological University,* Vol. 15, (24), 97-99. (In Russ.).

5. Kirichenko, N.B. (2014). *Automotive operating materials: textbook for students of secondary vocational education institutions. 9th ed., reprinted*. Moscow : Publishing center "Academy". (In Russ.). 208 p.

6. Struck, V.A., Pinchuk, L.S., Myshkin, N.K., Goldade, V.A. & Knight. (2010). *Materials Science in Mechanical Engineering and Industrial Technologies: A Textbook and Reference Guide*. Dolgoprudny: Publishing House "Intellect". (In Russ.). 536 p.

7. Vasilyeva, L.S. (2004). *Automotive operating materials: textbook for universities. 2nd ed.* Moscow: Nauka-Press. (In Russ.). 421 p.

8. Maksimov, N.M. (2021). Strategy for the development of additive technologies. *Additive technologies,* (4), 10. (In Russ.).

9. Satskaya, Z.M. (2021). On the development of additive technologies in Russia. *Additivetechnologies,* (3), 16-20. (In Russ.).

10. Kondrashov, S.V., Pykhtin, A.A., Larionov, S.A. & Sorokin, A.E. (2019). The influence of FDM printing process modes and the composition of the materials used on the physical and mechanical characteristics of FDM models (review) [Electronic resource]. *Proceedings of VIAM*. Vol. 10, (82). 34-49. URL: http://www.viam-works.ru/ (date accessed: 05.29.2025). (In Russ.).

11. Balashov, A.V. & Markova, M.I. (2019). Study of the structure and properties of products obtained by 3D printing [Electronic resource]. *Engineering Bulletin of the Don*. (1). URL: ivdon/ru/ru/magazine/ archive/nly2019/5618/ (date of access: 05.29.2025). (In Russ.).

12. Shafigullin, L.N., Gabdrakhmanov, A.T., Romanova, N.V., Nasyrov, I.A., Salin, V.S. & Sotnikov, A.M. (2024). Development of a methodology for testing materials for FDM printing used for the manufacture of automotive components. *Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev,* (2), 119-124. (In Russ.).

13. Shafigullin, L.N., Gabdrakhmanov, A.T. & Romanova, N.V. (2025). Analysis of materials and technologies of granular 3D printing for the manufacture of car parts. *Collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference "Advanced technologies of reverse engineering and rapid prototyping"*. Sevastopol. 61-66. (In Russ.).

14. Rashevsky, D.A. (2024). 3D printing with recycled plastic. *Scientific almanac of the FRANCE-KAZAKHSTAN association*, (2). 142-145. (In Russ.).

15. Khashirov, A.A. (2019). Influence of FDM printing process modes on the properties of products made of polyphenylene sulfone and its composite with discrete carbon fiber. Dissertation of candidate of technical sciences. Nalchik. (In Russ.).

16. National standard of the russian federation. (2020). Plastics. Filaments for additive technologies. General technical requirements (HOST R 59100-2020). Retrieved from: https://docs.cntd.ru/document/566108864.

17. National standard of the russian federation. (2016). Polymer composites. Method for determination of voids. (HOST R 56679-2015). Retrieved from: https://docs.cntd.ru/search?q=56679%20%E2%80%93%202015.

18. National standard of the russian federation. (2016). Polymer composites. Prepregs. Method for determination of constituent content of prepreg. (HOST R 56796-2015). Retrieved from: https://docs.cntd.ru/document/1200129500.

19. National standard of the russian federation. (2017). Polymer composites. Preparation of samples for microstructure research. (HOST R 57800-2017). Retrieved from: https://docs.cntd.ru/document/1200157294.

20. Interstate standard. (2014). Carbon fibre. Determination filament's diameter and cross-sectional area. (HOST 32666-2014 (ISO 11567:1995)) Retrieved from: https://docs.cntd.ru/document/1200111132.

Information about the authors

L.N. Shafigullin - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials, Technologies and Quality of the Naberezhnye Chelny Institute of KFU.

N.V. Romanova - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials, Technologies and Quality of the Naberezhnye Chelny Institute of KFU.

A.T. Gabdrakhmanov - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of High-Energy Processes and Units of the Naberezhnye Chelny Institute of KFU.

E.V. Panfilov - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials, Technologies and Quality of the Naberezhnye Chelny Institute of KFU.

A.M. Sotnikov - postgraduate Student of the Naberezhnye Chelny Institute of KFU.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

Ползуновский вестник. 2026. № 2. С. 291–296.
Polzunovskiy vestnik. 2026;2: 291–296.

Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 620.174
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.042 EDN: SCVIIC

ВЫБОР ЛИСТОПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ, УМЕНЬШАЮЩИЙ ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Дамир Тамасович Сафаров [1], Владимир Иванович Астащенко [2], Татьяна Владимировна Соченко [4],

[1, 2, 3] Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия
[1] safarov-dt@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-8297-4524
[2] astvi-52@mail.ru@mail.ru, http://orcid.org/0000-0001-8141-6021
[3] stv09@mail.ru

Аннотация. *Выполнен обзор методов оценки штампуемости листопроката для повышения качества листовой штамповки ответственных несущих сложнопрофильных деталей большегрузного автомобиля. Разработана схема проведения испытаний на основе трехточечного нагужения образцов листопроката с выполненными искусственным концентратором напряжений, моделирующим естественные концентраторы после вырубки со следующими параметрами: глубина h 0,8 мм, угол α 55 °, радиус при вершине R 0,5 мм. Предложены показатели трещиностойкости: углы начала возникновения микротрещин $\alpha_{\text{ТМ}}$ и появления заметных трещин $\alpha_{\text{ср.}}$, $\alpha_{\text{макс.}}$, измеряемые в процессе проведения испытаний. Приведены результаты оценки трещиностойкости поступающих партий листопрокта для выбора оптимальной партии, обеспечивающей отсутствие трещин на примере изготовления сложнопрофильной детали поперечина рамы большегрузного автомобиля. В ходе цеховых испытаний у листопроката, приводящей к краевым трещинам деталей сложной формы, найден диапазон изменения величины угла начала трещинообразования $\alpha_{\text{ТМ}}$ от 72 ° до 82 °, развития трещины $\alpha_{\text{макс.}}$ до длины 3 мм изменяется в интервале от 100 ° до 105 °. У листопроката, не приводящего к возникновению краевых трещин, $\alpha_{\text{ТМ}}$ изменяется от 93 ° до 98 °, угол развития трещины $\alpha_{\text{макс.}}$ до длины в 3 мм изменяется в интервале от 120 ° до 137 °. Разработан критерий выбора листопроката $\text{К}_{\alpha\text{с}}$, величина которого рассчитывается по значениям углов $\alpha_{\text{ср.}}$, $\alpha_{\text{макс.}}$ при запасе по углу возникновения трещин в 10 °. По значениям критерия выполняется выбор листопроката для холодной пластической деформации деталей сложной формы. Величина критерия для каждой марки стали уточняется. Для листопроката из стали S550 толщиной 6 мм рекомендуется величина $\text{К}_{\alpha\text{с}} > 1{,}2$. Предложена схема адаптации программы испытаний листопроката на трещиностойкость в процесс входного контроля при штамповке серийных деталей.*

Ключевые слова: *высокопрочная сталь испытания, критерий трещиностойкости, образец, листопрокат, холодная листовая штамповка, относительное удлинение.*

Финансирование: *работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторской диссертации и выполнению научно-исследовательских работ (соглашение № 12/2025-ПД-КФУ от 22.12.2025 г.).*

Для цитирования: Сафаров Д. Т., Астащенко В. И., Соченко Т. В. Выбор листопроката из высокопрочных сталей, уменьшающий вероятность возникновения трещин при холодной листовой штамповке сложнопрофильных деталей // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 291–296. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.042. EDN: https://elibrary.ru/SCVIIC.

Original article

CHOICE OF SHEET METAL FROM HIGH-STRENGTH STEELS, WHICH REDUCES LIKELIHOOD OF CRACKS DURING COLD SHEET STAMPING OF COMPOSITE PARTS

Damir T. Safarov [1], Vladimir I. Astashchenko [2], Tatiana V. Sochenko [3]

[1, 2, 3] Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia
[1] safarov-dt@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-8297-4524
[2] astvi-52@mail.ru @mail.ru, http://orcid.org/0000-0001-8141-6021
[3] stv09@mail.ru

© Сафаров Д. Т., Астащенко В. И., Соченко Т. В., 2026

Abstract. *A review of methods for evaluating the stampability of sheet metal for improving the quality of sheet stamping of responsible load-bearing composite parts of a heavy-duty vehicle has been performed. A test scheme has been developed for sheet metal rolling, with artificial stress concentrators simulating natural concentrators after cutting based on a three-point test. The results of assessing the crack resistance of incoming batches of sheet metal are considered to select the optimal batch that ensures the absence of cracks using the example of manufacturing a complex-profile part, the crossbar of the frame of a heavy-duty vehicle. Crack resistance indicators are proposed: the angles of the onset of microcracks* α_{TM} *and the appearance of noticeable cracks* $\alpha_{\text{m.}}$,$\alpha_{\text{max.}}$ *measured during testing. During shop tests, a range of changes in the angle of onset of cracking* α_{TM} *from 72° to 82° and crack development* $\alpha_{max.}$ *was found for the sheet metal rolling machine, which leads to edge cracks in parts of complex shape. The length of 3 mm varies in the range from 100° to 105°. In a sheet-rolling machine that does not lead to the appearance of marginal cracks,* α_{TM} *varies from 93° to 98°, the angle of crack development* $\alpha_{max.}$ *up to a length of 3 mm varies in the range from 120° to 137°. A criterion has been developed for choosing a* $\text{K}_{\alpha\text{c}}$ *sheet roll, the value of which is calculated from the values of the angles* $\alpha_{m.}$, $\alpha_{max.}$ *with a margin of 10° for the angle of occurrence of cracks. According to the values of the criterion, a sheet roll is selected for cold plastic deformation of parts of complex shape. The value of the criterion for each steel grade is being specified. For sheet rolling made of S500 steel with a thickness of 6 mm, the recommended value is* $\text{K}_{\alpha\text{c}}$*>1.2. The scheme of adaptation of the test program of a rolled sheet for crack resistance in the process of input control during stamping of serial parts is given.*

Keywords: *high-strength steel testing, crack resistance criterion, sample, sheet metal, cold sheet stamping, elongation.*

Funding: *The work was carried out at the expense of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, scientific and other organizations to support the development of human resources in terms of encouraging their researchers and academic staff to defend their doctoral theses and conduct research (agreement No. 12/2025-PD-KFU dated December 22, 2025).*

For citation: Safarov, D. T., Astashchenko, V. I. & Sochenko, T. V. (2021). Choice of sheet metal from high-strength steels, which reduces the likelihood of cracks during cold sheet stamping of composite parts. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 291-296. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.042. EDN: https: //elibrary.ru/SCVIIC.

ВВЕДЕНИЕ

В производственных условиях оценка штампуемости и технологичности листового проката направлены на определение соответствия листопроката требованиям стандартов по химическому составу, механическим свойствам, структуре и чистоте. На практике листопрокат из высокопрочной стали, соответствующий по всем контролируемым параметрам и требованиям стандартов, может приводить к дефектам в операциях холодной пластической деформации сложнопрофильных автомобильных деталей.

Пример такого дефекта в виде краевой трещины для детали «поперечина рамы» приведен на рис. 1. Деталь изготавливается из высокопрочной термомеханически упрочненной стали S550MC.

Поперечина рамы изготавливается в двух ручьях. В первом выполняется гибка плоской заготовки, во втором – окончательное формообразование детали. Краевая трещина возникает после формообразования детали во втором ручье. Основной причиной образования трещины является наличие на кромках концетраторов напряжений, образующихся после вырубных операций. Чистота кромок после вырубки зависит от наладки и качественного пуансона [1, 2]. Содержание различных методик по обеспечению штампуемости листопроката рассматривается в различных литературных источниках.

Например, в [3–6] штампуемость обеспечивается путем рационального выбора марки металла и термической обработки [7, 8]. В [9] отсутствие дефектов штамповки добиваются за счет проведения предварительного проведения экспериментов с варьированием параметров штамповочных переходов с дальнейшим выбором оптимальных параметров. В [10] для обеспечения качества штамповки предлагается способ производственного контроля, заключающийся в выборочном контроле листов, склонных к расслоению, приготовлению шлифов и металлографическому анализу на слоистость микроструктуры.

В [11] в дополнение к предыдущему методу для оценки штампуемости предлагается выполнять измерения микротвердости отдельных структурных составляющих. По разности микротвердости выполняют заключение о штампуемости металла. Следует отметить, трудоемкость методик, требующих либо проведения производственных экспериментов, либо лабораторной подготовки образцов.

Рисунок 1 – Дефект холодной листовой штамповки сложнопрофильной детали «поперечина рамы» большегрузного автомобиля в виде краевой трещины

Figure 1 – A defect in the cold sheet stamping of a complex-profile part "frame crossbar" of a heavy-duty vehicle in the form of an edge crack

Другая группа методов реализует улучшение процесса штамповки за счет применения методов моделирования деформации при холодной деформации металла. Например, в [12, 13] рассмотрен опыт листовой штамповки лонжерона большегрузного автомобиля. Возникающие дефекты в местах скруглений и перегибов детали устраняются конструктивными улучшениями штамповочной оснастки, улучшающей равномерность вытяжки металла в процессе холодной пластической деформации за счет моделирования конечными элементами процесса деформирования металла. В [14] рассмотрено моделирование и улучшение конечно-элементной сетки для нахождения условий деформации длиномерной листовой заготовки, в [15] детали уголок.

Следует отметить, что моделирование в программных продуктах не учитывает фактического изменений свойств конкретного листопроката для обеспечения годности отштампованных полуфабрикатов, а также снижение пластичности материала при наличии концентраторов на кромках от вырубки, что не позволяет в полной мере обеспечить прогнозирование возникновения дефек-

тов штамповки деталей из высокопрочной стали.

Таким образом, разработка результативного производственного метода, обеспечивающего оценку штампуемости листопроката из высокопрочных сталей с учетом фактического изменения механических свойств партий металла и чистоты кромки заготовок после вырубки, является актуальной задачей.

ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами разработан способ оценки штампуемости листопроката по данным испытаний образца трещиностойкости [16]. На боковой стороне образца выполняется V-образный концентратор напряжений, имитирующий естественные концентраторы, наличие которых на кромках штампуемой детали в местах высоких значений напряжений, приводит к возникновению трещин (рис. 2, *б*). Параметры надреза обоснованы по данным профилографического исследования кромок после их вырубки.

Надрез выполняется на фрезерном станке угловой фрезой с углом при вершине 55 º, радиусом 0,5 мм и глубиной в 1,2 мм. Испытание выполняется трхточечным изгибом (рис. 2, *а*). Диаметр гибочного пунсона – 6 мм. При этом диаметре пуансона образец показал высокую чувствительность к образованию трещин, позволяющую оценивать склонность поступающего в производство листопроката к возникновению трещин и на основе этих данных прогнозировать его штампуемость. Увеличение диаметра пуансона резко снижает чувствительность образца к появлению трещин в зоне искусственного концентратора. Отметим, что образцы без искусственного концентратора при изгибе до 180 º не образуют на изгибе видимых трещин.

В процессе выполнения испытаний в конструкции испытательной машины предусмотрена регистрация перемещение пуансона [17]. После испытаний, по значениям перемещений которого рассчитывались значения следующих углов образования трещин:

$\alpha_{\text{ТМ}}$ - начала зарождения микротрещин;

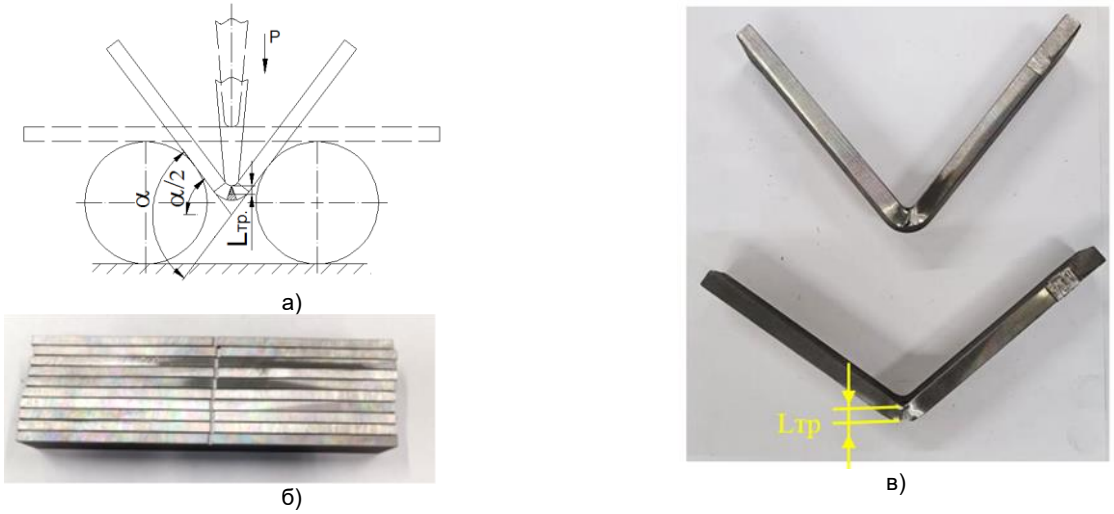
$\alpha_{\text{нач.}}$ – начальный угол возникновения заметной трещины (длина 1 мм.);

$\alpha_{\text{макс.}}$ – развития трещины (длина 3 мм.).

По измеренным данным дополнительно рассчитывается средний угол изгиба образца возникновения заметных трещин рассчитывается, по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{ср.}} = \frac{\alpha_{\text{нач.}} + \alpha_{\text{макс.}}}{2}$$

На рис. 2, *в* приведен внешний вид образцов после проверки трещиностойкости со следами возникновения трещин в месте нанесения искусственного концентратора напряжений.



а) б) в)

Рисунок 2 – Испытания на трещиностойкость: а) схема испытаний, б) изготовленные образцы, в) образцы после испытаний

Figure 2 – Crack resistance tests: a) test scheme, b) manufactured samples, c) samples after testing

Таблица 1 – Углы возникновения трещин на образцах при испытании на трещиностойкость листопрокта толщиной 6 мм стали S 550MC

Table 1 – The angles of occurrence of cracks on the samples during the crack resistance test of sheet metal with a thickness of 6 mm steel S 550MS

Показатели	Партия базовая*	№ партии								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
δ%		28,25	27,75	28,25	28,25	31,5	29,25	30	29	29,25
δ_c%		15	16,8	17	18	18,5	17,8	19	15	18,2
Kcα		1,17	0,6	1,10	1,55	1,20	1,60	1,30	0,90	1,65
$\alpha_{\text{ТМ}}$		90	94	94	96	94	92	94	94	94
$\alpha_{\text{нач.}}$		125	107	94	94	101	96	94	94	94
$\alpha_{\text{макс.}}$		125	107	116	125	125	128	120	112	127
$\alpha_{\text{ср.}}$		125	107	105	109,5	113	112	107	103	110,5
$\alpha_{\text{макс ПР}}$	105									
$\alpha_{\text{тм.ПР}}$	76									

* - партия листопроката, приводящая к краевым трещинам

Величина начала развития трещины и динамика ее развития зависит от свойств листопроката и геометрических параметров искусственного концентратора напряжений. Экспериментальные данные испы-

таний подтверждают достаточную для практического применения чувствительность разработанного образца к возникновению трещин на изгибе.

Авторами разработана методика анализа трещиностойкости листопропроката на трёхточечный изгиб, в условиях заводской лаборатории. Испытания образцов выполнялись на испытательной машине Zwick/Roell Z100 и в цеховых условиях на специализированной испытательной машине мод. В-5. Из каждой исследуемой партии, используемой в производстве, изготавливается по 4 образца испытаний на трещиностойкость. Такое количество образцов необходимо для повышения надежности определения величин образования трещин. В процессе испытаний одновременно регистрируется величина перемещения пуансона с визуальным контролем процесса трещинообразования в месте искусственного концентратора напряжений.

Обобщенные данные испытаний образцов с искусственными концентраторами напряжений на трещиностойкокость приведены в таблице 1.

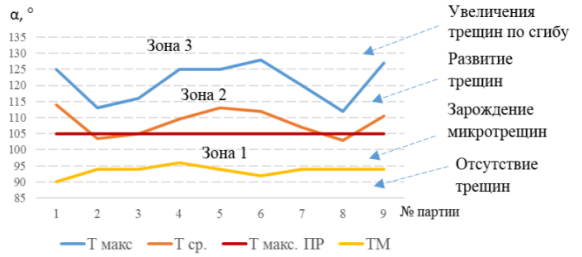


Рисунок 3 – График изменения углов трещиностойкости образцов листопроката партий запуска

Figure 3 – Graph of changes in the angles of crack resistance of sheet metal samples of launch batches

На рисунке 3 приведены графики изменения углов возникновения трещин образцов. Для всех партий листопроката угол зарождения микротрещин на сгибе образца практически одинаковы и изменяются в диапазоне от 90 ° до 94 °. Угол образования трещин образцов изменяется в больших пределах – от 108 ° до 130 °, что свидетельствует об изменении пластических свойств разных партий листопроката. В результате на графической зависимости можно выделить различные области трещинообразования – отсутствия трещин, зарождения микротрещин, развития микротрещин и образования трещин по всему сгибу.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эти сведения по трещиностойкости партий металлопроката являются исходными для принятия решения об использовании той или иной партии листопроката для штамповки деталей, склонных к образованию трещин. Выполненные испытания листопроката, приводящего к возникновению трещин поперечины рамы, показали следующие результаты: минимальный угол зарождения микротрещин 95 °, развития возникновения трещин в листопрокате – 108 °.

На рисунке 4 приведен график углов возникновения заметных (средних) и значимых углов возникновения трещин образцов. Запуск различных партий листопроката на изготовление поперечины рамы может приводить к различным рискам возникновения трещин. На графике можно выделить следующие зоны появления трещин листопроката, в данном случае применительно к поперечине рамы: 1 – высокой вероятности; 2 – умеренной вероятности; 3 – низкой вероятности.

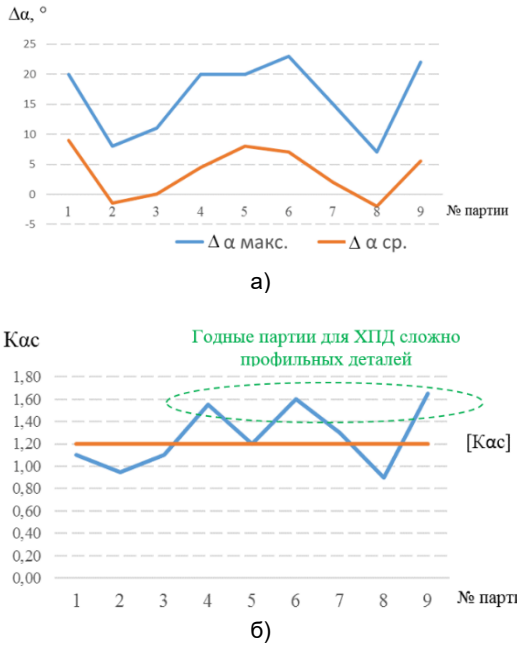


Рисунок 4 – Графики а) изменения интервалов развития трещины $\Delta\alpha_{\text{ср.}}$, $\Delta\alpha_{\text{макс.}}$ б) критерия оценки запаса пластичности $\text{К}_{\alpha c}$ по данным испытаний образцов на трещиностойкость

Figure 4 – Graphs a) changes in the intervals of crack development $\Delta\alpha_{\text{md.}}$, $\Delta\alpha_{\text{max.}}$ b) criteria for assessing the reserve of plasticity $\text{K}_{\alpha c}$ording to the data of tests of samples for crack resistance

Косвенная оценка пластичности листопроката партий листопроката по данным испытаний образцов с искусственным концентратором выполняется по следующему критерию:

$$\text{К}_{\alpha c} = \frac{\Delta\alpha_{\text{макс.}} - \Delta\alpha_{\text{ср.}}}{\text{Н}_{\alpha}}$$

где Н_{α} – запас трещиностойкости, (принято значение в 10 °).

$\Delta\alpha_{\text{макс.}}$ – интервал развития трещины по максимальному углу раскрытия, °

$$\Delta\alpha_{\text{макс.}} = \alpha_{\text{макс}\,i} - \alpha_{\text{макс ПР}},$$

где $\alpha_{\text{макс}\,i}$ – максимальный угол изгиба образца трещиностойкости образцов листопроката, рассматриваемой партии листопроката,

$\alpha_{\text{макс ПР}}$ – максимальный угол изгиба среди образцов трещиностойкости, изготовленных из партии листопроката, приводящей к трещинам листовой штамповки,°

$\Delta\alpha_{\text{ср.}}$ – интервал развития трещины по среднему углу образования трещин, рассматриваемой партии листопроката.°

$$\Delta\alpha_{\text{ср.}} = \alpha_{\text{ср.}i} - \alpha_{\text{макс. ПР}},$$

где $\alpha_{\text{ср.}i}$ – средний угол возникновения трещин образцов, °

$\alpha_{\text{ср.ПР}}$ – средний угол образования трещин образцов из партии, приводящей к трещинам листовой штамповки. °

По данным испытаний листопроката, найдены диапазоны изменений показателей $\Delta\alpha_{\text{макс.}}$ 10 – 15 ° и $\Delta\alpha_{\text{ср.}}$ ±5 °.

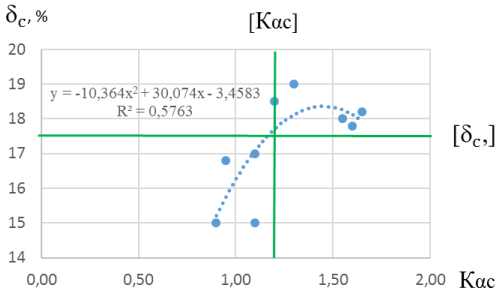
ОБСУЖДЕНИЕ

Для изготовления поперечины не следует за-

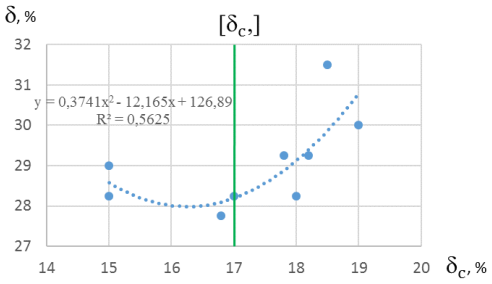
пускать партию № 2, у которой средняя и максимальная величина угла изгиба образцов близка к минимальному углу раскрытия образца, приводящего к возникновению трещин поперечины рамы. По трещиностойкости партия № 2 близка к партии, приводящей к трещинам при штамповке поперечины рамы. Применение партий № 4, № 6 и № 9 приводят к устранению трещин холодной листовой штамповки детали поперечина рамы, поскольку значения критерия $К_{\alpha c}$ значительно больше заданного значения в 1,2.

Для установления влияния критерия трещиностойкости дополнительно выполнены испытания образцов с искусственными концентраторами напряжений и без них на одноосное растяжение, в результате которого установлены значения относительного удлинения образцов на базовой длине l_0 в 60 мм на рис. 5. Увеличение значения критерия сопровождается увеличением относительного удлинения образцов с искусственным концентратором напряжений до 19 %, образцов без концентратора напряжений – до 30 %.

При выборе листопроката для холодной пластической деформации сложнопрофильных деталей, исключающий возникновение краевых трещин, необходимо обеспечить значение критерия выбора листопроката $К_c$ по данным испытаний разработанных образцов с искусственным концентратором на трещиностойкость, удовлетворяющее следующему условию $К_{\alpha c}$>1,2.



а)



б)

Рисунок 5 – Графики а) относительного удлинения образца с искусственным концентратором напряжений δ_c и $К_{\alpha c}$, б) относительного удлинения образцов с концентратором напряжений δ_c и без концентратораδ.

Figure 5 – Graphs of a) relative elongation of a sample with an artificial stress concentrator δ_c and $К_{\alpha c}$, b) relative elongation of samples with a stress concentrator δ_c and without a stress concentrator δ.

В производственных условиях может оказаться, что все партии не соответствуют критерию выбора листопроката, тогда запускать в производство необходимо листопрокат с $К_{\alpha c} > 1$, но при этом обеспечить за счет наладки вырубного штампа минимальную шероховатость боковой поверхности вырубленной заготовки, либо вместо вырубки выполнять раскрой заготовки лазером.

На рис. 6 приведена схема процессов, обеспечивающих внедрение программы испытаний трещиностойкости листового проката для предотвращения дефектности штамповки. Испытания на трещиностойкость металла выполняются для проблемных деталей, склонных к возникновению трещин в процессе их изготовления. Найденные в процессе испытаний минимальные и средние углы образования трещин уточняют предельные значения критерия пригодности поступающего в производство листопроката для штамповки конкретных проблемных деталей.

Рисунок 6 – Схема процессов внедрения метода оценки трещиностойкости листового проката для предотвращения дефектности штамповки

Figure 6 – The scheme of processes for the implementation of the method for assessing the crack resistance of rolled products to prevent defective stamping

Преимуществом применения трехточечного изгиба при испытаниях образцов является возможность выполнения испытаний не только на специализированных испытательных машинах, но с использованием гидравлического пресса с дополнительной оснасткой трехточечного нагружения образца, что важно для оперативного выполнения работ по оценке пригодности листопроката к холодной листовой штамповки в цеховых условиях.

ВЫВОДЫ

1. Предложена и обоснована программа испытаний листопроката на трещиностойкость в виде испытаний трехточечным изгибом разработанных образцов с искусственным концентратором напряжений на испытательной машине и регистрации в процессе испытаний углов начала зарождения микротрещин, возникновения заметной трещины и развития трещины.

2. Предложен критерий трещиностойкости $К_{\alpha c}$ листопроката, расчетные значения которого определяются по данным испытаний образцов с искусственно нанесенным концентратором. Образцы изготавливаются из сравниваемого листопроката и приводящего к краевым трещинам штамповки. Найденные в результате цеховых испытаний листопоката толщиной 6 мм из стали S550MC значения критерия $К_{\alpha c} > 1{,}2$ позволяют в процессе входного контроля выбрать листопрокат, обеспечивающий бездефектную холодную пластическую деформацию металла деталей сложной формы.

3. Благодаря использованию образца с искусственным концентратором, выполненным на боковой поверхности, обеспечена их чувствительность к образованию трещин. Исследованный листопрокат толщиной 6 мм

стали S550MC имеет значительный размах показателей трещинностойкости: по углу начала зарождения трещин от 70 º до 96 º, развития трещины от 107 º до 128 º.

4. Разработана схема включения разработанной программы испытаний листопроката на трещиностойкость в процесс его приемки и запуска в производство для снижения дефектности холодной листовой штамповки несущих деталей рамы большегрузных автомобилей в крупносерийном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зоренко Д.А. CAE-моделирование работы пуансона при формовании изделий из листовой стали // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно-практической конференции № 1, Санкт-Петербург, 2018. С. 52–55.

2. Морозов О.И. Моделирование и анализ НДС разделительных операций листовой штамповки / О.И. Морозов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2021. № 3(95). С. 21–26.

3. Аверкиев А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла. М. : Машиностроение, 1985. 176 с.

4. Аверкиев А.Ю. Оценка штампуемости листового и трубного проката // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 2. С. 19–24.

5. Бурдуковский В.Г. Технология листовой штамповки: учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. 2019. 224 с.

6. Матюк В.Ф. Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей // Неразрушающий контроль и диагностика. 2012. № 3. С. 15–42.

7. Правила выбора режимов термообработки стальных заготовок для холодной объемной штамповки / Д.Л. Панкратов, Р.В. Гавариев, С.Г. Владимирова // Наука и современность. 2017. № 1 (11). С. 157–169.

8. Пачурин Г.В. Ресурсосберегающая подготовка структуры и механических свойств стали 40Х для холодной объемной штамповки метизов / Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Чиненков С.В. // Известия МГТУ МАМИ. 2013. Т. 2, № 2(16). С. 19–23.

9. Выбор оптимальных параметров вытяжки листовых заготовок / Борисевич В.К., Загирняк М.В., Драгобецкий В.В. // КШП ОМД. 2009. № 2. С. 38–41.

10. Способ определения технологичности листов тугоплавких металлов под штамповку. пат. 2231770 С2 Рос. Федерация, № 2002122972/28: заявл. 26.08.2002: опубл. 27.06.2004.

11. Способ определения пригодности стали для холодной пластической деформации: пат. № 2568887 С1 Рос. Федерация, № 2014148855/15: заявл. 03.12.2014: опубл. 20.11.2015

12. Кашапова Л.Р. Автоматизированная оценка надежности технологического процесса листовой штамповки / Л.Р. Кашапова, Д.Л. Панкратов, В.Г. Шибаков // Вестник машиностроения. 2016. № 4. С. 56–59.

13. Обеспечение качества деталей сложной формы на этапе проектирования технологического процесса листовой штамповки / Л.Р. Кашапова, Д.Л. Панкратов, В.Г. ибаков, А. И. Виноградов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 1. С. 81–86.

14. Крючков Д.И. Компьютерное моделирование штамповки длинномерной листовой заготовки элемента шарового резервуара / Д.И. Крючков, И.М. Березин, А.А. Петунин // Вестник машиностроения. 2019. № 2. С. 28–31.

15. Моделирование напряженно-деформированного состояния штампового инструмента с износостойким покрытием на разделительных операциях листовой штамповки с использованием программного пакета LS-DYNA / Морозов О.И., Табаков В.П., Кокорин В.Н. [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2020. Т. 22, № 3. С. 5–11.

16. Особенности и опыт применения высокопрочных сталей для холодной листовой штамповки деталей автомобилей / В.И. Астащенко, Д.Т. Сафаров, Т.В. Швеева, Т.В. Соченко // Вестник ПНИПУ Машиностроение. Материаловедение, 2024. № 3. С. 74–81.

17. ГОСТ Р ИСО 7438-2013 Материалы металлические. Испытание на изгиб / Москва : Стандартинформ 2014. С. 9.

Информация об авторах

Д. Т. Сафаров – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета.

В. И. Астащенко – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета.

Т. В. Соченко – аспирант кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета.

Information about the authors

D.T. Safarov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Design and Technological Support of Machine-building Industries, Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University.

V.I. Astashchenko - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials, Technologies and Quality of Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University named after.

T.V. Sochenko - Postgraduate student of the Department of Materials, Technologies and Quality of the Naberezhninsky Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Алексеев А. С. 235
Алексеев Н. С. 195
Алексеева Н. В. 235
Арисов А. В. 165
Аршинский М. И. 239
Астащенко В. И. 291
Афонин Е. Г. 186
Баженов Н. С. 227
Банникова О. А. 227
Барсуков А. Р. 269
Белякова И. А. 39
Блинова А. Л. 160
Бобровский А. В. 58
Борисова С. В. 77
Бородай Е. В. 53
Босов К. К. 256
Бурак Л. Ч. 20
Буров А. Е. 281
Вайтанис М. А. 139
Вакасова К. А. 123
Вафина А. Р. 206
Вахидов Р. М. 217
Верещагин А. Л. 171
Верещагин А. Л. 195
Витковская В. П. 149
Вяткин А. В. 165
Габдрахманов А. Т. 285
Герасимова Н. С. 58
Голых Р. Н. 269
Горлатых А. И. 46
Горохов А. П. 239
Грибкова В. А. 32
Губаненко Г. А. 143
Губанова М. И. 227
Гуртовой Д. А. 273
Даишева Н. М. 7
Дегтярёва Н. Г. 273
Денисова В. В. 132
Джубари М. К. 235
Джум Т. А. 70
Дриль А. А. 90
Есина Л. М. 39
Ефремов Д. П. 111
Жаркова И. М. 111
Жильцов Ю. В. 239
Жукова В. Ф. 123
Зенитова Л. А. 206
Зинуров В. Э. 248
Иванов А. А. 171
Каледина М. В. 149
Каменская Е. П. 132
Кандроков Р. Х. 64
Карасева Ю. С. 199
Карман Т. В. 123
Кирш И. А. 227
Козулина Н. С. 58
Коляденко В. В. 123
Корнева О. А. 70
Королев Д. Н. 64
Корячкина С. Я. 46
Кох Ж. А. 143
Крапива Т. В. 90
Кривонос О. Н. 39
Крупнова И. А. 256
Крюк Т. В. 102
Кулаков А. Ю. 239
Кухленко А. А. 239
Ладнова О. Л. 46
Лосева Н. И. 264
Марьин В. А. 171
Маюрникова Л. А. 90
Меркулова Е. Г. 46
Митрошина Д. П. 32
Мусина О. Н. 14
Нагорных Е. М. 14
Накып А. М. 199
Небратенко Д. Ю. 211
Николаева Н. В. 32
Ниццевская К. Н. 53
Новиковский А. А. 211
Новицкий Е. А. 239
Новокшанова А. Л. 97
Панов А. Г. 273
Панфилов Э. В. 285
Петров В. А. 211
Петров Е. В. 177
Петросян А. С. 70
Пивоварова Е. В. 256
Пильгук С. В. 102
Попова О. С. 102
Прец М. А. 248
Прокудин Е. О. 211
Пузырь А. П. 281
Речкина Е. А. 143
Романенко Н. А. 102
Романова Н. В. 285
Сайков И. В. 177
Сайкова Г. Р. 177
Санатуллова З. Т. 217
Сафаров Д. Т. 291
Семенихин С. О. 7
Серопян С. А. 177
Сидоренко В. С. 64
Славянский А. А. 32
Смирнов А. В. 177
Сотников А. М. 285
Соченко Т. В. 291
Станкевич С. В. 53
Суханов Г. Т. 256
Суханова А. Г. 256
Тамова М. Ю. 70
Таха Б. С. 235
Труш Е. Н. 102
Ушакова З. Е. 39
Фабрицкая А. А. 7
Филиппова Ю. В. 256
Фролова Ю. В. 156
Харпаев А. В. 211
Хмелёв В. Н. 269
Хмелев И. А. 64
Хмелева Е. В. 64
Хубатхузин А. А. 217
Черезова Е. Н. 199
Черемных Д. А. 143
Чугунова О. В. 165
Шайхиева К. И. 77, 217
Шафигуллин Л. Н. 285
Шевченко Н. П. 149
Шемякина Д. А. 149
Широхова З. В. 227
Шишкин А. М. 273
Шмакова Н. С. 227
Штенина Д. В. 39
Щетинина Е. М. 156
Янова М. А. 58

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

Статья объёмом 5 страниц (по согласованию с редакцией, допускаются статьи объемом от 3 до 10 страниц), имеющая индекс УДК, аннотацию и ключевые слова на русском языке, перевод метаданных статьи на английский язык, сведения об авторах (учёной степени, звания и места работы, e-mail и идентификаторе ORCID).

Работы принимаются в текстовом редакторе Microsoft Word.

Во вкладке *«Разметка страницы»*: используется *размер бумаги* формата А4, *ориентация* листа *книжная*. *Поля: верхнее* – 3,5 см; *нижнее* – 2,5 см; *левое* – 2,5 см; *правое* – 2,5 см; *переплет* – 0 см; В диалоге «*Колонки*» – *«Другие колонки»* выбирается расположение текста в *"две"* колонки, устанавливается *ширина колонок* – 7,65 см, *промежуток* между ними – 0,7 см. В диалоге *«Расстановка переносов»* выбирается *"авто"*.

Во вкладке *«Вставка»* выбирается *«Верхний колонтитул»* – *«Пустой»*, далее появляется вкладка *«Конструктор»*, включаются *"Особый колонтитул для первой страницы"* и *"Разные колонтитулы для четных и нечетных страниц"*. Колонтитулы от края: *верхний* – 2,0 см; *нижний* – 2,0 см.

Структура статьи в обязательном порядке должна содержать:

• Тип статьи (научная статья, обзорная статья), научная специальность, индекс УДК и doi (размещение в левом верхнем углу документа, каждая запись на отдельной строке, без точек).

• Названия статей набираются прописными буквами (шрифт “Arial“, размер шрифта текста – 14 пунктов, полужирный) по центру документа.

• Имена, отчества и фамилии авторов размещаются под названием статьи (шрифт “Arial“, размер шрифта текста – 12 пунктов), над фамилией ставят надстрочную цифру, по порядку, ниже все надстрочные цифры расшифровываются (сведения о месте работы, город, страна, адрес электронной почты и идентификатор ORCID авторов).

• Аннотацию формируют по ГОСТ Р 7.0.99. Объем аннотации от 150 до 250 слов. Перед аннотацией приводят слово «Аннотация» («Abstract»). Шрифт «Arial», размер шрифта – 10 пунктов, курсив, красная строка – 0,8 см, интервал между строками «одинарный». Аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов), оригинальной, отражать основное содержание статьи и результаты исследования (обоснование, предмет, цель работы, метод или методологию проведения работы, область применения результатов, выводы).

• Перед ключевыми словами приводят слово «Ключевые слова» («Keywords») Количество ключевых слов или словосочетаний от 10 до 15. (шрифт «Arial», размер шрифта – 10 пунктов, курсив, красная строка – 0,8 см, интервал между строками «одинарный»).

• После ключевых слов могут быть приведены слова благодарности организациям, учреждениям, руководителям, могут быть приведены сведения о проектах, научно-исследовательских работах, финансировании и т.п. Эти сведения приводят с предшествующим словом «Благодарности» («Acknowledgements») (шрифт «Arial», размер шрифта – 10 пунктов, курсив, красная строка – 0,8 см, интервал между строками «одинарный»).

• Далее отделяют чертой строку и ниже пишут «Для цитирования» («For citation»), после вставляют библиографическую запись на статью для дальнейшего цитирования (составляют по ГОСТ Р.7.0.5-2008). После записи отделить чертой данный текст.

• После записи всех метаданных статьи на русском языке необходимо привести все метаданные на английском языке (отчества сокращают до буквы в английском языке).

• Основной текст (для основной части текста используется шрифт «Arial», размер шрифта основного текста – 10 пунктов, красная строка (отступ) – 0,8 см, интервал между строками «одинарный»).

Структура основного текста статьи:

1) **Введение** – в этом разделе описывается существующая научная проблема и представляется краткий литературный обзор по состоянию обозначенной проблемы.

2) **Методы / методология / методика исследований** – приводится теория или методика экспериментального исследования, приводится обоснование выбора данного материала и методов исследования.

3) **Результаты и их обсуждение** – раздел содержит краткое описание полученных теоретических или экспериментальных результатов. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. В обсуждении рекомендуется объяснить значимость вашего исследования. Показать, какие знания были получены результате исследования, обозначить их перспективы и сравнить их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Данные должны быть систематизированы и иметь логическую связь с текстом.

4) **Выводы** – этот раздел рекомендуется начать с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы.

5) **Список литературы** (шрифт «Arial», размер – 9 пунктов) – не менее 10 позиций, оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

• Сведения об авторах приводится после списка литературы, с предшествующими словами «Информация об авторах» - инициалы, фамилия — учёная степень, звание, место работы, телефон);

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

• После приводят список литературы на латинице (REFERENCES) согласно стилю APA (American Psychological Association - https://apastyle.apa.org. Нумерация записей в дополнительном перечне должна совпадать с нумерацией записей в основном перечне затекстовых библиографических ссылок.

• Ниже приводятся сведения об авторах на английском языке после слов «Information about the authors».

• В конце статьи авторы должны указать об отсутствии или наличии конфликта интересов.

Для создания формул и таблиц используются встроенные возможности Microsoft Word. Рисунки цифрового формата (в электронном виде) создаются средствами Microsoft Word или другими программами и вставляются в нужное место документа, название таблиц и рисунков дублируются на английском языке.

Размеры рисунков не должны превышать границы полей страницы основного текста документа с учетом подрисуночной подписи. Рисунки издательством не редактируются. Если рисунок по ширине превышает размер колонки, то необходимо ставить перед ним и после него разрыв раздела на текущей странице и располагать рисунок в начале или в конце страницы.

Рисунки, надписи и объекты Microsoft Word должны перемещаться вместе с текстом, т.е. быть не поверх текста.

Шаблон для оформления статьи можно скачать на сайте журнала: https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest.

К статье необходимо предоставлять следующие документы: **экспертное заключение, согласие каждого автора на размещение статьи, согласие на обработку персональных данных**.

К публикации принимаются статьи, **ранее нигде не опубликованные** и не представленные к печати в других изданиях. Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят двухстороннее слепое рецензирование. Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Публикации в журнал принимаются на русском и английском языках.

Электронная версия публикации должна быть отправлена в формате текстового редактора Microsoft Word (расширения .doc, .docx) по электронной почте по адресу polz_journal@mail.ru. Название файла формируется из фамилии и инициалов первого автора (к примеру, «ИвановАА.doc). Если статей несколько, то к названию файла через знак подчеркивания добавляется порядковый номер (к примеру, «ИвановАА_1.doc»).

Все статьи будут проверены в системе «Антиплагиат», при оригинальности менее 75 % статьи будут возвращены авторам.

Контактная информация:

Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46, 119 ГК, почтовый индекс: 656038.
Стопорева Татьяна Александровна – тел.: 8 (3852) 290946, e-mail: polz_journal@mail.ru.

Подписано в печать 14.08.2026. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. п. л. 34,87 Тираж 100 экз. Заказ 2026 – 104.
Отпечатано в типографии АлтГТУ им. И. И. Ползунова
Адрес типографии: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина 46

АлтГТУ им. И.И. Ползунова
656038 г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, каб. 119 главного корпуса
тел. +7 (3852) 29-09-46
сайт: https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest/
e-mail: polz_journal@mail.ru
Дизайн обложки: Р.С. Жуковский, доцент кафедры ТИАрх