



ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК

ISSN 2072-8921 (Print)

ISSN 3034-3941(Online)

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

№ 1

2025

Ползуновский ВЕСТНИК

№ 1 2025 г.

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Маюрикова 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., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ МИСиС (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)
Щетинин М. П., д.т.н., проф., вице-президент НОЧУ ДПО «Международная промышленная академия», (г. Москва)
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., зам. директора ООО «Балтийский пекарский дом» (г. Калининград)
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 14.04.2025 г.
Цена 800 рублей.



Polzunovskiy VESTNIK

№ 1 2025

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

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

Publication frequency: quarterly

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, Egypt

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, NUST MISIS, Moscow, Russia

Vladimir Bataev, Doctor of Technical Sciences, NSTU, Novosibirsk, Russia

Sergei Konovalov, Doctor of Technical Sciences, Siberian state Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Mikhail Shchetinin, Doctor of Technical Sciences, MSUFP, Moscow, 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, LLC "Baltisky Bakery House",
Kalininograd, Russia

Igor Altukhov, Doctor of Technical Sciences, Associate professor, IrSAU, Irkutsk, Russia

Galina Gurinovich, Doctor of Technical Sciences, professor, KemSU, Kemerovo, Russia

Elena Ananieva, 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 14.04.2025



СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

<i>И. Ю. Резниченко, Т. А. Мирошина</i> Разработка и оценка качества ореховых конфет с продуктами пчеловодства7	<i>Д. А. Кох, Ж. А. Кох</i> Гомогенная яблочная паста из плодов мелко-плодных яблонь в производстве желеиного мармелада97
<i>М. А. Вайтанис, З. Р. Ходырева</i> Разработка технологии поликомпонентных мясных рубленых изделий с копчено-мукой16	<i>В. П. Вистовская, Д. С. Кожемякин, Е. П. Каменская</i> Оптимизация параметров ферментолиза подсолнечной лузги с использованием методов математического моделирования103
<i>Л. Г. Елисеева, Н. О. Раков, П. И. Токарев, Д. С. Кокорина, А. Х. Соколова, Т. А. Сантурян</i> Исследование влияния упаковки с модифицированной атмосферой и влажностью на сроки годности и качество при хранении плодов авокадо сорта Hass24	<i>Е. О. Ермолаева, Е. Ю. Титоренко</i> Совершенствование методов обеспечения безопасности при эксплуатации оборудования с применением SMED110
<i>Л. Ч. Бурак</i> Перспективы использования технологии сверхкритического диоксида углерода в пищевой промышленности. Обзор предметного поля32	<i>А. С. Захарова, С. И. Конева</i> Исследование характеристик пищевых систем для галет функционального назначения120
<i>М. Г. Курбанова, С. С. Рязанов, Р. В. Крюк, А. Д. Балаба</i> Новый подход к определению качественных характеристик мяса куриной грудки51	<i>В. Г. Курцева, М. Н. Колесниченко</i> Разработка рецептуры маффинов на основе полуфабриката из арбузных семян ... 127
<i>Е. Д. Рожнов, М. Н. Школьникова, В. Н. Аббазова, В. Л. Захаров</i> Высушенный ферментолизованный полуфабрикат из мякоти тыквы как основа для пищевых систем58	<i>В. А. Марьин, А. Л. Верещагин, А. А. Иванов</i> Снижение потерь при переработке крупноплодного зерна гречихи136
<i>Г. М. Свириденко, А. Н. Шишикина, В. В. Калабушкин, Е. В. Алексеева</i> Влияние белковых компонентов на функциональные свойства молокосодержащих продуктов, произведенных по технологии термизированных сыров69	<i>С. В. Новоселов, Л. А. Маюргникова, Н. В. Исаева</i> Многоаспектная когнитивная модель для разработки нового хлебобулочного изделия в условиях процесса научно-инновационной деятельности142
<i>Л. И. Пусенкова, А. Д. Заграничная, О. Ю. Калужина</i> Перспективы технологической переработки яблок сортов и гибридов селекции Республики Башкортостан76	<i>Д. Б. Никитюк, Е. М. Щетинина, И. Ю. Тармазеева, А. С. Билялова</i> Изучение ассортимента и макронутриентного состава сухих смесей энтерального питания отечественного производства150
<i>В. Ф. Жукова, Т. В. Карман, М. Н. Адонина</i> Технология производства пряников, обогащенных нетрадиционным сырьем Северного Приазовья84	<i>Е. С. Серебренникова, Л. В. Анисимова</i> Определение оптимальных режимов гидротермической обработки зерна сорго155
<i>К. Е. Шевченко, Р. В. Дорофеев, Ю. М. Трубицына, Е. А. Кашилакова</i> Применение пропионовокислых бактерий при разработке облепихового напитка92	<i>Т. Г. Причко, Н. В. Дрофичева</i> Закономерности изменения показателей качества фруктов после лиофильной сушки161
	<i>З. Н. Хатко, Т. А. Белявцева, Д. М. Бегеретова, Е. М. Колодина, С. К. Кудайнетова, Н. Н. Бугаева</i> Исследование влияния видов пектиновых веществ и их комбинаций на функциональные свойства для применения в безалкогольных профилактических напитках ... 168

РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

E. Г. Афонин Ацетаты никеля и ацетатные электролиты для получения покрытий никелем ...	178	М. С. Василишин, А. В. Балахнина, О. С. Иванов, А. Г. Карпов, А. А. Антонникова Исследование расширения и гидравлического сопротивления пульсирующего слоя ацетилсалициловой кислоты	238
А. А. Левагина, Е. В. Арыщенский, С. В. Кононков, А. М. Дриц, М. С. Тептерев Исследования формирования микроструктуры и свойств при производстве ленты из сплава Al-2Cu-2Mn	187	Е. А. Бобина, М. П. Данилаев, В. А. Куклин, И. В. Лунев, К. В. Файзуллин, А. М. Ямаев О возможности диагностики структуры макромолекул полимеров методом диэлектрической спектроскопии	242
С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, С. А. Земляков, М. Н. Зенин, А. М. Гурьев Оценка влияния содержания углерода, марганца и кремния в углеродистых сталях на параметры диффузии при борировании	197	Е. П. Неустроев, И. И. Куркина, Д. В. Николаев Формирование защитной углеродной пленки на поверхности графена методом плазменного осаждения и термообработки	247
Ю. А. Шлярова, В. В. Шляров, И. А. Панченко, Ю. Ф. Иванов, Д. В. Загуляев, А. Н. Прудников Эволюция поверхностного слоя системы Al-15%Si – Y₂O₃ после комбинированной обработки	203	Р. В. Барсуков, Р. Н. Голых, А. Р. Барсуков, А. Н. Сливин, В. А. Шакура Влияние кавитационных явлений и вторичных акустических эффектов на процесс деформации полимерных материалов в присутствии ультразвуковых колебаний высокой интенсивности	251
А. С. Сивак, С. Г. Калганова, Ю. А. Кадыкова, С. В. Тригорлык, Т. П. Сивак, Е. Ю. Васинкина Математическое моделирование процесса диссипации СВЧ-энергии при термообработке высокоэнергетических радиопоглощающих композитов	212	А. Р. Луц Разработка дисперсно армированного композиционного материала АМ4,5Кд-10%ТiС с улучшенными трибологическими характеристиками	256
С. В. Степанова, И. Г. Шайхеев, В. А. Сомин Совершенствование технологии реагентной очистки сточных вод от красителей	220	Д. В. Сухоруков, Е. С. Прусов, В. Б. Деев, У. Ш. Вахидов Повышение износостойкости модельной оснастки из полимерных композиционных материалов	262
В. Н. Хмелёв, А. В. Шалунов, С. Н. Цыганок, А. А. Синкин Направленный ультразвуковой излучатель для газовых сред	225	А. Н. Блазнов, Е. А. Головина, Д. А. Савин, Н. В. Бычин Повышение огнестойкости полимерных композитов	267
Д. П. Скорикова, Ю. С. Лазуткина, О. М. Горелова Исследования по применению флокуляции для восстановления пресноводных озер	232	АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	272

CONTENTS

SECTION 1. FOOD TECHNOLOGY

<i>I. Yu. Reznichenko, T. A. Miroshina</i> Development and quality evaluation of nut candies with bee products.....	7	<i>D. A. Koch, Zh. A. Koch</i> Homogeneous apple paste from small-fruited apple trees in the production of jelly marmalade	97
<i>M. A. Vaytanis, Z. R. Khodyreva</i> Development of technology for multi-component minced meat products with hemp flour.....	16	<i>V. P. Vistovskaya, D. S. Kozhemyakin, E. P. Kamenskaya</i> Optimization of sunflower husk enzymolysis parameters through the use of mathematical modeling methods	103
<i>L. G. Eliseeva, N. O. Rakov, P. I. Tokarev, D. S. Kokorina, A. H. Sokolova, T. A. Santuryan</i> Investigation of the effect of packaging with modified atmosphere and humidity on shelf life and quality during storage of Hass avocado fruits	24	<i>E. O. Ermolaeva, E. Yu. Titorenko</i> Improvement of safety methods in the operation of equipment using SMED	110
<i>L. Ch. Burak</i> Prospects for using supercritical carbon dioxide technology in food industry. Subject field overview.	32	<i>A. S. Zakharova, S. I. Koneva</i> Investigation of the characteristics of food systems for functional biscuits	120
<i>M. G. Kurbanova, S. S. Ryazanov, R. V. Kryuk, A. D. Balaba</i> A new approach to determining the qualitative characteristics of chicken breast meat	51	<i>V. G. Kurtseva, M. N. Kolesnichenko</i> Reduction of losses during processing of large-fruited buckwheat grain	127
<i>E. D. Rozhnov, M. N. Shkolnikova, V. N. Abbazova, V. L. Zakharov</i> Dried fermented semi-finished product from pumpkin pulp as a base for food syst.....	58	<i>V. A. Marin, A. L. Vereshchagin, A. A. Ivanov</i> Reduction of losses during processing of large-fruited buckwheat grain	136
<i>G. M. Sviridenko, A. N. Shishkina, V. V. Kalabushkin, E. V. Alekseeva</i> Influence of protein components on functional properties of milk-containing products produced using thermized cheese technology	69	<i>S. V. Novoselov, L. A. Mayurnikova, N. V. Isaeva</i> Application of a multidimensional cognitive model for the formation of an image of a new food product in the context of scientific and innovative activity	142
<i>L. I. Pusenkova, A. D. Zagranichnaya, O. Yu. Kaluzhina</i> Prospects of technological processing of apple varieties and hybrids of the republic of bashkorto-stan selection	76	<i>D. B. Nikityuk, E. M. Shchetinina, I. Yu. Tarmaeva, A. S. Bilyalova</i> Study of the assortment and macronutrient composition of dry enteral nutrition mixtures of domestic production	150
<i>V. F. Zhukova, T. V. Karman, M. N. Adonina</i> Technology of producing gingerbread enriched with non-traditional raw materials of the Northern Azov Region	84	<i>E. S. Serebrenikova, L. V. Anisimova</i> Determination of optimal modes of hydrothermal treatment of sorghum grain....	155
<i>K. E. Shevchenko, R. V. Dorofeev, Ju. M. Trubitsyna, E. A. Kashlakova</i> Use of propionic acid bacteria in the development of sea buckthorn drink.....	92	<i>T. G. Prichko, N. V. Droficheva</i> Regularities of changes in the quality indicators of fruits after freeze drying	161
<i>Z. N. Khatko, T. A. Belyavtseva, Ju. M. Begeretova, E. M. Kolodina, S. K. Kudainetova, N. N. Bugaeva</i> Investigation of the effect of types of pectin substances and their combinations on functional properties for use in non-alcoholic preventive drinks	168		

SECTION 2. CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

<i>E. G. Afonin</i>	
Nickel acetates and acetate electrolytes for nickel plating	178
<i>A. A. Levagina, E. V. Aryshenski, S. V. Konovalov, A. M. Drits, M. S. Tepterev</i>	
Studies of microstructure and properties formation during production of Al-2Cu-2Mn alloy stripnts	187
<i>S. G. Ivanov, M. A. Guriev, S. A. Zemljakov, M. N. Zenin, A. M. Guriev</i>	
Effect of the carbon, manganese and silicon content in carbon steels on the diffusion parameters of the diffusion boronizing layer	197
<i>Yu. A. Shliarova, V. V. Shlyarov, I. A. Panchenko, Y. F. Ivanov, D. V. Zaguliaev, A. N. Prudnikov</i>	
Evolution of the surface layer of the Al-15%Si – Y₂O₃ system after combined treatment	203
<i>A. S. Sivak, S. G. Kalganova, Yu. A. Kadykova, S. V. Trigorly, T. P. Sivak, E. Yu. Vasinkina</i>	
Mathematical modeling of the process of microwave energy dis-sipation during heat treatment of high-energy radio-absorbing composites	212
<i>S. S. Stepanova, I. G. Shaikhiev, V. A. Somin</i>	
Improvement of technology for reagent treatment of wastewater from dyes	220
<i>V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, S. N. Tsyganok, A. A. Sinkin</i>	
Directed ultrasonic transducer for gas environments	225
<i>D. P. Skorikova, Yu. S. Lazutkina, O. M. Gorelova</i>	
Studies on the application of flocculation for freshwater lake restoration	232
AUTHOR'S INDEX	272
<i>M. S. Vasilishin, A. V. Balahnina, O. S. Ivanov, A. G. Karpov, A. A. Antonnikova</i>	
Research of expansion and hydroresistance of pulsing bed of acetylsalicylic acid	238
<i>E. A. Bobina, M. P. Danilaev, V. A. Kuklin, I. V. Lounev, K. V. Fayzullin, A. M. Yamaev</i>	
Possibility of polymer macromolecules structure diagnostics by dielectric spectroscopy method	242
<i>E. P. Neustroev, I. I. Kurkina, D. V. Nikolaev</i>	
Formation of protective carbon film on the surface of graphene by plasma deposition and heat treatment	247
<i>R. V. Barsukov, R. N. Golykh, A. R. Barsukov, A. N. Slivin, V. A. Shakura</i>	
Influence of cavitation phenomena and secondary acoustic effects on the process of polymeric materials deformation in the presence of high-intensity ultrasonic oscillations	251
<i>A. R. Luts</i>	
Development of a dispersed reinforced composite material AM4.5Kd-10%TiC with improved tribological characteristics	256
<i>D. V. Sukhorukov, E. S. Prusov, V. B. Deev, U. Sh. Vakhidov</i>	
Enhancing the wear resistance of polymer compo-site foundry pattern	262
<i>A. N. Blaznov, E. A. Golovina, D. A. Savin, N. V. Bychin</i>	
Increasing the fire resistance of polymer compositions	267



РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Научная статья

4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)

УДК 664.149:638.167

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.001

EDN: DENVBH

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОРЕХОВЫХ КОНФЕТ С ПРОДУКТАМИ ПЧЕЛОВОДСТВА

Ирина Юрьевна Резниченко ¹, Татьяна Александровна Мирошина ²

^{1, 2} Кузбасский государственный аграрный университет имени В. Н. Полецкова, Кемерово, Россия

¹ irina.reznichenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7486-4704>

² intermir42@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5152-0868>

Аннотация. Профилактика и защита организма человека от неинфекционных заболеваний связана с формированием сбалансированного рациона. Цель работы заключалась в разработке и оценке качества конфет неглазированных с включением пчелопродуктов. В качестве методов испытаний применяли стандартные методы анализа показателей качества и безопасности конфет, дополнительно проведена балловая оценка модельных образцов для выявления лучшего. При выборе сырья основывались на пищевой, в том числе биологической ценности ингредиентов, вкусовой совместимости, отсутствия подобного рецептурного состава в существующем ассортименте конфет. В результате разработаны рецептура и технология конфет ручной работы функциональной направленности и повышенной биологической ценности, определены сроки хранения готовой продукции. Обоснована возможность исключения сахара из рецептуры путем его замены на продукты пчеловодства (мед в количестве 15 %, перга в количестве 10 %). Предложен состав и технология конфет ручной работы с добавлением семян тыквы, подсолнечника, ореха кедрового, фиников, перги и меда, сушеных ягод клюквы. Исследованы показатели качества и пищевая ценность конфет. Установлено, что включение в рацион от одной до двух конфет (25–50 г) способствует удовлетворению суточной потребности в фосфоре и магнии от 14 до 28 %, железе – от 6 до 12 %, пищевых волокнах – от 3 до 6 %. Продукт является источником калия, кальция и витамина В₂, характеризуется высоким содержанием магния, фосфора, витамина В₁, вследствие чего может позиционироваться как продукт питания функциональной направленности.

Ключевые слова: конфеты, мед, перга, рецептура, показатели качества, сроки хранения, пищевая ценность, функциональная направленность.

Для цитирования: Резниченко И. Ю., Мирошина Т. А. Разработка и оценка качества ореховых конфет с продуктами пчеловодства // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 7–14. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.001. EDN: <https://elibrary.ru/DENVBH>.

Original article

DEVELOPMENT AND QUALITY EVALUATION OF NUT CANDIES WITH BEE PRODUCTS

Irina Yu. Reznichenko ¹, Tatyana A. Miroshina ²

^{1, 2} Kuzbass State Agrarian University named after V. N. Poletskov, Kemerovo, Russia

¹ irina.reznichenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7486-4704>

² intermir42@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5152-0868>

Abstract. Prevention and protection of the human body from non-infectious diseases is associated with the formation of a balanced diet. The purpose of the work was to develop and evaluate the quality of uncoated sweets containing bee products. Standard methods for analyzing the quality and safety indicators

of sweets were used as test methods. An additional scoring of model samples was carried out to identify the best one. When choosing raw materials, we were based on the nutritional value, including the biological value of the ingredients, taste compatibility, and the absence of a similar recipe composition in the existing assortment of sweets. As a result, a recipe and technology for handmade sweets with a functional focus and increased biological value were developed, and the shelf life of the finished product was determined. The possibility of excluding sugar from the recipe by replacing it with bee products (honey in the amount of 15 %, bee-bread in the amount of 10 %) is justified. The composition and technology of handmade sweets with the addition of pumpkin seeds, sunflowers, pine nuts, dates, bee-bread, honey, and dried cranberries is proposed. The quality indicators and nutritional value of sweets have been studied. It has been established that the inclusion of one to two sweets (25-50 g) in the diet helps to satisfy the daily requirement for phosphorus and magnesium from 14 to 28 %, iron - from 6 to 12 %, dietary fiber - from 3 to 6 %. The product is a source of potassium, calcium and vitamin B2. It is characterized by a high content of magnesium, phosphorus, and vitamin B1, as a result of which it can be positioned as a functional food product.

Keywords: candies, honey, bee bread, recipe, quality indicators, shelf life, nutritional value, functional orientation.

For citation: Reznichenko, I. Yu. & Miroshina, T. A. (2025). Development and quality evaluation of nut candies with bee products. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 7-14. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.001. EDN: <https://elibrary.ru/DENVBN>.

ВВЕДЕНИЕ

Конфеты всегда занимали основной сегмент в структуре ассортимента сахаристых кондитерских изделий. Современное развитие ассортимента конфет связано с повышением пищевой ценности, снижением калорийности, приданием функциональной направленности, что согласуется с требованиями потребителей к полезной для здоровья продукции.

Применение продуктов пчеловодства в технологии конфет является интересным направлением исследования в плане замены добавленного сахара и повышения биологической ценности продукции.

Имеются научные данные, подтверждающие целесообразность использования продуктов пчеловодства в технологиях кондитерских сахаристых изделий. Изучена возможность применения меда в составе фруктово-желейных конфет с брусникой, лимонником китайским, яблоком и плодами актинидии коломикты. Установлено, что конфеты имеют пониженную энергетическую ценность (182,0–184,0 ккал), однако не сказано, был ли заменен сахар в рецептуре полностью или частично [1]. Предложен состав начинки с ламинацией японской, медом, сухофруктами (курагой, черносливом, манго, финиками) для глазированных конфет. Анализ витаминного состава конфет показал высокую долю тиамина, колабамина, рибофлавина, биотина при содержании меда 14 %, ламинации японской 60 %, отдельных сухофруктов 14 %, глазури 12 % в составе рецептуры [2]. Оценена возможность замены 60 % сахара на мед в рецептуре формового желейного мармелада с кедровым орехом (6 % от массы сахара), установлено, что по сравнению с традицион-

ной продукцией, разработанный мармелад имеет повышенное содержание белков, витаминов группы В, пищевых волокон [3].

Другой вектор изучения связан с использованием ягодного и орехового сырья в составе конфет. Показано, что применение кедровых орехов и плодово-ягодного сырья в технологии грильяжных конфет позволяет повысить пищевую ценность [4]. Предложена технология конфет ручной работы пониженной калорийности и функциональной направленности с добавлением свежих ягод черной смородины и порошка кероба [5]. Установлено, что конфеты содержат высокую долю пищевых волокон и аскорбиновой кислоты.

Использование плодов питахайи в сочетании с медом в технологии мармелада показало значительное влияние меда на цветовые характеристики готового продукта, однако сенсорное впечатление оставалось приемлемым [6].

Исследована возможность замены белого сахара на мед монофлорный в технологии мармелада, проведен анализ качества и исследованы реологические характеристики. Установлено повышение пищевой ценности [7].

Проведены исследования показателей качества и пищевой ценности смеси кизила и меда с целью дальнейшего применения в качестве пищевой добавки в технологиях мармелада, джема, конфет. Благодаря высоким антиоксидантным, противоаллергическим, antimикробным и антигистаминным свойствам показана функциональная направленность добавки, которая также богата железом, медью, цинком [8].

Установлено, что замена тростникового сахара на натуральный мед в рецептуре поз-

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОРЕХОВЫХ КОНФЕТ С ПРОДУКТАМИ ПЧЕЛОВОДСТВА

воляет продлить сроки хранения джемов, варенья, мармелада, желе [9].

Проанализирована биологическая ценность композиций меда с пергой и сухофруктами. Мед с добавлением перги (15 %) позволяет получить продукт с высоким содержанием фенольных соединений (150 мг/100г) и высокой антиоксидантной активностью. Смесь меда с сухой вишней (40 %) характеризуется повышенным содержанием фенолов и флавоноидов, содержание которых повышается благодаря вишне – источнику антиоксидантов [10].

Вышесказанное свидетельствует о том, что продукты пчеловодства находят применение в технологии сахаристых кондитерских изделий в качестве заменителя сахара и добавки, улучшающей пищевую ценность и продляющей сроки хранения.

Цель исследований – разработка научно-обоснованной рецептуры ореховых конфет повышенной пищевой ценности и функциональной направленности с продуктами пчеловодства.

Исследования проводили в ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный аграрный университет им. В. Н. Полецкова».

МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись модельные образцы ореховых конфет, приготовленных в лабораторных условиях кафедры биотехнологий и производства продуктов питания Кузбасского государственного аграрного университета им. В. Н. Полецкова.

Для приготовления образцов применяли следующее сырье: мед (ГОСТ 19792-2017), перга (ГОСТ 31776-2012); финики сушеные без косточек (СТО 0202067076-003-2021); кедровый орех очищенный (ГОСТ 31852-2012); семена подсолнечника очищенные сырье (ТУ 9146-003-24952240-2005), семена тыквы очищенные (ТУ 9164-003-764440635-2016), клюква сушеная (ГОСТ 32896-2014). В качестве методов исследования опирались на стандартные методы анализа. Органолептические показатели (вкус и запах, форма, внешний вид) определяли по ГОСТ 45570-2014. Содержание сухих веществ определяли по ГОСТ 5900-2014 методом высушивания в сушильном шкафу.

Полученные в результате исследований данные обрабатывали с применением статистического метода обработки экспериментальных данных, определяя средние значения вычисляемой величины на основе не менее трех повторных определений. Статисти-

ческий анализ данных проведен с помощью Excel 2013.

Процедура исследований. На первом этапе исследования обобщили научные данные по биологической ценности рецептурных ингредиентов. Далее проведены экспериментальные исследования по разработке рецептуры конфет с учетом высоких сенсорных характеристик и сбалансированной пищевой ценности. На следующем этапе исследований определены качественные показатели и установлен срок хранения разработанных изделий. На заключительном этапе определена пищевая ценность предложенных образцов, выделена функциональная направленность.

При установлении сроков хранения разработанного изделия определяли показатели качества через каждые три дня в течение месяца. При этом изделия хранили упакованными в полиэтиленовую пленку при температуре 18 ± 3 °С и относительной влажности воздуха не более 75 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Конфеты – это общий термин, который относится к формованным сахаристым кондитерским изделиям из одной или нескольких конфетных масс, определяющих идентификационный признак конфеты. Путем подбора ингредиентов можно изменить питательную ценность конфет и сформировать новые вкусовые характеристики.

В ходе исследования изготовлены конфеты с добавленной пищевой ценностью. При подборе сырьевых ингредиентов основывались на их пищевой ценности, вкусовой совместимости компонентов, отсутствия подобного рецептурного состава в существующем ассортименте ореховых конфет неглазированных на потребительском рынке.

Сахар из рецептуры конфет исключили, заменив его на мед. Мед также играл роль связующего компонента. Кедровые орехи, семена подсолнечника и семена тыквы богаты жирами. Мед, финики сушеные содержат большое количество сахаров. Ягоды клюквы сушеные придают продукту отличительные сенсорные вкусовые характеристики.

Выбор орехов основывался на данных, полученных в ходе последних исследований, предполагающих корреляцию между потреблением орехов и снижением риска основных хронических заболеваний [11]. Орехи являются источником клетчатки, а пищевые волокна связанны со снижением случаев ожирения и сердечно-сосудистых заболеваний. Орехи обеспечивают рацион минералами и витаминами, а

также фитохимическими веществами, которые действуют как антиоксидантные, противовоспалительные, фитоэстрогенные агенты и другие защитные механизмы.

Кедровые орехи характеризуются низким содержанием углеводов, высоким содержанием жиров. Другие питательные вещества в кедровых орехах включают от 1 до 5 г пищевых волокон, высокое содержание минеральных веществ и витаминов. Кедровые орехи благодаря сбалансированному сочетанию питательных веществ, наличию важных минералов, таких как магний и калий, помогают предотвратить сердечные приступы и диабет. Другие антиоксиданты орехов полезны для беременных женщин, укрепляют иммунитет, зрение, здоровье кожи и волос [12].

Семена тыквы как в целом, так и в измельченном виде нашли широкое применение в технологиях пищевых продуктов благодаря их пищевой ценности. Достоинством семян тыквы является их гипоаллергенность, большое содержание фосфора, магния, железа. Тыквенные семечки – богатый источник аминокислот, в особенности триптофана, тыквенный протеин считается натуральным антидепрессантом [13, 14].

Семена подсолнечника служат белковым обогатителем в составе пищевых продуктов. Исследования биологической ценности белковых компонентов семян подсолнечника различных видов показали, что первой лимитирующей аминокислотой белка является лизин, второй лейцин. Содержание лизина составляет от 2,0 до 4,2 г/кг. Количество изолейцина, валина в белке семян находится в пределах 45,8–52,6 % от общего числа незаменимых аминокислот, треонина – 71,4 %. Средняя биологическая ценность белка семян подсолнечника находится в диапазоне 56,4–62,2 %, характеризуется сбалансированностью незаменимых аминокислот по отношению к эталону [15].

Финики являются отличным источником питательных веществ и пользы для здоровья. Финики содержат углеводы, пищевые волокна, белки, жиры, минералы и витамины, ферменты, фенольную кислоту и каротиноиды, особенно богаты витаминами А, В₆ и К. Эти витамины способствуют росту и укреплению костей и улучшают здоровье глаз. Кроме того, финики содержат кальций, железо, калий, марганец, магний, фосфор, медь и серу, улучшающие общую функцию организма. Функциональные свойства фиников включают антиоксидантную, противовоспалительную,

противоопухоловую, антигипертензивную и противомикробную активность [16, 17].

Мед использовали в качестве заменителя сахара, потому что он имеет высокое содержание фруктозы и более высокую сладость, чем рафинированный сахар. Иммуномоделирующие свойства меда и его биологическая ценность достаточно хорошо изучены и описаны в научной литературе [18].

Перга, как продукт пчеловодства, характеризуется лечебно-профилактическими свойствами. Химический состав перги разнообразен и зависит от многих факторов (условий сбора, географического положения, технологии обработки и др.) [19, 20]. Перга темно-коричневого цвета, пластична, обладает медовым ароматом с легкой кислинкой, может придавать продукту не только вкусовые свойства, но и участвовать в формировании структуры. Перга содержит аминокислоты (изолейцин, валин, лейцин), витамины группы В, жирорастворимые витамины Д, К, Е, органические кислоты, фенольные соединения. Суточная рекомендуемая норма употребления перги составляет 2–3 г. [21]. Перга находит широкое применение в медицине как лекарственное средство [22–24].

Клюква является богатым источником различных минералов, витаминов, органических кислот, сахаров и полифенолов. Она оказывает потенциальное антиоксидантное, противовоспалительное, противожировое, антидиабетическое, противомикробное, гепатопротекторное, кардиопротекторное, нейропротекторное и противораковое действие. Выделяются бактерицидные, бактериостатические свойства, которые оказывают противоинфекционное и противовоспалительное действие на мочевыделительную систему человека [25, 26].

Характеристика пищевой ценности (усредненные данные) применяемого в рецептуре сырья приведена в таблице 1.

В рецептуре такие ингредиенты, как мед и финики, играют определенную технологическую роль, так как придают необходимую консистенцию продукту и содержат наибольшее количество сахаров [27]. Жирами наиболее богаты семена подсолнечника, кедровые орехи, семена тыквы. Наибольшее количество пищевых волокон находится в финиках, семенах тыквы и кедровых орехах. Подбирая минеральный состав, учитывали, что калий и магний являются элементами союзниками, а соотношение кальция и магния должно составлять 2:1 [28].

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОРЕХОВЫХ КОНФЕТ С ПРОДУКТАМИ ПЧЕЛОВОДСТВА

Таблица 1 – Характеристика пищевой ценности сырьевых ингредиентов

Table 1 – Characteristics nutritional value of raw ingredients

Наименование пищевого вещества	Характеристика сырьевых ингредиентов						
	Перга	Мед	Семена подсолнечника	Финики сушеные	Кедровый орех	Семена тыквы	Клюква сушеная
Белки, г	21,0	0,8	20,7	2,5	18,6	30,2	0,1
Углеводы, г	34,0	80,3	3,0	69,2	4,0	4,7	76,7
Пищевые волокна, г	1,0		5,0	6,0	5,0	6,0	3,3
Жиры, г	1,6		52,9	0,5	68,6	49,1	1,4
Калий, мг	1750,0	36,0	647,0	370,0	780,0	809,0	119,0
Кальций, мг	750,0	14,0	367,0	65,0	11,0	46,0	14,0
Магний, мг	420,0	3,0	317,0	69,0	270,0	592,0	15,0
Фосфор, мг	840,0	18,0	530,0	56,0	650,0	1233,0	11,0
Железо, мг	1,2	0,8	6,1	1,5	5,6	8,82	0,60
В 1	3,5	0,01	1,84	0,05	0,73	0,273	0,02
В 2	2,0	0,03	0,18	0,05	0,19	0,153	0,02
В ₅	8,0	0,13	1,13	0,8	0,31	0,75	0,29
Е	170,0	-	1,8	0,3	13,65	2,18	1,0
РР	20,0	0,2	15,7	1,9	3,8	4,98	0,3
С	175,0	2,0	1,4	0,3	0,8	1,9	15,0

При моделировании рецептур изменяли соотношение перги, кедровых орехов, семян подсолнечника и семян тыквы для получения продукта повышенной пищевой ценности. Также при моделировании состава образцов конфет анализировали влияние различных дозировок сырьевых компонентов на сенсорные характеристики продукта. Конфеты готовили путем смешивания всех ингредиентов, дальнейшего формования в пласт толщиной от 1,0 до 1,5 мм, охлаждения и разрезания на отдельные изделия.

Составы модельных образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Соотношение сырьевых компонентов для приготовления образцов

Table 2 – Ratio of raw materials for sample preparation

Наименование сырья	Расход сырья, г		
	Образец №1	Образец №2	Образец №3
Перга	15	15	10
Кедровые орехи	15	15	15
Семена подсолнечника	15	15	15
Семена тыквы	15	15	15
Клюква сушеная	–	5	15
Финики	15	15	15
Мёд	25	15	15
Итого	100	100	100

В модельных образцах определяли органолептические показатели качества путем дегустационной оценки по 30-балловой шкале, согласно которой показатель внешний вид оценивался максимально в 6 баллов, минимально – в 3 балла, форма – от 3 до 1 балла,

вкус, запах – от 15 до 9 баллов, консистенция – от 6 до 3 баллов [29]. Визуализация дегустационной оценки представлена на профилограмме (рисунок 1).

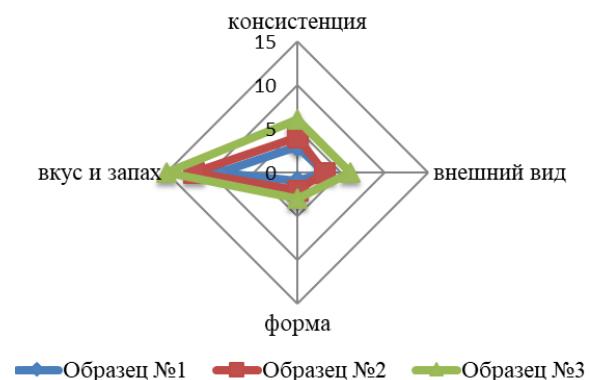


Рисунок 1 – Профилограмма органолептической оценки образцов

Figure 1 – Profilogram of organoleptice valuation of samples

У образца № 1 консистенция мягкая, несвязная, поверхность липкая, форма конфет не сохранялась при разделке. У образца № 2 консистенция мягкая, поверхность нелипкая, форма при разделке сохранялась, но при упаковывании конфет изделия деформировались. Вкус сладкий ярко выраженный, чуть приторный. Наилучшими показателями обладал образец № 3, вкус гармоничный, сладкий приятный с небольшой кислинкой, поверхность конфет не липкая, консистенция мягкая, пластичная связная, деформация формы отсутствует. Фотография образца приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Фотографии образцов

Figure 2 – Photos of samples

Анализ массовой доли влаги в образце № 3 показал, что она составляет 26,3 %, что не превышает допустимый уровень 30,0 % для

Таблица 3 – Показатели безопасности продукта

Table 3 – Product safety indicators

Наименование показателя	Срок хранения	
	0 суток	35 суток
Количество МАиФАМ, КОЕ/г, не более 5×10^3	$2,3 \times 10^3$	Менее 3×10^1
Бактерии группы кишечных палочек, не допускаются в массе продукта, г - 0,1	$0,1 \times 10^{-2}$	Отсутствуют
Плесени, КОЕ/г, не более 100	Отсутствуют	Отсутствуют
Дрожжи, КОЕ/г, не более 50	Отсутствуют	Отсутствуют

Таблица 4 – Пищевая ценность и функциональная направленность конфет ореховых

Table 4 – Nutritional value and functional orientation of nut sweets

Наименование пищевого вещества	Содержание в 100 г продукта/ на 25 г	% удовлетворения ФНП	Функциональная направленность
Белки	10,35/2,6	13,8/3,45	
Жиры	26,0/6,5	31,0/7,8	
Углеводы	39,0/9,7	10,7/2,6	
Пищевые волокна	3,9/1,0	13,0/3,25	Высокое содержание
Витаминно-минеральный состав, мг			
Калий	431,5/ 108,0	12,3/3,0	Источник
Кальций	152,5/ 38,1	15,25/3,8	
Железо	3,6/0,9	25,7/6,4	
Фосфор	458,7/114,6	57,3/14,3	Высокое содержание
Магний	232,0/58,0	58,0/14,5	
B ₁ - тиамин	0,76/0,2	54,0/13,5	
B ₂ рибофлавин	0,27/0,07	16,8/4,2	Источник
B ₅ пантотеновая кислота	1,33	22,1/5,5	
С	20,7	27,0/6,7	
Е токоферол	19,8	132/33,0	Высокое содержание
РР	6,0	40,0/10,0	
Энергетическая ценность, ккал	440,0	17,6/4,4	

ВЫВОДЫ

Учитывая пищевую ценность полученного продукта на маркировке конфет можно указывать информацию об отличительных признаках пищевой продукции. Конфеты ореховые являются источником калия, кальция, железа, витаминов B₂, B₅ и аскорбиновой кислоты (которые составляют не менее 15 % потребности взрос-

лого человека в витаминах и минеральных веществах на 100 г пищевой продукции), а также продуктами с высоким содержанием (более 30 % средней суточной потребности взрослого человека в витаминах и минеральных веществах на 100 г для твердой пищевой продукции). Таким образом, разработанные конфеты без сахара являются продуктом функциональной направленности [30, 31].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пулинец Е. К., Рассказова Н. Т., Сурупа Н. А. Использование местного растительного сырья при приготовлении фруктово-желейных конфет с медом // Аграрный вестник Приморья. 2019. № 2 (14). С. 28.
2. Дементьева Н. В., Бойцова Т. М. Разработка рецептур и технологии конфет с повышенной пищевой ценностью из ламинарии японской // Индустрия питания / FoodIndustry. 2022. Т. 7. №. 3. С. 18–24.
3. Захарова А. С., Егорова Е. Ю. Медовый мармелад с ядром кедровых орехов // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 20–26. doi 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.003.
4. Конева С. И., Козубаева Л. А., Егорова Е. Ю. К вопросу о повышении пищевой ценности конфет плодово-ягодными компонентами // Ползуновский вестник. 2018. № 2. С. 8–12. doi 10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.002.
5. Костина М. В., Тамова М. Ю., Чумак А. А. Разработка технологии и рецептур конфет ручной работы с добавлением кэрбона // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2021. № 1(379). С. 52–55. doi 10.26297/0579-3009.2021.1.12.
6. Susanti, S., Najar, F. F. & Nurwantoro, N. (2021). Characteristic of Red Dragon Fruit Marmalade with Different Types of Sweeteners. Journal of Applied Food Technology, 8(1), 9–17.
7. Ganie, T. A., Wani, S. A., Rather, S. A., Masoodi, F. A., Siddiqui, S. A. & Ibrahim, S. A. (2022). Development of novel functional foods using Himalayan honey having enhanced nutraceutical and nutritional potential. Frontiers in Sustainable Food Systems, 6, 1006528.
8. Ahmetovic, M., Leko, E., Keran, H., Sestan, I., Odobašić, A., Canic, A. & Srabovic, E. (2020). Examination of physicochemical parameters of products based on cornelian cherry (*Cornus mas* L.) and honey. International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology (IJRASB), 7(5), 257–261.
9. Ayua, E. O. (2022). Substituting Natural Honey for Cane Sugar (Sucrose) Retards Microbial Growth Independent of Water Activity During Storage of Tomato Jam.
10. Molla, M. M., Sabuz, A. A., Khan, M. H. H., Chowdhury, M. G. F., Miaruddin, M., Alam, M. & Khatun, A. (2022). Effect of honey and lemon juice on the physicochemical, nutritional, microbial and antioxidant properties of guava-pineapple jelly during storage periods. Discover Food, 2(1), 31.
11. Dodevska, Margarita & Kukic, Jelena & Sofrenic, Ivana & Tešević, Vele & Jankovic, Milica & Djordjević, Brizita & Ivanovic, Nevena. (2022). OPEN ACCESS EDITED BY Similarities and differences in the nutritional composition of nuts and seeds in Serbia. Frontiers in Nutrition. 9. 10.3389/fnut.2022.1003125.
12. Arakelyan, Hayk. (2020). Siberian Pine Nuts (Pignolia Nuts) and Health.
13. Фёдорова Р. А. Качественная оценка биологической ценности тыквы при использовании в перерабатывающем производстве // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2020. № 2 (59). С. 22–26.
14. Усов А. В., Лифенцева Л. В., Смердов О. В. Исследование содержания витаминов в свежей и сушёной тыкве // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (138). С. 157–160.
15. Поморова Ю. Ю., Серова Ю. М. Сравнительная характеристика содержания незаменимых аминокислот, биологическая ценность белка семян подсолнечника селекции ВНИИМК // Масличные культуры. 2022. № 2 (190). С. 46–50.
16. Ayivi, Raphael & Ibrahim, Salam & Ayad, Amira & Williams, Leonard & Gyawali, Rabin & Krasstanov, Albert & Aljaloud, Sulaiman. (2020). Date fruit: A review of the chemical and nutritional compounds, functional effects and food application in nutrition bars for athletes. 10.1111/ijfs.14783.
17. Barakat, Hassan & Alfheeaid, Hani. (2023). Date Palm Fruit (*Phoenix dactylifera*) and Its Promising Potential in Developing Functional Energy Bars: Review of Chemical, Nutritional, Functional, and Sensory Attributes. Nutrients. 15. 2134. 10.3390/nu15092134.
18. Мирошина Т. А., Резниченко И. Ю., Мирошин Е. В. Иммуномоделирующие свойства меда. Обзор исследований биопотенциала // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2023. № 1(78). С. 62–67. doi 10.33979/2219-8466-2023-78-6-62-67.
19. Лизунова А. С., Митрофанов Д. В., Копчакова И. Н. Пыльцевая обножка и перга в практике врачей-психиатров // Пчеловодство. 2022. № 2. С. 52–54.
20. Получение медопыльцевого продукта в условиях пасек / В. А. Злепкин [и др.] // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 1(62). С. 110–115. doi 10.31677/2072-6724-2022-62-1-110-115.
21. Безопасный медопыльцевой продукт / В. А. Чучунов [и др.] // Пчеловодство. 2022. № 1. С. 50–51.
22. Изучение возможностей применения перги в медицине с последующей разработкой средства, повышающего иммунитет / Д. И. Шаврина [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия : Медицина. 2019. 23(4). С. 412–417.
23. Казанцева Д. В., Холодова Н. А., Крылова Е. В. Перспективы использования пчелиного маточного молочка и перги в условиях физических нагрузок // Современные проблемы пчеловодства и апитерапии. 2021. С. 384–389.
24. Сравнительная характеристика биологических свойств пчелиной обножки и перги с позиции поддержания саногенного статуса организма / А. Мантоптин [и др.] // Studia Universitatis Moldaviae (Seria Științe Reale știene Naturii). 2019. №1. С. 119–124.
25. Tiwari, Dr & Talreja, Shreya. (2023). Health Benefits of Cranberries: An In-Depth Overview. Health Science Journal. 17. 1057. 10.36648/1791-809X.17.9.1057.

26. Amin, Ruhul & Thalluri, Chandrashekhar & Anca Oana, Docea & Sharifi Rad, Javad & Calina, Daniela. (2022). Therapeutic potential of cranberry for kidney health and diseases. *eFood*. 3. 10.1002/efd2.33.
27. Резниченко И. Ю., Мирошина Т. А. Обоснование состава и технологических параметров приготовления мюсли-батончиков повышенной пищевой ценности // Ползуновский вестник. 2023. № 4, С. 62–69. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.008.
28. Препараты калия и магния при лечении сердечно-сосудистых заболеваний в практике врача первичного звена здравоохранения / А. М. Шилов [и др.] // РФК. 2010. № 5. С. 717–721.
29. Резниченко И. Ю. Теоретические и практические аспекты разработки, оценки качества кондитерских изделий и пищевых концентратов функционального назначения : дис ... д-ра тех. наук. Кемерово, 2008. 383 с.
30. Методические рекомендации МР 2.3.0253-2021 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения». Москва. 2021. 72 с.
31. ТР ТС 022/2011 «Пищевая продукция в части ее маркировки». ФГУП «Стандартинформ». Москва. 2014. 23 с.
- Информация об авторах**
- И. Ю. Резниченко – доктор технических наук, профессор кафедры «Биотехнологии и производство продуктов питания» ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный аграрный университет имени В. Н. Полецкого».
- Т. А. Мирошина – канд. педагог. наук, доцент кафедры педагогических технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный аграрный университет имени В. Н. Полецкого».

REFERENCES

1. Puliniec, E.K., Rasskazova, N.T. & Surupa, N.A. (2019). Use of local plant raw materials in the preparation of fruit-jelly sweets with honey. *Agrarian Bulletin of Primorye*, 2 (14), 28. (In Russ.).
2. Dement'eva, N.V. & Bojcova, T.M. (2022). Development of recipes and technology for sweets with increased nutritional value from Japanese kelp. *Food Industry*, 7(3), 18-24. (In Russ.).
3. Zaharova, A.S. & Egorova, E.YU. (2021). Honey marmalade with pine nut kernels. *Polzunovskiy vestnik*, 1, 20-26. (In Russ.). doi 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.003.
4. Koneva, S.I., Kozubaeva, L.A. & Egorova, E.YU. (2018). On the issue of increasing the nutritional value of sweets with fruit and berry components products. *Polzunovskiy vestnik*, 2, 8-12. (In Russ.). doi 10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.002.
5. Kostina, M.V., Tamova, M.YU. & CHumak, A.A. (2021). Development of technology and recipes for handmade sweets with the addition of carob. *News of higher educational institutions. Food technology*, 1(379), 52-55. (In Russ.). doi 10.26297/0579-3009.2021.1.12.
6. Susanti, S., Najar, F.F. & Nurwantoro, N. (2021). Characteristic of Red Dragon Fruit Marmalade with Different Types of Sweeteners. *Journal of Applied Food Technology*, 8(1), 9-17.
7. Ganie, T.A., Wani, S.A., Rather, S.A., Masoodi, F.A., Siddiqui, S.A., & Ibrahim, S.A. (2022). Development of novel functional foods using Himalayan honey having enhanced nutraceutical and nutritional potential. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1006528.
8. Ahmetovic, M., Leko, E., Keran, H., Sestan, I., Odobasic, A., Canic, A. & Srabovic, E. (2020). Examination of physicochemical parameters of products based on cornelian cherry (Cornus mas L.) and honey. *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology (IJRASB)*, 7(5), 257-261.
9. Ayua, E.O. (2022). Substituting Natural Honey for Cane Sugar (Sucrose) Retards Microbial Growth Independent of Water Activity During Storage of Tomato Jam.
10. Molla, M.M., Sabuz, A.A., Khan, M.H.H., Chowdhury, M.G.F., Miaruddin, M., Alam, M. & Khatun, A. (2022). Effect of honey and lemon juice on the physicochemical, nutritional, microbial and antioxidant properties of guava-pineapple jelly during storage periods. *Discover Food*, 2(1), 31.
11. Dodevska, Margarita & Kukic, Jelena & Sofrenic, Ivana & Tešević, Vele & Jankovic, Milica & Djordjevic, Brizita & Ivanovic, Nevena. (2022). OPEN ACCESS EDITED BY Similarities and differences in the nutritional composition of nuts and seeds in Serbia. *Frontiers in Nutrition*. 9. 10.3389/fnut.2022.1003125.
12. Arakelyan, Hayk. (2020). Siberian Pine Nuts (Pignolia Nuts) and Health.
13. Fyodorova, R.A. (2020). Qualitative assessment of the biological value of pumpkin when used in processing production. *News of the St. Petersburg State Agrarian University*, 2 (59), 22-26. (In Russ.).
14. Usov, A.V., Lifenceva, L.V. & Smerdov, O.V. (2018). Study of vitamin content in fresh and dried pumpkin. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*, 3(138), 157-160. (In Russ.).
15. Pomorova, YU.YU. & Serova, YU.M. (2022). Comparative characteristics of the content of essential amino acids, biological value of sunflower seed protein of VNIIMK selection. *Oilseed crops*, 2 (190), 46-50. (In Russ.).
16. Ayivi, Raphael & Ibrahim, Salam & Ayad, Amira & Williams, Leonard & Gyawali, Rabin & Krastanov, Albert & Aljaloud, Sulaiman. (2020). Date fruit: A review of the chemical and nutritional compounds, functional effects and food application in nutrition bars for athletes. 10.1111/ijfs.14783.
17. Barakat, Hassan & Alfheeaid, Hani. (2023). Date Palm Fruit (*Phoenix dactylifera*) and Its Promising Potential in Developing Functional Energy Bars: Review of Chemical, Nutritional, Functional, and Sensory Attributes. *Nutrients*. 15. 2134. 10.3390/nu15092134.
18. Miroshina, T.A., Reznichenko, I.YU. & Miroshin, E.V. (2023). Immunomodeling properties of honey. Review of biopotential research. *Technology and commodity science of innovative food products*, 1(78), 62-67. (In Russ.). doi 10.33979/2219-8466-2023-78-6-62-67.
19. Lizunova, A.S., Mitrofanov, D.V. & Kopchaeva, I.N. (2022). Pollen and beebread in the practice of psychiatrists. *Beekeeping*, 2, 52-54. (In Russ.).
20. Zlepkin, V.A., CHuchunov, V.A., Radzievskij, E.B., Konoblej, T.V. & Gorbunov, A.V. (2022). Obtaining a honey-pollen product in apiary conditions. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*, 1(62),

- 110-115. (In Russ.). doi 10.31677/2072-6724-2022-62-1-110-115.
21. CHuchunov, V.A., Zlepkin, V.A., Radzievskij, E B. & Konoblej, T.V. (2022). Safe honey pollen product. *Bee-keeping*, 1, 50-51. (In Russ.).
22. SHavrina, D.I., Nesterova, N.V., Nesterova, O.V., Biryukova, N.V. & YAroshenko, A.A. (2019). Study of the possibilities of using beebread in medicine with the subsequent development of a means that increases immunity. *Bulletin of the Russian Peoples' Friendship University. Series: Medicine*, 23(4), 412-417. (In Russ.).
23. Kazanceva, D.V., Holodova, N.A. & Krylova, E.V. (2021). Prospects for the use of royal jelly and bee bread under conditions of physical activity. *Modern problems of beekeeping and apitherapy*, 384-389. (In Russ.).
24. Mantoptin, A., Furduj, V., Kovarski, N., Stroko-va, V., Televko, A. (2019). Comparative characteristics of the biological properties of bee pollen and bee bread from the position of maintaining the sanogenic status of the organism. *Studia Universitatis Moldaviae (Seria Științe Reale și ale Naturii)*, 1, 119-124. (In Russ.).
25. Tiwari, Dr. & Talreja, Shreya. (2023). Health Benefits of Cranberries: An In-Depth Overview. *Health Science Journal*. 17. 1057. 10.36648/1791-809X.17.9.1057.
26. Amin, Ruhul & Thalluri, Chandrashekhar & Anca Oana, Docea & Sharifi Rad, Javad & Calina, Daniela. (2022). Therapeutic potential of cranberry for kidney health and diseases. *eFood*. 3. 10.1002/efd2.33.
27. Reznichenko, I.YU. & Miroshina, T.A. (2023). Justification of the composition and technological parameters for the preparation of muesli bars of high nutritional value. *Polzunovskiy vestnik*, 4, 62-69. (In Russ.). doi 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.008.
28. SHilov, A.M., Mel'nik, M.V., Osya, A.O. & Lishuta, A.S. (2010). Potassium preparations and magnesium in the treatment of cardiovascular diseases in the practice of a primary doctor health care unit. *RFK*, 5, 717-721. (In Russ.).
29. Reznichenko, I.YU. (2008). Theoretical and practical aspects of the development, assessment of the quality of confectionery products and food concentrates for functional purposes: Doctor's thesis. Kemerovo. (In Russ.).
30. Methodological recommendations (2021). MP 2.3.0253-2021 "Norms of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population." Moscow. (In Russ.).
31. TR TS 022/2011 "Food products regarding their labeling." FSUE "Standartin-form". (2014). Moscow. (In Russ.).

Information about the authors

I.Yu. Reznichenko - Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Biotechnology and Food Production, Kuzbass State Agrarian University named after V. N. Poletskov.

T.A. Miroshina - Ph.D. Pedagog. Sci., Associate Professor of the Department of Pedagogical Technologies, Kuzbass State Agrarian University named after V. N. Poletskov.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ МЯСНЫХ РУБЛЕНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КОНОПЛЯНОЙ МУКОЙ

Марина Александровна Вайтанис ¹, Зоя Рафаиловна Ходырева ²

^{1, 2} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

^{1, 2} Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

¹ gazenauer@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5012-6304>

² rafailovna-1977@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6459-0271>

Аннотация. В рационе питания человека мясные продукты составляют незаменимую и неотъемлемую часть. Целью работы является исследование и разработка технологии поликомпонентных рубленых изделий из мяса кролика с растительным сырьем в виде конопляной муки. Объект исследования – поликомпонентные мясные рубленые изделия с конопляной мукой. Предмет исследования – органолептические показатели, влагоудерживающая и влагосвязывающая способность, pH; выход и потери рубленых изделий в процессе хранения. В статье приведена технологическая схема производства рубленых полуфабрикатов и изделий из мяса кролика с растительным сырьем. Проведена дегустационная оценка рубленых изделий (котлет), приготовленных разными способами тепловой обработки и с различными панировочными ингредиентами. Установлено, что максимальное количество баллов при всех способах тепловой обработки отмечается у образцов котлет, панированных в амарантовой, конопляной и рисовой муке. Определена согласованность мнений экспертной комиссии и подтверждена достоверность проведенной дегустационной оценки с помощью коэффициента конкордации. Установлено, что влагоудерживающая и влагосвязывающая способности панированных рубленых изделий выше на 11,6 % и на 3,2 % соответственно, чем контрольный образец (без панировки). Минимальные потери массы изделий (13,7 % и 16,6 %) отмечаются у образцов котлет, приготовленных сразу после формования и после предварительного охлаждения, что ниже установленных потерь для котлет при тепловой обработке (20,0 %). При хранении рубленых полуфабрикатов в замороженном состоянии увеличиваются потери готовых изделий, которые составляют 21,8 %.

Ключевые слова: мясо кролика, конопляная мука, рубленые изделия, панирование, органолептические, функционально-технологические показатели.

Для цитирования: Вайтанис М. А., Ходырева З. Р. Разработка технологии поликомпонентных мясных рубленых изделий с конопляной мукой // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 16–23. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.002. EDN: <https://elibrary.ru/DHPPBK>.

Original article

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MULTICOMPONENT MINCED MEAT PRODUCTS WITH HEMP FLOUR

Marina A. Vaytanis ¹, Zoja R. Khodyreva ²

^{1, 2} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

^{1, 2} Altai State University, Barnaul, Russia

¹ gazenauer@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5012-6304>

² rafailovna-1977@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5012-6304>

Abstract. Meat products are an indispensable and integral part of the human diet. The aim of the work is to research and develop the technology of multicomponent chopped rabbit meat products with vegetable raw materials in the form of hemp flour. The object of research is multicomponent minced meat products with hemp flour. The subject of the study is organoleptic parameters, moisture-retaining and moisture-

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ МЯСНЫХ РУБЛЕНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КОНОПЛЯНОЙ МУКОЙ

binding ability, pH; yield and loss of chopped products during storage. The article presents a technological scheme for the production of chopped semi-finished products and rabbit meat products with vegetable raw materials. A tasting evaluation of chopped products (cutlets) prepared by different methods of heat treatment and with various breadcrumbs ingredients was carried out. It was found that the maximum number of points for all types of heat treatment is noted in samples of cutlets breaded in amaranth, hemp and rice flour. The consistency of the opinions of the expert commission was determined and the reliability of the conducted tasting assessment was confirmed using the concordance coefficient. It was found that the water absorption capacity and water binding capacity of breaded chopped products are 11.6 % and 3.2 % higher, respectively, than the control sample (no breading). Minimal weight losses of products (13.7 % and 16.6 %) are observed in samples of cutlets prepared immediately after molding and after pre-cooling, which is lower than the established losses for cutlets during heat treatment (20.0 %). When storing chopped semi-finished products in a frozen state, losses of finished products increase, which amount to 21.8 %.

Keywords: rabbit meat, hemp flour, chopped products, breading, organoleptic, functional and technological indicators.

For citation: Vaytanis, M. A. & Khodyreva, Z. R. (2025). Development of technology for multicomponent minced meat products with hemp flour. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 16-23. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.002. EDN: <https://elibrary.ru/DHPPBK>.

ВВЕДЕНИЕ

Производство полуфабрикатов из мяса является одним из максимально развивающихся направлений в пищевой отрасли. Многими учеными совместно с производителями предлагаются потребителю «более здоровые» мясные продукты за счет внесения разнообразных растительных компонентов с целью получения продукции с низким содержанием жира, холестерина, повышенным количеством балластных и биологически активных веществ. В последнее десятилетие удалось создать большой ассортимент мясных изделий, получивших одобрение потребителей [1–3].

Использование рубленых полуфабрикатов имеет важное значение в организации производства предприятий общественного питания, что позволяет уменьшить нагрузку в заготовочных цехах, увеличить производительность предприятия в целом, сократить технологический процесс производства продукции и обеспечить стабильное высокое качество готовой продукции.

Расширение ассортимента рубленых изделий происходит за счет комбинирования мясной части с различными белковыми и крахмалсодержащими компонентами. Что, в свою очередь, позволяет получить изделия с улучшенными органолептическими и функционально-технологическими показателями и с высокой пищевой ценностью.

Происходящие изменения в образе жизни современного человека, а также совершенствование технологии производства продукции привели к увеличению спроса на полуфабрикаты, притом, что научно-прикладной проблемой является то, что эти продукты должны быть высококачественными, с понятным для потребителя составом, простыми в

приготовлении и с минимальным количеством пищевых добавок. В последнее время на первом месте стоит критерий пользы для здоровья таких полуфабрикатов, поэтому разработка рецептур поликомпонентных рубленых изделий на основе мяса кролика в комбинации с конопляной мукой является актуальным. Об этом свидетельствует анализ публикаций по данной тематике [2–5].

Мясо кролика считается одним из самых полезных видов мяса, оно обладает высокой биологической ценностью и полезными свойствами, его используют в диетическом и лечебном питании и рекомендуют включать в рацион людям всех возрастов [4, 7].

Мясо кролика по химическому составу приближена к мясу курицы, однако по содержанию белка и жира превосходит его. Кроме того, по усвояемости мясо кролика занимает одно из первых мест, поскольку организм человека усваивает ее на 90 %, а говядину – на 62 % [5–7].

Замена мяса кролика на растительный компонент в виде конопляной муки при производстве поликомпонентных рубленых полуфабрикатов и изделий является перспективным для здорового питания. Данный вид муки не только является безглютеновым, но и обогащает продукты множеством полезных витаминов, минералов, аминокислот, растительных жиров и пищевых волокон [5, 7, 9]. В составе конопляной муки присутствуют в оптимальном соотношении (1:3) полиненасыщенные жирные кислоты – омега-3 и омега-6, участвующие в работе всех органов и систем организма человека [5, 9, 10].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование и разработка технологии поликомпонентных рубленых изделий (кот-

лет) из мяса кролика с конопляной мукой, панированных различными ингредиентами.

ЗАДАЧИ ССЛЕДОВАНИЯ:

- разработать технологическую схему производства поликомпонентных рубленых полуфабрикатов и изделий на основе мяса кролика с конопляной мукой;
- составить рецептурные композиции рубленых изделий (котлет) из мяса кролика с растительным сырьем;
- провести сравнительную оценку по органолептическим показателям поликомпонентных рубленых изделий из мяса кролика с использованием различных панированных ингредиентов;
- исследовать качество котлет, выработанных из мяса кролика по основным функционально-технологическим характеристикам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе были использованы следующие объекты:

- туши кролика, по качеству соответствующие требованиям ГОСТ 27747-2016;
- конопляная мука, по качеству соответствующая требованиям СТО 68311059-011-2012 (ООО «Компас Здоровья»);
- рецептурные композиции рубленых изделий (котлет) из фарша на основе мяса кролика с конопляной мукой.

Сырье, используемое для приготовления поликомпонентных мясных рубленых изделий, соответствовало требованиям нормативно-технической документации на продукцию и ТР ТС 021/2011, ТР ТС 034/2013 [11, 12].

Основные функционально-технологические показатели в рубленых изделиях определяли по общепринятым методикам [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для реализации поставленной цели была составлена технологическая схема производства поликомпонентных рубленых полуфабрикатов и изделий из мяса кролика с конопляной мукой (рисунок 1). Согласно технологической схемы, представленной на рисунке 1 из фаршевой массы, полученной на основе мяса кролика с конопляной мукой, формировали полуфабрикаты (котлеты) в виде овально-приплюснутой формы с заостренным концом и панировали, используя различные панировочные ингредиенты. При подборе панировочного ингредиента ориентировались на сырье, не имеющее в своем составе глю-

тен. Для этой цели были использованы следующие панировочные ингредиенты: конопляная, амарантовая, льняная, овсяная, гречневая, кукурузная и рисовая мука. Предварительно подобранные панировочные ингредиенты просеивали (сито № 1). Полученные панированные полуфабрикаты подвергали охлаждению при температуре 4 ± 2 °С или замораживанию при температуре минут 8 °С или доводили до готовности.

Ранее в проведенных исследованиях было установлено, что замена мясной части на конопляную муку в количестве 15 % позволяет обеспечить наилучшие органолептические и функционально-технологические показатели фаршевой системы. Учитывая полученные результаты, были составлены рецептурные композиции рубленых изделий (котлет) из мяса кролика с конопляной мукой в количестве 15 % [7, 9].

Оценка качества рубленых изделий на основе мяса кролика с конопляной мукой проводилась после их тепловой обработки. Полученные образцы поликомпонентных рубленых изделий доводили до готовности, используя следующие виды тепловой обработки: жарка основным способом (температура 150–160 °С в течение 15–20 мин.), запекание в жарочном шкафу (температура 250–280 °С в течение 10–15 мин.) и приготовление на пару (температура 160 °С в течение 20 мин., влажность 100 %). Готовность рубленых полуфабрикатов контролировали путем измерения температуры в центре изделий (не ниже 90 °С).

Дегустационную оценку рубленых изделий (котлет), приготовленных различными способами тепловой обработки, проводили по 9-балльной шкале в соответствии с требованиями ГОСТ 9959-2015 (рисунки 2–4) [7, 9].

Согласно полученных результатов, представленных на рисунках 2–4, установлено, что подобранные панировочные ингредиенты оказывают влияние на органолептические характеристики готовых изделий (котлет).

Максимальные средние баллы отмечаются у образцов котлет, панированных в амарантовой, конопляной и рисовой муке. Данная тенденция отмечается при всех способах тепловой обработки. Наименьшие средние баллы получили образцы котлет, панированные в овсяной, гречневой и кукурузной муке в сравнении с контрольным образцом (без панировки). Образцы котлет, панированные с использованием кукурузной муки, имеют самые низкие баллы в сравнении с контрольным образцом (без панировки).

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ МЯСНЫХ РУБЛЕНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КОНОПЛЯНОЙ МУКОЙ

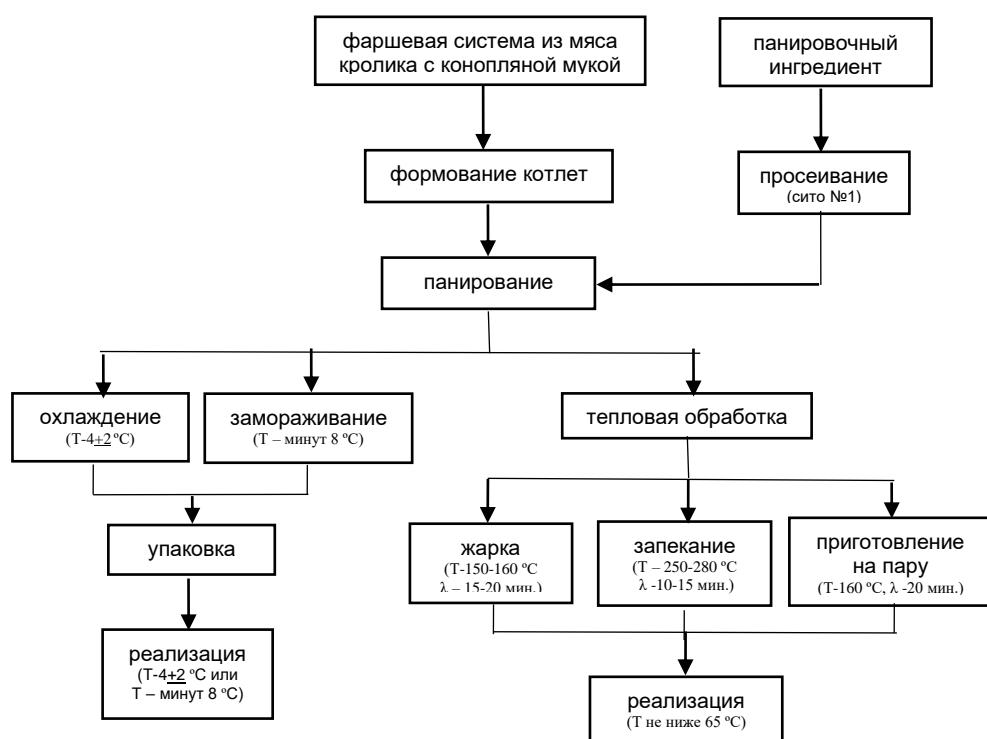


Рисунок 1 – Технологическая схема производства рубленых полуфабрикатов и изделий

Figure 1 – Technological scheme of production of chopped semi-finished products and products

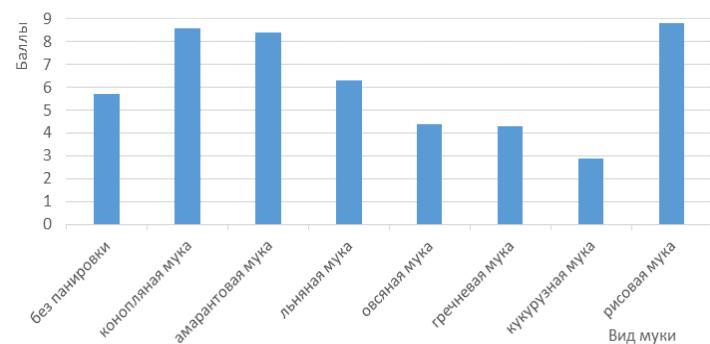


Рисунок 2 – Результаты органолептической оценки жареных котлет

Figure 2 – Results of organoleptic evaluation of fried cutlets

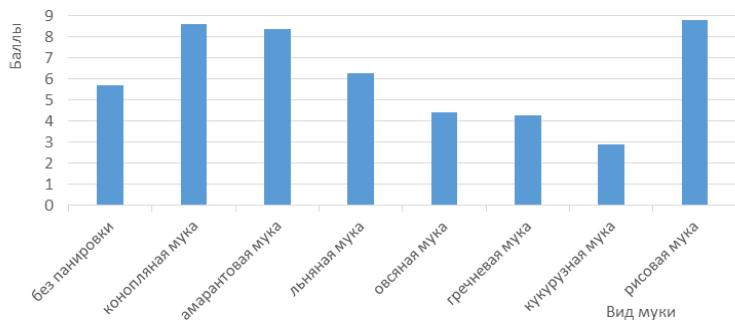


Рисунок 3 – Результаты органолептической оценки запеченных котлет

Figure 3 – Results of organoleptic evaluation of baked cutlets

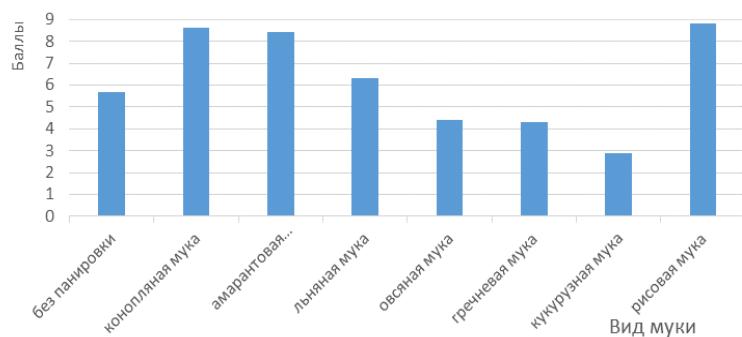


Рисунок 4 – Результаты органолептической оценки котлет, приготовленных на пару

Figure 4 – The results of the organoleptic evaluation of steamed cutlets

В ходе оценки органолептических показателей установили, что поверхность котлет при панировке ровная, без разорванных и ломаных краев и трещин, равномерно покрыта панировочным ингредиентом. Процесс панирования формованных полуфабрикатов после их термической обработки позволил сохранить правильную форму изделий. Панировка полуфабрикатов с использованием кукурузной муки придает изделиям грубоватую, жесткую текстуру поверхности при всех способах тепловой обработки. Рубленые изделия из мяса кролика с добавлением конопляной муки имеют мягкую, пластичную, однородную структуру.

Использование панировочного ингредиента в целом не оказывает влияние на запах и вкус котлет. Стоит отметить, что панировка полуфабрикатов в кукурузной и гречневой муке придает готовым изделиям ярко выраженный

вкус и запах, свойственный данным видам муки, и способствовала снижению баллов. Практически незначительное влияние на вкус и запах котлет, приготовленных различными способами тепловой обработки, также оказывает панировка в льняной и овсяной муке.

В результате изучения влияния различных способов тепловой обработки на органолептические характеристики рубленых изделий (котлет) получили, что панировочные ингредиенты – амарантовая, конопляная и рисовая мука – обеспечивают наилучшие органолептические показатели изделий.

Достоверность результатов проведенной дегустации исследуемых образцов определяли путем оценки согласованности мнений экспертной комиссии в составе 7 человек. Результаты оценки согласованности мнений экспертной комиссии представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оценки согласованности мнений экспертной комиссии

Table 1 – The results of the assessment of the consistency of the opinions of the expert commission

Образцы	Оценка экспертов							Сумма рангов	Отклонения от среднего (ΔQ)	Квадрат отклонения (ΔQ^2)
	1	2	3	4	5	6	7			
Контрольный образец (без панировки)	6	5	6	4	6	7	6	40	-3	9
Котлеты, панированные конопляной мукой	8	8	9	9	8	9	9	60	17	289
Котлеты, панированные амарантовой мукой	7	9	9	8	9	9	8	59	16	256
Котлеты, панированные льняной мукой	7	5	6	7	6	7	6	44	1	1
Котлеты, панированные овсяной мукой	4	5	6	4	3	4	5	31	-12	144
Котлеты панированные гречневой мукой	4	3	4	5	5	3	6	30	-13	169
Котлеты, панированные кукурузной мукой	3	3	3	3	3	3	3	21	-22	484
Котлеты, панированные рисовой мукой	9	9	8	9	9	9	9	62	19	361
Общая сумма рангов								347		
Среднее арифметическое от суммы рангов								43		
Сумма квадратов отклонения										1713
Коэффициент конкордации										0,83

Степень согласованности мнений экспертной комиссии оценивали с помощью коэффициента конкордации Кендалла. В результате оценки коэффициент конкордации

20

составил 0,83. Полученные результаты подтверждают, что экспертная комиссия, проводившая дегустационную оценку, имеет хорошую согласованность.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ МЯСНЫХ РУБЛЕНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КОНОПЛЯНОЙ МУКОЙ

Функционально-технологические показатели поликомпонентных рубленых изделий из мяса кролика с добавлением 15 % конопляной муки представлены на рисунке 5. Из графика 5 видно, что показатели влагоудерживающей и влагосвязывающей способности панированных рубленых изделий выше на 11,6 % и на 3,2 % соответственно, чем изделия без панировки.

Увеличение данных показателей напрямую связано с процессом панирования полуфабрикатов, которое позволяет снизить потери влаги при термической обработке изделий. Полученные результаты свидетельствуют о том, что pH в готовых изделиях аналогично, как и в полуфабрикатах, незначительно изменяется в сравнении с контрольным образцом [7, 9].

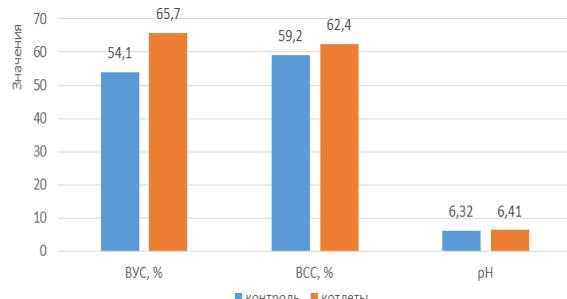


Рисунок 5 – Функционально-технологические показатели рубленых изделий из мяса кролика

Figure 5 – Functional and technological indicators of chopped rabbit meat products

Таблица 2 – Результаты выхода и потерь готовой продукции в зависимости от способа хранения

Table 2 – The results of the yield and loss of finished products depending on the method of storing

Наименование образца	Котлеты из мяса кролика с конопляной мукой		
	масса полуфабриката, г	масса готового изделия, г	потери, %
Образец № 1	124,0±0,1	107,0±0,2	13,7
Образец № 2	123,0±0,2	102,6±0,1	16,6
Образец № 3	125,1±0,2	97,8±0,1	21,8

По результатам таблицы 2 следует, что минимальные потери массы отмечаются у образца № 1 и составляют 13,7 %, что ниже установленных потерь для котлет при тепловой обработке (20,0 %). Потери при тепловой обработке ниже установленных норм отмечаются также у образца № 2 (16,6 %). При хранении рубленых полуфабрикатов в замороженном состоянии (образец № 3) увеличиваются потери готовых изделий, которые составляют 21,8 %.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработана технологическая схема про-

изводства рубленых полуфабрикатов и изделий из мяса кролика с конопляной мукой. Проведена дегустационная оценка рубленых изделий (котлет), приготовленных тремя способами тепловой обработки (жарка, запекание и приготовление на пару) с использованием различных панировочных ингредиентов. Установили, что у образцов котлет, панированных в амарантовой, конопляной и рисовой муке, отмечается максимальное количество баллов при всех способах тепловой обработки. Определена согласованность мнений экспертной комиссии и подтверждена достовер-

ность проведенной дегустационной оценки с помощью коэффициента конкордации.

Установлено, что влагоудерживающая и влагосвязывающая способности панированных рубленых изделий выше на 11,6 % и на 3,2 % соответственно, чем контрольный образец (без панировки). Также установлено, что минимальные потери массы изделий (13,7 % и 16,6 %) отмечаются у образцов котлет, приготовленных сразу после формования и после предварительного охлаждения, что ниже установленных потерь для котлет при тепловой обработке (20,0 %). При хранении рубленых полуфабрикатов в замороженном состоянии увеличиваются потери готовых изделий, которые составляют 21,8 %.

Таким образом, предложенная технология поликомпонентных мясных рубленых изделий (котлет) из мяса кролика в сочетании с конопляной мукой и с различными панировочными ингредиентами позволяют расширить ассортимент продукции на предприятиях общественного питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка технологических подходов к получению мясных систем на основе ресурсов кролиководства и растительных композитов / Е.С. Шенцова, А.В. Востроилов, Е.Е. Курчаева, И.В. Максимов // Вестник ВГУИТ. 2018. № 4. С. 259–268.
2. Петрунина И.В., Осянин Д.Н. Перспективы развития производства мяса и мясных продуктов до 2030 года // Все о мясе. 2020. № 5S. С. 261–264. DOI: <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-261-264>.
3. Совершенствование технологии производства специализированных продуктов из мяса кролика/ В.Г. Попов, О.С. Федорова, С.А. Белкина // Ползуновский вестник. 2017. № 3. С. 37–42.
4. Разработка рецептуры и технологии мясорастительного паштета / Н.А. Величко, Л.П. Шароглазова, Е.Н. Аешина // Вестник КрасГАУ. 2019. № 10. С. 147–152.
5. Вайтанис М.А., Ходырева З.Р. Использование конопляной муки при производстве мясных рубленых полуфабрикатов // Вестник КрасГАУ. 2021. № 1. С. 126–133. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-1-126-133>.
6. Impact of Dietary Supplementation with Goji Berries (*Lycium barbarum*) on Microbiological Quality, Physico-Chemical, and Sensory Characteristics of Rabbit Meat / M. Castrica, L. Menchetti, C. Balzaretti, R. Branciari, D. Ranucci, E. Cotozzolo, D. Vigo, G. Curone, G. Breccchia, D. Miraglia// Foods. 2020. № 9(10). 1480 pp.
7. Вайтанис М.А., Ходырева З.Р. Исследование качества мясорастительных фаршей на основе мяса кролика // Вестник КрасГАУ. 2023. № 9. С. 170–176. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-9-170-176.

8. Effects of Garlic Powder and Salt on Meat Quality and Microbial Loads of Rabbit Burgers / S. Mancini, S. Mattioli, R. Nuvoloni, F. Pedonese, A. Dal Bosco, G. Paci // Foods. 2020. № 9(8). 1022 pp.

9. Вайтанис М.А., Ходырева З.Р. Исследование качества рубленых полуфабрикатов из мяса кролика // Ползуновский вестник. 2024. № 1. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.001.

10. Патент № 2811139 Российской Федерации, МПК A23L 13/60 (2016.01), A23L 13/60. Полуфабрикат рубленый из мяса кролика: № 2023126900; заявл. 19.10.2023; опубл. 10.01.2024 / Вайтанис М.А., Ходырева З.Р.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ).

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. О безопасности мяса и мясной продукции: технический регламент таможенного союза № 034/2013: [принят решением Комиссии Таможенного союза от 9 октября 2013 года № 68]. Москва : Изд-во стандартов, 2013. 77 с.

13. Методы исследования мяса и мясных продуктов / Л.В. Антипова, И.А. Глотова, И.А. Рогов. М. : Колос, 2001. 376 с.

14. МУК 4.2.1847-04. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов. М. : Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 31 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.

З. Р. Ходырева – 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.

REFERENCES

1. Shentsova, E.S., Vostroilov, A.V., Kurchaeva, E.E. & Maksimov, I.V. (2018). Development of technological approaches to obtaining meat systems

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ МЯСНЫХ РУБЛЕНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КОНОПЛЯНОЙ МУКОЙ

based on rabbit breeding resources and plant composites // *Vestnik VGU*. No. 4. 259-268. (In Russ.).

2. Petrunina, I.V. & Osyanin, D.N. (2020). Prospects for the development of meat and meat products production until 2030 // All about meat. No. 5S. 261-264. DOI: <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-261-264>. (In Russ.).

3. Popov, V.G., Fedorova, O.S. & Belkina, S.A. (2017). Improving the technology of production of specialized rabbit meat products // *Polzunovsky bulletin*. No. 3. 37-42. (In Russ.).

4. Velichko, N.A., Sharoglazova, L.P. & Aeshina, E.N. (2019). Development of the formulation and technology of meat and vegetable pate // *Bulletin of KrasGAU*. No. 10. 147-152. (In Russ.).

5. Vaytanis, M.A. & Khodyreva, Z.R. (2021). The use of hemp flour in the production of minced meat semi-finished products // *Bulletin of KrasGAU*. No. 1. 126-133. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-1-126-133>. (In Russ.).

6. Castrica, M., Menchetti, L., Balzaretti, C. & Branciari, R. [et al.]. (2020). Impact of Dietary Supplementation with Goji Berries (*Lycium barbarum*) on Microbiological Quality, Physico-Chemical, and Sensory Characteristics of Rabbit Meat // *Foods*. No 9(10). 1480.

7. Vaytanis, M.A. & Khodyreva, Z.R. (2023). The study of the quality of minced meat based on rabbit meat // *KrasGAU Bulletin*. No. 9. 170-176. DOI: [10.36718/1819-4036-2023-9-170-176](https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-9-170-176). (In Russ.).

8. Mancini, S., Mattioli, S., Nuvoloni, R., Pedone, F., Dal Bosco, A. & Paci, G. (2020). Effects of Garlic Powder and Salt on Meat Quality and Microbial Loads of Rabbit Burgers. *Foods*, 9(8), 1022.

9. Vaytanis, M.A. & Khodyreva, Z.R. (2024). The study of the quality of chopped semi-finished products from rabbit meat // *Polzunovskiy vestnik*. No. 1. S. doi: [10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.001](https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.001). (In Russ.).

10. Patent No. 2811139 Russian Federation, IPC A23L 13/60 (2016.01), A23L 13/60. Semi-finished product chopped from rabbit meat: No. 2023126900; application 19.10.2023; publ. 10.01.2024 / Vay-

tanis, M.A., Khodyreva, Z.R. ; applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Altai State Technical University named after I.I. Polzunov" (AltSTU). (In Russ.).

11. Technical regulations of the Customs Union. About food safety. (2011). *TRTS No.021/2011 from December 9, 2011*. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

12. Technical regulations of the Customs Union. On the safety of meat and meat products: technical regulation of the Customs Union. (2013). *TRTS No.034/2013 from October 9, 2013*. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

13. Antipova, L.V., Glotova, I.A. & Rogov, I.A. (2001). Methods of research of meat and meat products. Moscow : Kolos. 376 p. (In Russ.).

14. MUK 4.2.1847-04. Methods of control. Biological and microbiological factors. Sanitary and epidemiological assessment of the justification of shelf life and storage conditions of food products. M. : Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of the Russian Federation, 2004. 31 p. (In Russ.).

Information about the authors

M. A. Vaytanis - Candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department "Technology of food products" Polzunov Altai State Technical University, associate Professor of the Department "Recreational geography, service, tourism and hospitality" of the Altai state University.

Z. R. Khodyreva - Candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department "Technology of food products" Polzunov Altai State Technical University; associate Professor of the Department "Recreational geography, service, tourism and hospitality" of the Altai state University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 25 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 25 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПАКОВКИ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРОЙ И ВЛАЖНОСТЬЮ НА СРОКИ ГОДНОСТИ И КАЧЕСТВО ПРИ ХРАНЕНИИ ПЛОДОВ АВОКАДО СОРТА HASS

Людмила Геннадьевна Елисеева¹, Никита Олегович Раков²,
Петр Иванович Токарев³, Дарья Сергеевна Кокорина⁴,
Анжела Хуршедовна Соколова⁵, Татьяна Артуровна Сантурян⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

¹ eliseeva.lg@rea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2715-9989>

² nikitarakovv@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2001-6868>

³ Tokarev.PI@rea.ru

⁴ Kokorina.DS@rea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9601-0793>

⁵ d17angela@gmail.com

⁶ Santuryan.TA@rea.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9487-9797>

Аннотация. В современных условиях роста спроса на здоровое питание в России объем продаж свежей плодоовощной продукции в 2024 г. вырос более чем на 3,5 %, при этом потребление авокадо выросло на 10 %. Ежегодно увеличивается объем импорта авокадо. Плоды авокадо поставляются в Россию из субтропических и тропических регионов произрастания, наиболее значимыми из которых являются Перу, Мексика, Колумбия, Кения, Чили, Китай. Авокадо относится к тендерным преференциальным импортируемым фруктам, с коротким сроком годности. Плоды авокадо являются климактерическими плодами, их убирают в *mature green* степени зрелости и дозревают при хранении. Плоды очень чувствительны к отклонениям температуры от оптимального рекомендуемого климатического режима. При температуре ниже 6–8 °C они застуживаются и теряют способность к дозреванию. При повышении температуры плоды активизируют синтез этилена и быстро перезревают, размягчаются, теряют товарное качество. Учитывая дальность поставок, возникает проблема при сохранении необходимого уровня потребительских свойств и однородной степени зрелости на этапах товародвижения. В данной работе представлены результаты исследования влияния упаковочных материалов из полимерных пленок с разными барьерными характеристиками, влияющими на состав модифицированной газовой среды и относительную влажность атмосферы в процессе хранения, на активность физиологических процессов, скорость дозревания, потребительские свойства и сроки хранения плодов авокадо сорта Хасс (Hass). Физиологическое состояние и потенциальные сроки хранения плодов определяли по показателям, характеризующим активность дыхания, динамику выделения этилена, твердость мякоти, содержание сахара, цвет кожуры, уровень естественной убыли и органолептические показатели качества при хранении плодов при температуре 8 и 20 °C. Установлено индивидуальное влияние исследуемых видов пленочных упаковочных материалов на активность физиологических процессов, сроки хранения и потерю продукции на этапах товародвижения.

Ключевые слова: авокадо, сорт Хасс, пленки для упаковки плодов, маркеры качества, сроки хранения, климатические режимы, физиологическое состояние.

Для цитирования: Исследование влияния упаковки с модифицированной атмосферой и влажностью на сроки годности и качество при хранении плодов авокадо сорта Hass / Л. Г. Елисеева [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 24–31. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.003. EDN: <https://elibrary.ru/ORAFAP>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПАКОВКИ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРОЙ И
ВЛАЖНОСТЬЮ НА СРОКИ ГОДНОСТИ И КАЧЕСТВО ПРИ ХРАНЕНИИ
ПЛОДОВ АВОКАДО СОРТА HASS

Original article

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PACKAGING WITH
MODIFIED ATMOSPHERE AND HUMIDITY ON SHELF LIFE AND
QUALITY DURING STORAGE OF HASS AVOCADO FRUITS**

**Ludmila G. Eliseeva¹, Nikita O. Rakov², Petr I. Tokarev³,
Daria S. Kokorina⁴, Angela H. Sokolova⁵, Tatiana A. Santuryan⁶**

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

¹ eliseeva.lg@rea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2715-9989>

² nikitarakovv@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2001-6868>

³ Tokarev.PI@rea.ru

⁴ Kokorina.DS@rea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9601-0793>

⁵ d17angela@gmail.com,

⁶ Santuryan.TA@rea.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9487-9797>

Abstract. In the current conditions of growing demand for healthy nutrition in Russia, the volume of sales of fresh fruit and vegetable products in 2024 increased by more than 3.5 %, while the volume of avocado consumption grew by 10 %. The volume of avocado imports is increasing annually. Avocados are supplied to Russia from subtropical and tropical growing regions, the most important of which are Peru, Mexico, Colombia, Kenya, Chile and China. Avocado belongs to tender preferential imported fruits with short shelf life. Avocado fruits are climacteric fruits, they are harvested at mature green stage of maturity and ripen during storage. The fruits are very sensitive to temperature deviations from the optimal recommended climatic regime. At temperatures below 6-80 °C they get cold and lose the ability to ripen. When the temperature rises, fruits activate ethylene synthesis and quickly become overripe, soften and lose their quality. Taking into account the distance of deliveries, there is a problem in preserving the necessary level of consumer properties and homogeneous degree of maturity at the stages of goods transportation. This paper presents the results of the research of the influence of packaging materials made of polymer films with different barrier characteristics, affecting the composition of the modified gas environment and relative humidity of the atmosphere during storage, on the activity of physiological processes, ripening rate, consumer properties and shelf life of avocado fruits of Hass variety. Physiological state and potential shelf life of the fruits were determined by indicators characterizing the activity of fruit respiration, dynamics of ethylene release, hardness of fruit pulp, sugar content, color of peel, level of natural loss and organoleptic quality indicators during fruit storage at 8 and 20 °C. The individual influence of the investigated types of film packaging materials on the activity of physiological processes, shelf life and product losses at the stages of commodity circulation was established.

Keywords: avocado, Hass variety, fruit packaging films, quality markers, shelf life, climatic conditions, physiological condition.

For citation: Eliseeva, L.G., Rakov, N.O., Tokarev, P.I., Kokorina, D.S., Sokolova, A.H. & Santuryan, T.A. (2025). Investigation of the effect of packaging with modified atmosphere and humidity on shelf life and quality during storage of Hass avocado fruits. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 24-31. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.003. EDN: <https://elibrary.ru/ORAFAAP>.

ВВЕДЕНИЕ

Плоды авокадо являются важным продуктом в рационе здорового питания во всех странах мира. Высокое содержание в авокадо функциональных пищевых ингредиентов, в том числе эссенциальных ω -3, ω -6, ω -9 жирных кислот, пищевых волокон, витаминов, биофлавоноидов, антиоксидантов, витамина D, хлорофилла, зеаксантина, лютеина, каротиноидов и других дефицитных микронутриентов, рекомендуемых для здорового питания, обуславливают высокий спрос потребителей [1, 2]. Объем российского рынка авокадо в период с 2017 г. до 2023 г. увеличился с 5 до 25 млрд. рублей, количество импортируемых плодов в период с 2019 г. до 2023 г. увеличился более чем в 4 раза и превысило 135000 т.

Авокадо относится к тендерным преференциальным импортируемым фруктам с коротким сроком годности. Плоды поступают в Россию более чем из 10 дружественных стран дальнего зарубежья, наиболее значимыми из которых в 2024 г. являлись Перу, Мексика, Колумбия, Доминиканская Республика, Бразилия, Кения, Чили, Израиль, Китай. Плоды авокадо являются климатическими, они не вызревают на дереве в месте произрастания, их убирают в mature green степени зрелости и потом осуществляют дозревание при хранении и/или перед реализацией [8]. Плоды очень чувствительны к отклонениям температуры от оптимального рекомендуемого климатического режима. Учитывая дальность поставок, возникает проблема сохранения необходимого уровня потребительских свойств и однородной степени

зрелости на этапах товародвижения от места сбора урожая до места реализации плодов. В этой связи увеличение сроков хранения плодов авокадо является актуальной научно-практической задачей исследований. Для достижения высокого уровня потребительских свойств плодов в потребительской степени зрелости – RTE (готов к употреблению) – необходимо осуществлять оптимизацию послеуборочных факторов, влияющих на качество плодов при организации товародвижения. Наиболее высокой чувствительностью к температурным режимам обладают плоды до завершения периода климактерического подъема дыхания [9]. Для формирования максимально возможного потенциала потребительских свойств авокадо на этапах дозревания необходимо осуществлять целевую дифференциацию температурно-влажностного режима при хранении плодов в зависимости от фазы климактерического периода дозревания и использовать индивидуальную адаптацию свойств газоселективных упаковочных материалов, для формирования оптимального состава модифицированной газовой атмосферы (МА) и уровня влажности в упаковке [5]. Современные упаковочные технологии играют важную роль в продлении срока годности и сохранении питательных свойств продуктов [4]. В России и за рубежом для обеспечения необходимой степени зрелости RTE при реализации климактерических плодов разработана широкая линейка полимерных материалов с разными функционально-технологическими характеристиками. Разные виды пленок создают разный состав модифицированной атмосферы и модифицированной влажности (МА/МН), которые должны соответствовать индивидуальными физиологическим потребностям отдельных видов плодов [3].

В данном исследовании представлены результаты изучения влияния полимерных пленок, имеющих разные барьерные характеристики. Установлена эффективность их использования для регуляции активности физиологических процессов, скорости дозревания, формирования потребительских свойств с целью увеличения сроков хранения плодов авокадо сорта Хасс. Физиологическое состояние и потенциальные сроки хранения плодов определяли по показателям, характеризующим активность дыхания, динамику выделения этилена, твердость мякоти плодов, содержание сахаров, цвет кожуры, уровень естественной убыли и органолептические показатели качества.

МЕТОДЫ

В работе в качестве объектов исследования были использованы плоды авокадо сорта Хасс, не имеющие дефектов, однородные по степени зрелости, размеру и форме. Плоды отбирались в степени зрелости, соответствующей *mature green*, твердость мякоти плодов – 20–24 кг/см², страна производитель – Колумбия.

Средняя масса плодов составляла 200–210 грамм.

Упаковку плодов осуществляли в два вида пленок – отечественного и зарубежного производства для определения целесообразности осуществления импортозамещения. Пленка марки БОПП, производитель – ООО «Завод упаковочных материалов «Европак» (г.Екатеринбург), изготовлена из биаксиально-ориентированного полипропилена (БОПП). Пленка пригодна для последующего ламинирования и нанесения печати, прочная, имеет высокие барьерные характеристики, термосвариваемая. Были проведены предварительные исследования влияния толщины пленки (20,25 и 30 мкм) и схемы перфорации (1,8x4x100; 6x15x30 и 10x15x30), рекомендованных производителем для упаковывания плодово-овощной продукции на основные параметры, характеризующие лежкospособность плодов в конкретных условиях хранения в модифицированной атмосфере и влажности: интенсивность дыхания, образование конденсата, развитие микробиологических повреждений, естественная убыль плодов. На основании полученных результатов было рекомендовано для последующих исследований применять упаковку плодов в пленку марки БОПП, толщиной 25 мкм, перфорированную, с диаметром отверстий 6 мм. Упаковка в пакет из пленки с указанными параметрами позволяла предотвращать образование конденсата на этапах товародвижения и в процессе реализации в торговом зале. Отсутствие конденсата снижало риски развития фитопатогенов.

Второй вид пленки, который был использован для проведения сравнительных исследований, широко применяется в международной практике логистики и хранения плодово-овощной продукции. Пленка производится Израильской фирмой «Ste Pac L.A.Ltd» под брендом «StePac Xgo™» предназначена для упаковки с модифицированной атмосферой (Modified Atmosphere Packaging, MAP) и модифицированной влажностью (МН), для длительного хранения плодов. Пленка изготовлена из пропилена, толщиной 25 мкм с лазерной перфорацией. Обе пленки отличаются высокими барьерными характеристиками, создают индивидуальные МА/МН режимы хранения, предназначены для увеличения сроков хранения и сокращения потерь плодово-овощной продукции. Лазерная перфорация пленки StePac Xgo обеспечивает более высокие барьерные характеристики и позволяет создать атмосферу хранения с более высокой концентрацией углекислого газа и относительной влажности воздуха по сравнению с пленкой типа БОПП с крупной перфорацией. Плоды упаковывали в пакеты типа флоу-пак, масса плодов в пакете составляла 1 кг. На хранениекладывали не менее 3-х повторностей каждого варианта. В качестве контроля использовалось хранение плодов авокадо аналогичной степени зрелости без упаковки.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПАКОВКИ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРОЙ И ВЛАЖНОСТЬЮ НА СРОКИ ГОДНОСТИ И КАЧЕСТВО ПРИ ХРАНЕНИИ ПЛОДОВ АВОКАДО СОРТА HASS

Измерение динамики показателей качества и состояния физиологической активности проводили в исходных плодах перед помещением их в пакеты и в процессе хранения упакованных в исследуемые пленочные материалы плодов. Хранение плодов осуществляли при температуре 8 °C, соответствующей условиям хранения в распределительном центре торговой сети. Исследования проводили через 5, 10, 15 и 18 суток хранения. Второй температурный режим хранения составил 20 °C, что соответствовало температуре в торговом зале, измерение показателей проводили на 3, 5, 7 и 9 сутки.

В качестве критериев оценки сравнительной эффективности хранения плодов авокадо, упакованных в исследуемые виды пленок, определяли следующие показатели: интенсивность выделения этилена (при помощи газоанализатора SKY-6000); интенсивность дыхания (определяли по количеству углекислого газа, выделенного 1 кг продукта за 1 ч); твердость мякоти (с использованием пенетрометра GY-3 с диаметром плунжера 11 мм), измерение проводили на экваторе каждого плода с трех разных сторон в точках, расположенных под углом 120 °; содержание сахаров определяли по методу Бертрана и экспресс-методом в гомогенизированной массе с помощью цифрового рефрактометра (Atago-Palette PR 101, Atago Co. Ltd.), естественную убыль массы устанавливали по разнице массы исходного образца и массы, полученной при взвешивании исследуемых плодов в процессе хранения через определенные промежутки времени.

Определение органолептических показа-

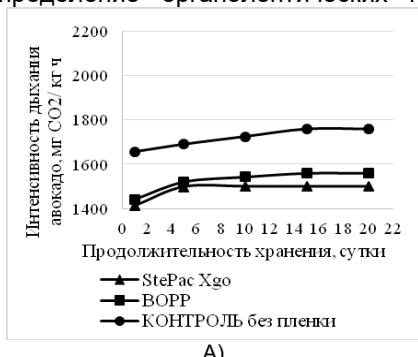


Рисунок 1 – Влияние вида упаковочного материала на интенсивность дыхания плодов авокадо при хранении: А) хранение при 8 °C, Б) хранение при 20 °C

Figure 1 – The effect of the type of packaging material on the respiratory rate of avocado fruits during storage: A) storage at 8 °C, B) storage at 20 °C

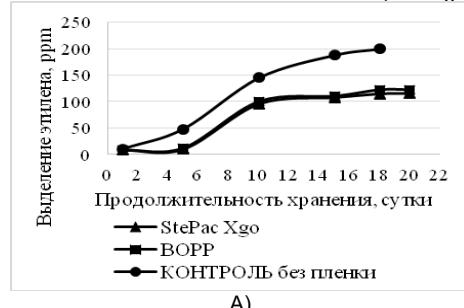


Рисунок 2 – Влияние вида пленочных материалов на динамику выделения этилена плодами авокадо: А) хранение – 8 °C; Б) хранение – 20 °C

Figure 2 – The effect of the type of film materials on the dynamics of ethylene release by avocado fruits: A) storage - 8 °C; B) storage - 20 °C

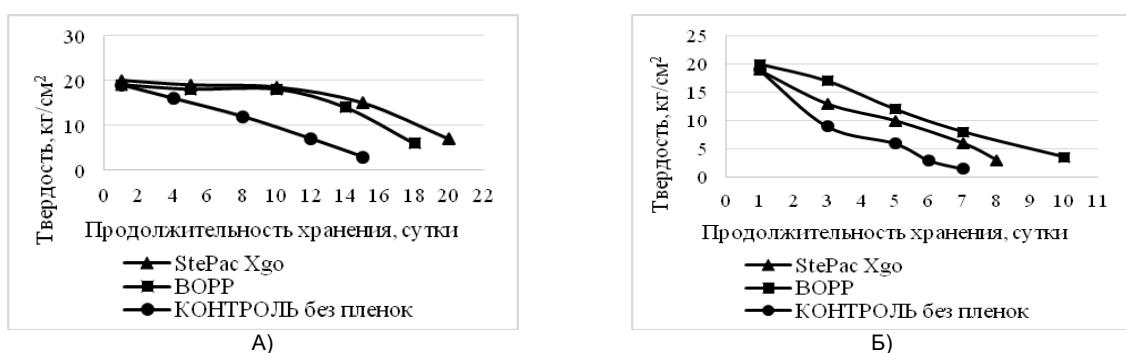


Рисунок 3 – Влияние вида пленочного материала на изменение твердости мякоти плодов при дозревании при А) 8 °C; Б) 20 °C

Figure 3 – The effect of the type of film material on the change in the hardness of the fruit pulp during ripening at А) 8 °C; Б) 20 °C

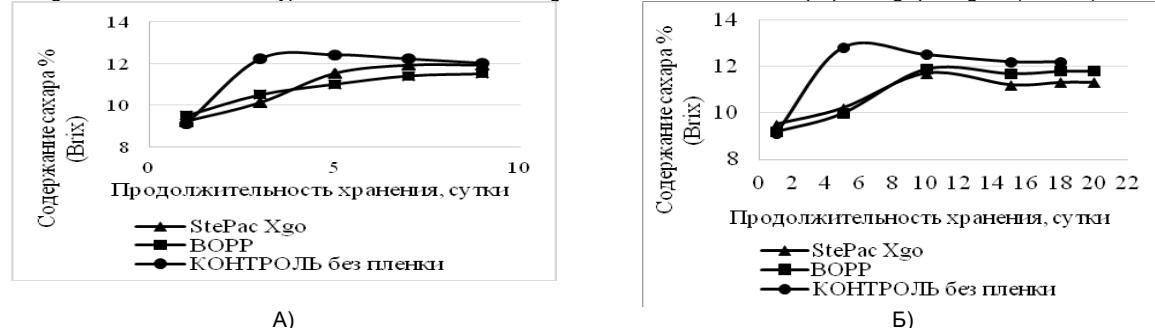


Рисунок 4 – Влияние вида пленочного материала на накопление сахаров в плодах авокадо (Brix, %): А) 8 °C; Б) 20 °C

Figure 4 – The effect of the type of film material on the accumulation of sugars in avocado fruits (Brix, %): А) 8 °C; Б) 20 °C

При дозревании плодов авокадо критерием степени зрелости является твердость плодов, на рисунке 3 представлена динамика снижения твердости мякоти при двух температурных режимах хранения.

Содержание сухих веществ в плодах авокадо коррелирует с содержанием сахаров, характеризующих степень зрелости и потенциальную лежкоспособность авокадо. На рисунке 4 представлена динамика накопления сахаров в плодах при хранении. Во всех исследуемых вариантах накопление сахаров и, соответственно, дозревание протекает более интенсивно в плодах, не упакованных в пленочные материалы. Повышение температуры приводит к активизации процессов дозревания. Использование обоих видов пленки приводит к увеличению сроков хранения плодов авокадо.

Применение упаковок оказывает существенное влияние не только на скорость процессов дозревания, но снижает естественную убыль массы плодов при хранении. Самая низкая естественная убыль наблюдалась у плодов в пленке StePac Xgo. При 8 °C естественная убыль после 20 суток хранения в пленке StePac Xgo составила 2,2 %, в пленке БОПП – 3,5 %, без упаковки – 6,8 %. При 20 °C хранения в течение 9 дней естественная убыль в пленке StePac Xgo составила 2,8 %, в пленке БОПП – 3,1 %, без упаковки – 7,0 %.

Установлено, что в упаковках из пленки StePac Xgo с лазерной перфорацией состав модифицированной атмосферы отличался бо-

лее высоким содержанием углекислого газа, концентрация которого в зависимости от температуры хранения и составляла 4–4,5 % при 20 °C и 2,2–2,5 % при 8 °C. Соответственно, в пленке типа БОПП содержание CO₂ достигало 2,5–2,0 % при 20 °C и 1,5–1,8 % при 8 °C.

В процессе хранения регулярно проводилось определение внешнего вида плодов по показателям внешний вид, консистенция, цвет и запах. Полученные результаты выражали в баллах по 5-балльной шкале. Регулярно определяли наличие конденсата на упаковке и признаки микробиологических и физиологических повреждений.

Плоды, упакованные в пленку StePac Xgo при температуре 20 °C, достигли потребительской степени зрелости через 8 суток хранения, они имели свойственные зрелому плоду запах и вкус, мажущую консистенцию, цвет кожуры (экзокарпия) изменился до темно-коричневого. Плоды, упакованные в пленку БОПП при температуре 20 °C, достигли потребительской степени зрелости через 10 суток хранения. В контролльном варианте плоды, хранившиеся без упаковки при 20 °C, достигли потребительской степени зрелости на 5 сутки.

Хранение при 8 °C увеличивало сроки дозревания и хранения плодов во всех исследуемых вариантах. В пленке StePac Xgo плоды достигли потребительской зрелости через 20 суток хранения. Плоды имели свойственные зрелому плоду вкус и запах, приобретали характерный коричневый цвет экзокарпия и свойственную

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПАКОВКИ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРОЙ И ВЛАЖНОСТЬЮ НА СРОКИ ГОДНОСТИ И КАЧЕСТВО ПРИ ХРАНЕНИИ ПЛОДОВ АВОКАДО СОРТА HASS

зрелому плоду консистенцию. В пленке БОПП плоды достигли потребительской степени зрелости через 18 суток хранения. В контрольном варианте плоды дозрели через 15 суток хранения.

ОБСУЖДЕНИЕ

В производственной практике логистики и хранения климактерические плоды авокадо в процессе дозревания постепенно переходят из состояния *maturing green* в RTE (готовый к употреблению). На качество и сроки хранения плодов большое влияние оказывают методы управления активностью физиологических процессов дозревания. Наиболее существенное влияние на активность климактерического дыхания оказывает температура и газовый состав атмосферы [6]. Нарушение оптимальных условий дозревания и хранения плодов приводит к нарушению физиологических процессов, протекающих в плодах, и сопровождается нарушением потребительских свойств, проявлением признаков застуживания авокадо или возникновением микробиологических заболеваний, в том числе активизируется развитие антракноза при длительном хранении при повышенных температурах [7, 9]. Упаковка плодов авокадо в полимерные пакеты, обладающие необходимым уровнем барьерных характеристик, позволяет устанавливать благоприятную для хранения авокадо модифицированную газовую атмосферу и повышенный уровень относительной влажности воздуха. Снижение скорости дозревания достигается за счет увеличения концентрации CO_2 в атмосфере и снижения температуры до допустимого уровня, не вызывающего застуживание авокадо. Проведенные нами ранее исследования позволили установить, что застуживание плодов авокадо сорта Хасс происходит при снижении температуры ниже $+7^\circ\text{C}$. Исследуемые пленки обладают разными газоселективными характеристиками, поэтому результаты исследований по изучению влияния разных видов упаковочных материалов на активность протекания физиологических процессов дозревания и старения плодов позволяют научно обосновать эффективность использования индивидуальных пленочных материалов для упаковывания авокадо.

Анализируя полученные результаты исследований, было установлено, что самая высокая интенсивность дыхания наблюдается у плодов в контрольном варианте (без пленки). В пленке StePac Xgo была самая низкая интенсивность дыхания плодов при 8°C , а при 20°C минимальная интенсивность дыхания была у плодов, упакованных пленку марки BOPP (рисунок 1). При переходе дыхания на стадию климактерического подъема дыхания наблюдается активизация синтеза эндогенного этилена, что приводит к ускорению процесса дозревания. Количество выделяе-

мого этилена коррелирует с данными по интенсивности дыхания (рисунок 2).

Интенсивность синтеза этилена, вызывающего дозревание плодов, коррелирует с динамикой снижения твердости плодов (рисунок 3) и накопления сахаров (рисунок 4). Полученные результаты позволили установить три наиболее значимых показателя, позволяющие идентифицировать степень зрелости плодов – количество выделяемого этилена, снижение твердости мякоти до уровня, характеризующего степень зрелости RTE, соответствующее значению близкому к $2,0 \text{ кг}/\text{см}^2$ и уровень накопления сахаров до значений, составляющих 10–13 % Brix. При этих значениях степень гидролиза крахмала достигает уровня, свойственного для потребительской степени зрелости плодов. Сопоставление данных критерииов позволяет установить предельные сроки хранения авокадо в разных климатических режимах хранения.

Максимальное количество этилена выделяется плодами, не упакованными в пленку при хранении как при 20°C , так и при 8°C . Упаковывание плодов авокадо в исследуемые виды пленок снижает скорость выделения этилена. Существенных различий в количестве этилена, выделяемого плодами в разных видах пленок, не установлено. При 8°C в пленке StePac Xgo этилена образуется незначительно меньше, по сравнению с плодами, упакованными в BOPP. При 20°C плоды в BOPP пленке выделяют меньше этилена, чем в пленке StePac Xgo. Следовательно, при температуре 8°C лучше задерживает процесс дозревания пленка StePac Xgo, а при 20°C плоды медленнее дозревают при использовании пленки BOPP.

Динамика снижения твердости мякоти авокадо, характеризующая скорость дозревания плодов, подтверждает полученные результаты по выделению этилена. Твердость мякоти $2\text{--}3 \text{ кг}/\text{см}^2$, соответствующая плоду в потребительской степени зрелости достигается на 15 сутки хранения в контроле без пленки при 8°C . В пленке StePac Xgo сроки хранения увеличивались, дозревание происходило на 20 сутки, а в пленке BOPP – на 18 сутки. При температуре 20°C резко сокращаются сроки дозревания и хранения во всех исследуемых вариантах. Дозревание плодов в контроле без пленки происходит на 7 сутки, в пленке StePac Xgo – через 8–9 суток, максимально высокий срок хранения был установлен в пленке BOPP и составил 9–10 дней. Пакеты для хранения авокадо из пленки БОПП имеют макроперфорацию, поэтому количество этилена внутри пакета из данного материала будет меньше, чем в пленке StePac Xgo, имеющей лазерную перфорацию. Снижение концентрации этилена в атмосфере позволяет увеличить сроки хранения плодов.

Содержание сухих веществ в плодах авокадо, характеризующих степень зрелости, коррели-

рует с содержанием сахаров. Во всех исследуемых вариантах накопление сахаров и, соответственно, дозревание протекает более активно в плодах, не упакованных в пленку. При 8 °C дозревание протекает медленнее в пленке StePac Xgo, а при 20 °C – более медленно в пленке BOPP. Эти данные коррелируют со скоростью накопления сахаров, что подтверждает эффективность применения пленки StePac Xgo для хранения при 8 °C, а пленки BOPP при 20 °C.

При длительном хранении при повышенных температурах увеличивается интенсивность дыхания и испарения влаги, что приводит к увеличению относительной влажности атмосферы внутри пакета, в результате чего в пленке с лазерной перфорацией отмечено образование мелких капель конденсата внутри упаковки. При возникновении перепада температур при товародвижении плодов количество конденсата в пленке StePac Xgo увеличивается, в то время как в пленке, имеющей крупную перфорацию в виде отверстий с диаметром 6 мм (БОПП), конденсат не образуется во всех вариантах опыта. Следовательно, необходимо учитывать повышение рисков образования конденсата в пленках с недостаточной степенью перфорации при активизации физиологической активности, сопровождающейся увеличением выделения количества влаги и тепла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным коммерческим сортом авокадо, реализуемом на потребительском рынке России, является сорт Хасс. На этапе хранения, дозревания и реализации основными триггерами изменения физиологической активности и снижения сроков хранения являются температура, концентрация кислорода, углекислого газа и относительная влажность воздуха. Установлено, что на этапах хранения и транспортирования плодов авокадо сорта Хасс температура должна поддерживаться на уровне не ниже 7–8 °C, при понижении температуры происходит застуживание плодов. Для регуляции газового состава и относительной влажности атмосферы хранения, плоды однородной степени зрелости в стадии *mature green* упаковывали в пакеты типа флоу-пак из двух видов газоселективных пленок марки StePac Xgo с лазерной перфорацией (производство Израиль) и марки БОПП с макроперфорацией (производство г. Екатеринбург). Толщина пленок составляла 25 мкм. Авокадо хранили при температуре 8 °C (температуры условия распределительного центра) и 20 °C (температура торгового зала). Использование обоих видов пленки оказывало положительное влияние на замедление активности дыхания, снижение величины выделяемого плодами этилена, динамику размягчения мезокарпия, увеличение содержания сахаров и, соответственно, на замедление скорости дозре-

вания. Установлено снижение потерь и увеличение продолжительности хранения авокадо. В пленке StePac Xgo при 8 °C дозревание завершалось на 20 сутки хранения, а в пленке BOPP – на 18 сутки, неупакованные плоды хранились 15 суток. Увеличение температуры до 20 °C резко сокращает сроки дозревания и хранения во всех исследуемых вариантах. В контроле без пленки плоды хранились в течение 6–7 суток, в пленке StePac Xgo – 8–9 суток и максимально высокий срок хранения был установлен в пленке BOPP – 9–10 дней.

Необходимо учитывать повышение рисков образования конденсата в пленках с недостаточной степенью перфорации при активизации физиологической активности, сопровождающейся повышением активности дыхания и соответственно, увеличением выделения количества влаги и тепла. Поэтому использование пленки StePac Xgo с лазерной перфорацией не рекомендуется для хранения плодов при температуре 20 °C, в этом случае более эффективно использовать пленки отечественного производства типа БОПП с макроперфорацией (диаметром не менее 6 мм). При низкотемпературном хранении использование обоих видов упаковки позволяет увеличивать сроки хранения и снижать потери от микробиологических и физиологических повреждений. Отечественная пленка марки БОПП практически не уступает по эффективности при хранении авокадо как при температурных условиях распределительного центра, так и при реализации плодов в торговом зале. Промышленное хранение плодов в условиях распределительного центра и торгового предприятия в пакетах из пленок типа БОПП с макроперфорацией позволило избежать образование конденсата на всех этапах товародвижения и увеличить срок годности авокадо на 4–5 суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние различных видов полимерных упаковок на сохраняемость плодов авокадо при их реализации в розничной торговой сети / Н.А. Карпова, Л.М. Соколова, В.Н. Кулешов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2023. Т. 11, № 2. С. 65–73. DOI 10.14529/food230208. EDN RKGFOJ.
2. Ларина Т.В. Тропические и субтропические плоды : справочник товароведа / Т.В. Ларина. М. : ДeЛи принт, 2002. 254 с.
3. Gaona-Forero, A., Agudelo-Rodríguez, G., Herrera, A.O. & Castellanos, D.A. (2018). Modeling and simulation of an active packaging system with moisture adsorption for fresh produce. Application in "Hass" avocado. *Food Packaging and Shelf Life*, 17, 187–195. doi: 10.1016/j.fpsl.2018.07.005.
4. Castellanos, D.A., Herrera, D.R. & Herrera, A.O. (2016). Modelling water vapour transport, transpiration and weight loss in a perforated modified atmosphere packaging for feijoa fruits. *Biosystems Engineering*, 151, 218–230.
5. Castellanos, D.A., Mendoza, R., Gavara, R. & Herrera, A.O. (2017). Respiration and ethylene genera-

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПАКОВКИ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРОЙ И ВЛАЖНОСТЬЮ НА СРОКИ ГОДНОСТИ И КАЧЕСТВО ПРИ ХРАНЕНИИ ПЛОДОВ АВОКАДО СОРТА HASS

tion modeling of "Hass" avocado and feijoa fruits and application in modified atmosphere packaging. *International Journal of Food Properties*, 20(2).

6. Osuna-García, J.A., Doyon, G., Salazar-García, S., Goenaga, R. & González-Durán, I.J.L. (2010). Effect of harvest date and ripening degree on quality and shelf life of Hass avocado in Mexico. *Fruits*, 65(6), 367–375.

7. Zhuang, H., Barth, M.M. & Cisneros-Zevallos, L. (2014). Modified atmosphere packaging for fresh fruits and vegetables. In J.H. Han (Ed.). *Innovations in food packaging* (pp. 445–473). (second ed.). Academic Press.

8. Rux, G., Mahajan, P.V., Linke, M., Pant, A., Sängerlaub, S., Caleb, O.J. ... Geyer, M. (2016). Humidity-regulating trays: Moisture absorption kinetics and applications for fresh produce packaging. *Food and Bioprocess Technology*, 9(4), 709–716.

9. Daiuto, E.R. [et al.]. Respiratory tax of avocado 'Hass' submitted to different physical treatments. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, v. 10, p. 101–109, 2010.

10. Fitzell, R.D. Epidemiology of anthracnose disease of avocados. *South African Avocado Grower's Association Yearbook*, v. 10, p. 113–116, 1987.

ra, A.O. & Castellanos, D.A. (2018). Modeling and simulation of an active packaging system with moisture adsorption for fresh produce. Application in "Hass" avocado. *Food Packaging and Shelf Life*, 17, 187-195. doi: 10.1016/j.fpsl.2018.07.005.

4. Castellanos, D.A., Herrera, D.R. & Herrera, A.O. (2016). Modelling water vapour transport, transpiration and weight loss in a perforated modified atmosphere packaging for feijoa fruits. *Biosystems Engineering*, 151, 218-230.

5. Castellanos, D.A., Mendoza, R., Gavara, R. & Herrera, A.O. (2017). Respiration and ethylene generation modeling of "Hass" avocado and feijoa fruits and application in modified atmosphere packaging. *International Journal of Food Properties*, 20(2).

6. Osuna-García, J.A., Doyon, G., Salazar-García, S., Goenaga, R. & González-Durán, I.J.L. (2010). Effect of harvest date and ripening degree on quality and shelf life of Hass avocado in Mexico. *Fruits*, 65(6), pp. 367-375.

7. Zhuang, H., Barth, M.M. & Cisneros-Zevallos, L. (2014). Modified atmosphere packaging for fresh fruits and vegetables. In J.H. Han (Ed.). *Innovations in food packaging* (pp. 445-473). (second ed.). Academic Press.

8. Rux, G., Mahajan, P.V., Linke, M., Pant, A., Sängerlaub, S., Caleb, O.J. ... Geyer, M. (2016). Humidity-regulating trays: Moisture absorption kinetics and applications for fresh produce packaging. *Food and Bioprocess Technology*, 9(4), 709-716.

9. Daiuto, E.R. [et al.]. Respiratory tax of avocado 'Hass' submitted to different physical treatments. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, v. 10, p. 101-109, 2010.

10. Fitzell, R.D. Epidemiology of anthracnose disease of avocados. *South African Avocado Grower's Association Yearbook*, v. 10, p. 113-116, 1987.

Информация об авторах

Л. Г. Елисеева – доктор технических наук, профессор кафедры Товарной экспертизы и таможенного дела Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова.

Н. О. Раков – аспирант кафедры Товарной экспертизы и таможенного дела Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова.

П. И. Токарев – доктор биологических наук, заведующий кафедрой Товарной экспертизы и таможенного дела Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова.

Д. С. Кокорина – кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры Товарной экспертизы и таможенного дела Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова.

А. Х. Соколова – аспирант кафедры Товарной экспертизы и таможенного дела Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова.

Т. А. Сантуриян – ассистент, ведущий специалист кафедры «Товарной экспертизы и таможенного дела» Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова.

REFERENCES

1. The influence of various types of polymer packages on the preservation of avocado fruits during their sale in the retail trade network / N.A. Karpova, L.M. Sokolova, V.N. Kuleshov [et al.] // Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2023. Vol. 11, No. 2.

2. Larina, T. Tropical and sub-tropical fruits. Moscow : Delhi print, 2002. p. 254.

3. Gaona-Forero, A., Agudelo-Rodríguez, G., Herre-

ra, A.O. & Castellanos, D.A. (2018). Modeling and simulation of an active packaging system with moisture adsorption for fresh produce. Application in "Hass" avocado. *Food Packaging and Shelf Life*, 17, 187-195. doi: 10.1016/j.fpsl.2018.07.005.

4. Castellanos, D.A., Herrera, D.R. & Herrera, A.O. (2016). Modelling water vapour transport, transpiration and weight loss in a perforated modified atmosphere packaging for feijoa fruits. *Biosystems Engineering*, 151, 218-230.

5. Castellanos, D.A., Mendoza, R., Gavara, R. & Herrera, A.O. (2017). Respiration and ethylene generation modeling of "Hass" avocado and feijoa fruits and application in modified atmosphere packaging. *International Journal of Food Properties*, 20(2).

6. Osuna-García, J.A., Doyon, G., Salazar-García, S., Goenaga, R. & González-Durán, I.J.L. (2010). Effect of harvest date and ripening degree on quality and shelf life of Hass avocado in Mexico. *Fruits*, 65(6), pp. 367-375.

7. Zhuang, H., Barth, M.M. & Cisneros-Zevallos, L. (2014). Modified atmosphere packaging for fresh fruits and vegetables. In J.H. Han (Ed.). *Innovations in food packaging* (pp. 445-473). (second ed.). Academic Press.

8. Rux, G., Mahajan, P.V., Linke, M., Pant, A., Sängerlaub, S., Caleb, O.J. ... Geyer, M. (2016). Humidity-regulating trays: Moisture absorption kinetics and applications for fresh produce packaging. *Food and Bioprocess Technology*, 9(4), 709-716.

9. Daiuto, E.R. [et al.]. Respiratory tax of avocado 'Hass' submitted to different physical treatments. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, v. 10, p. 101-109, 2010.

10. Fitzell, R.D. Epidemiology of anthracnose disease of avocados. *South African Avocado Grower's Association Yearbook*, v. 10, p. 113-116, 1987.

Information about the authors

L.G. Eliseeva - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Commodity Expertise and Customs Affairs of the Russian Economic University. G.V. Plekhanov.

N.O. Rakov - graduate student at the Department of Commodity Expertise and Customs Affairs of the Russian Economic University. G.V. Plekhanov.

P.I. Tokarev - Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Commodity Expertise and Customs Affairs at the Plekhanov Russian University of Economics.

D.S. Kokorina - Candidate of Technical Sciences, junior research at the Department of Commodity Expertise and Customs Affairs of the Russian Economic University. G.V. Plekhanov.

A.H. Sokolova - graduate student at the Department of Commodity Expertise and Customs Affairs of the Russian Economic University. G.V. Plekhanov.

T.A. Santuryan - Assistant, Leading Specialist of the Department of Commodity Expertise and Customs Affairs at the Plekhanov Russian University of Economics.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.8
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.004

EDN: OVLGSU

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. 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. Технология сверхкритического диоксида углерода (СК-СО₂) используется для экстрагирования и извлечения соединений из пищевого сырья и продуктов его переработки. В последнее десятилетие данная технология рассматривается как нетермический метод консервирования пищевых продуктов, так как сочетание СО₂ с умеренным давлением и температурой вызывает инактивацию микробных вегетативных клеток и денатурацию ферментов, максимально сохраняя при этом органолептические показатели свежего продукта, его биологически активные соединения и пищевую ценность. Цель статьи – критический обзор результатов научных исследований использования технологии СК-СО₂ для консервирования пищевых продуктов, механизмов микробной инактивации и влияние на физико-химические, технологические и сенсорные свойства, а также сохранении пищевой ценности. В обзор включены статьи, опубликованные на английском и русском языках за период 2014–2024 гг. Для поиска были использованы базы данных PubMed, Scopus, Web of Science, Elibrary и Google Scholar. Материалом для исследования послужили 64 научные публикации. В ходе оценки результатов научных исследований установлено, что использование технологии СК-СО₂ способствует снижению микробиологической обсемененности более 5 log КОЕ/мл, инактивации ферментов и улучшении стабильности при хранении фруктовых и овощных соков, мясных и молочных продуктов. Для достижения максимальных результатов необходимо оптимизация параметров обработки, таких как температура, давление, объем СО₂ и время обработки. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на возможность расширения использования технологии сверхкритического диоксида углерода для различных видов пищевого сырья и продуктов переработки, оценки срока годности, биодоступности биологически активных соединений, а также исследований *in vitro* и *in vivo*, с целью определения преимущества использования технологии СК-СО₂ перед другими способами и методами обработки и консервирования пищевых продуктов.

Ключевые слова: консервирование, нетермическая технология, СК-СО₂, микроорганизмы, ферменты, инактивация, биологически активные соединения, пищевая ценность, антиоксидантная активность.

Для цитирования: Бурак Л. Ч. Перспективы использования технологии сверхкритического диоксида углерода в пищевой промышленности. Обзор предметного поля // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 32–50. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.004. EDN: <https://elibrary.ru/OVLGSU>.

Original article

PROSPECTS FOR USING SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE TECHNOLOGY IN FOOD INDUSTRY. SUBJECT FIELD OVERVIEW

Leonid Ch. Burak

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

Abstract. Supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) technology is used to extract and extract compounds from food raw materials and processed products. In the last decade, this technology has been considered as a non-thermal method of food preservation, since the combination of CO₂ with moderate pressure and temperature causes inactivation of microbial vegetative cells and denaturation of enzymes, while maximally preserving the organoleptic characteristics of the fresh product, its biologically active compounds and nutritional value. The purpose of the article is a critical review of the results of scientific research on the possible use of SC-CO₂ technology for food preservation, the mechanisms of microbial inactivation and the effect on physicochemical, technological and sensory properties, as well as the preservation of nutritional value. The review includes articles published in English and Russian for the period 2014–2024. The databases used for the search were Pub-

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

Med, Scopus, Web of Science, Elibrary and Google Scholar. The material for the study was 64 scientific publications. In the course of evaluating the results of scientific research, it was found that the use of SC-CO₂ technology helps to reduce microbiological contamination of more than 5 log KOE/ml, inactivate enzymes and improve the storage stability of fruit and vegetable juices, meat and dairy products. To achieve maximum results, optimization is necessary processing parameters such as temperature, pressure, CO₂ volume and processing time. Further scientific research should be aimed at the possibility of expanding the use of supercritical carbon dioxide technology for various types of food raw materials and processed products, assessing the shelf life, bioavailability of biologically active compounds, as well as *in vitro* and *in vivo* studies, in order to determine the benefits of using SC-CO₂ technology before other methods and methods of food processing and preservation.

Keywords: canning, non-thermal technology, SC-CO₂, microorganisms, enzymes, inactivation, biologically active compounds, nutritional value, antioxidant activity.

For citation: Burak, L Ch. (2025). Prospects for the use of supercritical carbon dioxide technology in food industry. Subject field overview. Polzunovskiy vestnik, (1), 32-50. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.004. EDN: <https://elibrary.ru/OVLSU>.

ВВЕДЕНИЕ

Сведения о составе продукта питания, отсутствии в них химических консервантов, использовании в процессе переработки современных технологий, позволяющих максимально сохранять пищевую ценность продукта, свежесть вкуса и аромата, привлекает потребителей и во многом определяет их покупательскую способность [1]. В течение многих лет основной технологией консервирования пищевых продуктов была и остается традиционная термическая обработка, такая как пастеризация и стерилизация. Вместе с тем они могут оказывать негативное воздействие на физические, химические, питательные и сенсорные свойства пищевых продуктов [2–3]. В качестве альтернативы традиционной термической обработке, применяемой при консервировании пищевых продуктов в ходе научных исследований, рассматривались многие современные нетермические технологии [4–5]. Несмотря на доказанную эффективность некоторых нетермических технологий, на промышленном уровне для этой цели в настоящее время применяется только высокое гидростатическое давление [6]. На уровне лабораторных исследований технология СК-CO₂ широко применяется для экстракции соединений из пищевых материалов и побочных продуктов с конца 1970-х годов [7–10]. Масштабирование пищевых установок уже осуществлено, и есть промышленное использование, например, для удаления кофеина из чая и кофе [10]. Вместе с тем только в последнее десятилетие технология СК-CO₂ рассматривается в качестве нетермической технологии консервирования пищевых продуктов, поскольку сочетание CO₂ с приемлемым давлением и температурой может инактивировать микробные вегетативные клетки и денатурировать ферменты с небольшими изменениями в физико-химических, технологических и сенсорных свойствах, а также сохранении биоактивных соединений [11–13]. Совсем недавно было установлено, что технология СК-CO₂ может использоваться для инактивации пробиотических культур, что способствует созданию постбиотиков, положительно влияющих на здоровье потребителя [14–15]. Технология СК-CO₂ имеет ряд преимуществ, таких как использование более мягких условий давления (обычно < 20 МПа) по сравнению с теми, ко-

торые используются при высоком гидростатическом давлении (300–600 МПа). Также инактивация микробов достигается при низких температурах, чего не может быть при использовании ультразвука, поскольку в некоторых исследованиях используется термозвуковая обработка (ультразвук и температура) [16]. Кроме того, CO₂ является недорогим газом, тогда как в технологиях холодной плазмы и озона могут использоваться благородные газы и озон, покупка которых и необходимость поддерживать высокие концентрации в течение длительного времени воздействия, необходимого для микробной инактивации, дорогостоящие [17]. Обзорные статьи, связанные с технологией СК-CO₂, посвящены в основном экстракции соединений из пищевых материалов и побочных продуктов или их применению в традиционных процессах, таких сушка [10, 18]. В опубликованных обзорах обсуждалось применение СК-CO₂ в качестве нетермальной технологии, но микробная инактивация рассматривалась недостаточно и касалась в основном твердых продуктов и без анализа их влияния на безопасность пищевых продуктов, качество пищевых продуктов, концентрацию биоактивных соединений [10, 13, 19, 20, 21]. Кроме того, на момент исследования нами не было установлено, где бы в предыдущих обзорах был представлен анализ использования технологии СК-CO₂ в пищевой промышленности с целью инактивации микроорганизмов, сохранения биологически активных соединений и качества продукции, а также производства постбиотиков. Поэтому цель статьи – обзор результатов научных исследований и определения потенциала технологии СК-CO₂ для консервирования пищевых продуктов, механизмов микробной инактивации и влияние на физико-химические, технологические и сенсорные свойства, а также сохранении пищевой ценности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поиск научной литературы результатов исследований потенциальных возможностей технологии СК-CO₂ для консервирования пищевых продуктов, механизмов микробной инактивации и влияние на физико-химические, технологические и сенсорные свойства, а также сохранении пищевой ценности проводили в библиографи-

ческих базах «PubMed», «Scopus», «Web of Science», «Google Scholar» с применением дескрипторов: «консервирование», «нетермическая технология», «СК-СО₂», «микроорганизмы», «ферменты», «инактивация», «биологически активные соединения», «пищевая ценность», «антиоксидантная активность». В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2014–2024 гг. Более ранние научные статьи изучали только при отсутствии новых публикаций по теме исследования. При выполнении работы применяли методы анализа, систематизации и обобщения. Изначально было отобрано и изучено 426 научных публикаций. Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 64 исследования.

Критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу, перечислены ниже.

Критерии включения:

- (1) Статья написана в период 2014–2024 гг.;
- (2) Статья соответствует теме исследования;
- (3) Типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи и краткие отчеты.

Критерии исключения:

(1) Статья не соответствует теме данного обзора: не касается тематики использования технологии сверхкритического диоксида углерода в пищевой промышленности в качестве нетермической технологии консервирования.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика и аспекты технологии СК-СО₂

Сверхкритическая жидкость – это любое вещество, термодинамическое состояние давления и температуры которого выше критической точки фазового равновесия. В сверхкритической фазе чистые вещества имеют преимущества перед другими термодинамическими фазами (газовыми, жидкими или твердыми), поскольку их химические и физические свойства находятся между жидкой и газовой фазами. Кроме того, эти свойства можно регулировать, изменяя температуру и давление [13, 22]. Некоторые вещества, такие как аммиак, вода и этилен, могут использоваться в сверхкритическом состоянии, но сверхкритический диоксид углерода (СК-СО₂) является наиболее используемой сверхкритической жидкостью.

Условия СК-СО₂ приемлемы, температура 31,06 °С и давление 7,38 МПа, что легко достижимо. В таком состоянии СО₂ обладает растворяющей способностью, подобной жидкости, и коэффициентом диффузии, подобным газу [10]. Высокие плотности приводят к улучшению селективности и растворимости жидкости. Кроме того, низкое поверхностное натяжение и вяз-

кость в сочетании с промежуточным коэффициентом диффузии облегчают проникновение жидкости в слои клеток, что приводит к более высокой экстракции внутреннего материала и улучшению инактивации [23]. Преимущество СО₂ обусловлено еще и тем, что он не токсичен, не вызывает коррозии, не горюч, инертен, не дорог (поскольку доступен в атмосфере), обычно считается безопасным. Кроме того, он доступен с высокой степенью очистки. Его можно легко отделить от пищевых продуктов путем снижения давления (поскольку пищевые компоненты не растворяются в СО₂ при атмосферном давлении), не оставляя остатков в пищевых продуктах [24–25]. Мягкая критическая точка позволяет сохранять термочувствительные биоактивные соединения в продуктах и минимизировать инвестиционные и энергетические затраты. Можно выделить три основных типа установок для применения технологии СК-СО₂ в жидких пищевых продуктах: периодические, полунепрерывные и непрерывные системы. Периодическая система состоит из резервуара с СО₂, охладителя, насоса, клапанов, реактора и нагревателя или водяной бани (для контроля температуры). В этой системе СО₂ и продукт неподвижны в реакторе. Конструкция периодической системы в различных исследованиях отличается друг от друга [14, 26, 27, 28, 29, 30]. В полунепрерывной системе через сосуды, соединенные последовательно, в которых находится пища, проходит непрерывный поток СО₂. При непрерывном процессе образец (из питающего резервуара) закачивается в систему и смешивается со сверхкритическим СО₂ в условиях, определенных для процесса. После операции эта смесь проходит через нагреватель и сепаратор для удаления СО₂ из образца (который можно восстановить и использовать повторно). Система контролируется расходомерами, а температура и давление процесса контролируются онлайн-системой. Периодическая система имеет низкую производительность обработки, и ее промышленное применение может быть ограничено. Напротив, полунепрерывные и, главным образом, непрерывные системы способствуют более эффективному контакту СО₂ и образца и, следовательно, к сокращению времени обработки снижению затрат [23]. Применение технологии СК-СО₂ для твердых пищевых продуктов менее изучено, а информация об оборудовании отсутствует. Основными параметрами обработки технологии СК-СО₂ являются температура, давление, поток СО₂ и время обработки [10].

Механизм микробной инактивации

Касательно процесса инактивации микробов технология СК-СО₂ является альтернативой традиционной термической обработке [31–33]. Описано несколько механизмов действия, и инактивация происходит посредством множественных целевых эффектов, которые до конца не изучены [10]. Физическое раз-

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

рушение является предполагаемым механизмом, поскольку микробная клетка подвергается быстрому сбросу давления и расширению CO_2 в клетках. Однако микробная инактивация может происходить в клетках с небольшими признаками деформации или даже в неповрежденных клетках, что позволяет предположить, что физическое разрушение само по себе не может быть причиной микробной инактивации [34]. Гидрофильные и липофильные характеристики CO_2 могут быть важными факторами микробной инактивации. Липофильная природа приводит к экстракции фосфолипидов из цитоплазматических клеточных мембран, тогда как гидрофильная природа способствует диффузии и накоплению CO_2 в клеточных мембранах, увеличивая текучесть и проницаемость мембран. Изменения в структуре мембран могут поставить под угрозу жизненно важные компоненты клеток и в конечном итоге привести к их гибели.

Вместе с тем сообщалось, что изменение внеклеточного и внутриклеточного pH, вероятно, является наиболее важным в технологии СК- CO_2 для микробной инактивации [13]. Сначала CO_2 растворяется во внешней жидкой фазе, и за счет присутствия воды образуется угольная кислота. Это соединение может диссоциировать на ионы бикарбоната и водорода, снижая внеклеточный pH [35]. Это подкисление увеличивает проницаемость клеточных мембран и облегчает проникновение CO_2 в клетки [21]. Таким образом, CO_2 диффундирует внутрь клеток. Он может напрямую ингибировать микробные клетки за счет осаждения неорганических электролитов или оказывать негативное воздействие на морфологию и рост микробов, главным образом при применении низких и умеренных температур и высоких давлений [11]. Он также может способствовать снижению внутриклеточного pH за счет вышеупомянутых процессов, следовательно, ключевые ферменты, ответственные за важнейшие регуляторные и метаболические процессы в микроорганизмах, инактивируются, поскольку их каталитическая активность чувствительна к изменению pH [36]. Внутриклеточное закисление может также нарушать электролитный баланс внутриклеточных и жизненно важных компонентов клеток и клеточных мембран. Ионы угольной кислоты и бикарбоната также могут изменять карбоксилирование и декарбоксилирование различных реакций [13]. В результате более низкие значения pH могут снизить устойчивость микроорганизмов к инактивации из-за высокой энергии, необходимой для поддержания внутриклеточного гомеостаза [23]. Эффективность технологии СК- CO_2 по инактивации микробов может зависеть от активности воды и свободной воды. Результаты исследования твердых пищевых продуктов, таких как травы и специи продемонстрировали, что технология

СК- CO_2 оказывает микробицидное действие только в присутствии некоторого количества воды. Таким образом, при высокой активности воды за инактивацию микробов могут быть ответственны псевдоожижение мембран и изменения барьерных свойств мембран [37]. При низкой активности воды инактивация может быть уменьшена или даже нарушена, поскольку в сухих клетках нарушено внешнее снижение pH и набухание мембранных клеток, что препятствует легкому проникновению CO_2 [23].

Споры – это спящие формы вегетативных бактерий, чрезвычайно устойчивые к химическим реагентам, теплу и радиации, что считается большой проблемой для пищевой промышленности [10]. Инактивация спор с помощью технологии СК- CO_2 пока неизвестна, но существуют предположения о двух механизмах действия. Споры активируются, затем прорастают, становясь чувствительными к CO_2 , или происходит повреждение вследствие снижения pH и модификации структуры внутренней мембраны покоящихся спор [10, 38].

Показатели качества пищевых продуктов, обработанных по технологии СК- CO_2

Микробиологические

Технология СК- CO_2 применялась с целью микробной инактивации фруктов и овощей, таких как свежие и замороженные фруктовые соки [39–46], кокосовой воды [31], сухофруктов [47–48], а также семян и трав [49–50]. В ходе исследований использовались вариации давления 8–60 МПа, температуры 25–80°C и времени 3–90 мин (табл. 1.)

Проводились также исследования обработки мясных продуктов, таких как ветчина, куриное мясо и свинины, при давлении 6–35 МПа, температуре 40–51 °C и времени 5–120 мин [51, 29, 32, 33]. Хотя в процессе приготовления ветчины происходит инактивация патогенных бактерий и бактерий, вызывающих порчу, продукты могут подвергаться перекрестному загрязнению во время процедур нарезки и упаковки. Кроме того, свежее мясо птицы и свинины из-за своего химического состава является склонным к загрязнению, поэтому процесс обработки СК- CO_2 мясных продуктов является необходимым и целесообразным. Молочные продукты, такие как молоко и сыр, также исследовались при обработке СК- CO_2 с параметрами давления 8–20 МПа, температуре 30–70 °C, время 10–60 мин (табл. 1.) В таблице 1 представлены основные исследования влияния технологии СК- CO_2 на микробиологическое качество пищевых продуктов. Общее количество микроорганизмов было снижено до уровня ниже пределов обнаружения [41, 44], а также плесени и дрожжей [31, 39, 40, 48, 50, 52] и множественные мезофильные бактерии [39].

Таблица 1 – Влияние технологии сверхкритического диоксида углерода (СК-СО₂) на инактивацию микроорганизмов в пищевых продуктах

Table 1 – The effect of supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) technology on the inactivation of microorganisms in food products

Наименование пищевого продукта	Цель воздействия	Параметры воздействия	Альтернативная обработка	Основные результаты	Источник
1	2	3	4	5	6
Гранатовый сок	Микробная инактивация и микробиологическая стабильность	СК-СО ₂ при 12,7 МПа, 45 °C, 40 мин	Пастеризованный (90 °C, 1 мин), высокое гидростатическое давление (ННР, 600 МПа, 3 мин) и необработанный образец	Эффективен для инактивации мезофильных бактерий, дрожжей и плесени. Мезофильные бактерии обладают более высокой устойчивостью, чем дрожжи и плесени. Более высокие температуры и более длительное время обработки улучшают инактивацию микроорганизмов. Давление оказало незначительное влияние. Обработанные СК-СО ₂ , ННР и пастеризованные продукты имеют одинаковую микробиологическую стабильность	[39]
Клубничный сок	Микробная инактивация	СК-СО ₂ при 10, 30 и 60 МПа, 35, 45 и 65 °C, 10, 20 и 30 мин	Необработанный образец	Более высокие давления, температуры и время обработки привели к большей микробной инактивации. Основным параметром, влияющим на общее количество микробов, было давление	[41]
Апельсиновый сок	Кинетика инактивации <i>Escherichia coli</i> и <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	СК-СО ₂ + ГПУ при 10, 22,5 и 35 МПа, 31, 36 и 41 °C, 8 мин.	–	Скорость инактивации <i>E. coli</i> и <i>S. cerevisiae</i> увеличивалась с увеличением давления и температуры во время обработки СК-СО ₂ + ГПУ	[42]
Апельсиновый сок	Микробная инактивация	Концентрация СО ₂ ок. 8,5 мас.% при 42 °C в течение 20 мин	Термическая обработка при 70 °C в течение 7,2 с	Результаты СК-СО ₂ по микробной инактивации (аэробная мезофильная бактерии, дрожжи и плесень) аналогичны термической обработке	[46]
Апельсиновый сок	Микробная инактивация <i>Lactobacillus helveticus</i> и микробиологически показатели	СК-СО ₂ при 25 МПа, 40 °C	Пастеризовано при 90 °C, образец не обработан	Обработка СК-СО ₂ уничтожила все микробные клетки, и сок был стабилен при хранении. Пастеризованный сок имел низкую инактивацию и незначительную скорость роста микробов, тогда как необработанные соки демонстрируют высокую и быструю скорость роста микробов во время хранения (4 °C)	[43]
Апельсиновый сок	Микробная инактивация	СК-СО ₂ + ГПУ при 10 МПа; 31, 36 и 41 °C, 3 мин, 40 Вт	Пастеризация при 90 °C в течение 1 мин	СК-СО ₂ + ГПУ и инактивированная пастеризацией <i>E. coli</i> . Температуры, используемые при обработке СК-СО ₂ + ГПУ, не влияли на инактивацию <i>S. cerevisiae</i> , тогда как пастеризация обеспечивала полную инактивацию	[44]
Яблочный сок	Инактивация спор <i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	СК-СО ₂ при 60 МПа, 50 или 75 °C, 20, 30 и 40 мин	Процесс ННР при 300 МПа, 50 или 75 °C, 5, 10 и 15 мин	Умеренно высокие температуры и большее время обработки СК-СО ₂ (75 °C, 40 мин) и ННР (50 °C, 15 мин) дают лучшие результаты инактивации спор <i>A. acidoterrestris</i> в яблочном соке. Воздействие на яблочный сок, но не на концентрированные яблочные соки. Тип штамма был важным фактором	[45]
Яблочный сок	Инактивация клеток <i>Lactobacillus casei</i>	СК-СО ₂ при 10–20 МПа, 36–55 °C, 10–30 мин	–	СК-СО ₂ в условиях 15 МПа, 55 °C и 30 мин, процесс позволил снизить количество клеток <i>L. casei</i> более чем на 6 логарифмических циклов. Увеличение объема СО ₂ , температуры и времени обработки увеличивает инактивацию микроорганизмов. Давление не оказалось существенного влияния	[27]

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

1	2	3	4	5	6
Кокосовая вода	Инактивация естественных микробов и <i>Salmonella enterica</i> , инокулированных в продукте	СК-СО ₂ при 12 МПа, 25–45 °C, 1–60 мин. СК-СО ₂ +HPU, те же условия + мощность 10 Вт	СК-СО ₂ + HPU	СК-СО ₂ мог инактивировать естественную микробиоту (12 МПа, 40 °C, 30 мин), но сообщалось о повторном росте во время хранения. Усиленная HPU инактивация SC-CO ₂ <i>S. enterica</i> и естественной микробиоты в кокосовой воде Сокращение времени обработки было достигнуто за счет комбинированных технологий	[31]
Кориандр	Микробная инактивация	СК-СО ₂ и HPU + СК-СО ₂ при мощности 10, 40 и 80 Вт, 40 и 50 °C, до 90 мин	СК-СО ₂ + HPU на разных мощностях	СК-СО ₂ может инактивировать вегетативные клетки, но не споры. Наиболее эффективными условиями для СК-СО ₂ были 40 Вт, 10 МПа и 40 °C. HPU + СК-СО ₂ при мощности 40 Вт может обеспечить лучшую инактивацию микробов по сравнению с одним СК-СО ₂	[50]
Плоды масличной пальмы	Микробная инактивация	СК-СО ₂ при 7,4, 10, 30 и 50 МПа, 32–80 °C, 15–60 мин	–	Оптимальные условия, приводящие к полной микробной инактивации, достигаются при давлении 10 МПа и температуре 80 °C в течение 60 мин. Давление положительно влияло на инактивацию микроорганизмов до 10 МПа. Температура и время обработки положительно повлияли на инактивацию микроорганизмов	[47]
Кусочки клубники	Инактивация естественных микробов и инокулированных <i>E. coli</i> , <i>Salmonella enterica</i> и <i>Listeria monocytogenes</i>	СК-СО ₂ при 10 МПа, 40°C, 1, 3 и 6 ч	–	СК-СО ₂ способен эффективно инактивировать дрожжи и плесень, всего лишь создавая и сбрасывая давление в образцах. Инокулированные патогены были полностью инактивированы после 6 часов обработки	[48]
Замороженный сок личи	Инактивация природных микробов	СК-СО ₂ при 8 МПа, 36 °C, 2 мин	Обычный кратковременный высокотемпературный режим (HTST) при 90 °C в течение 60 с	Обработка СК-СО ₂ снизила микробную нагрузку. Дрожжи/плесени были полностью инактивированы при обработке СК-СО ₂ и HTST	[40]
Семена лука-порея и люцерны	Микробная инактивация <i>E. coli</i> O157:H7, <i>L. monocytogenes</i> , <i>Salmonella Thompson</i> и <i>S. Typhimurium</i>	СК-СО ₂ при 8 и 12 МПа, 35 и 45 °C, 20 мин	Образец необработанный	Патогенов, инокулированных в семенах лука-порея, было больше, чем после СК-СО ₂ . Инактивация зависела от типа семян, давления, и температуры	[49]
Ветчина сыровяленая	Микробная инактивация <i>E. coli</i>	СК-СО ₂ + HPU при 15, 25 и 35 МПа, 41, 46 и 51 °C, 5, 10 и 15 мин	Обработка СК-СО ₂ + HPU + SS (солевой раствор) в тех же условиях	Обработка СК-СО ₂ + HPU оказалась эффективной для микробной инактивации <i>E. coli</i> и микробиоты в сыровяленой ветчине. SS улучшил инактивацию <i>E. coli</i> ; лучшие результаты были получены при 25 МПа, 46 °C и 10 мин	[51]
Сырое куриное мясо	Микробная инактивация <i>E. coli</i> и природных микробов	СК-СО ₂ при 8 и 14 МПа, 40 °C, 5, 30 и 45 мин	СК-СО ₂ + свежие кулинарные травы (<i>Coriandrum sativum</i> и <i>Rosmarinus officinalis</i>)	Более длительное время обработки улучшает микробную инактивацию. Комбинация свежих трав и СК-СО ₂ не показала синергетического эффекта	[29]
Свиной фарш	Микробиологическая стабильность	СК-СО ₂ при 13,8 МПа, 35 °C, 2 ч	Комбинированная обработка СК-СО ₂ (те же условия) + 2,5 г или 5 г сухого порошка розмарина/100 г мяса и необработанного образца	Популяции микробов снижались при обработке СК-СО ₂ , причем более выраженный эффект достигался при комбинированной обработке СК-СО ₂ и 5,0 г порошка розмарина/100 г мяса	[32]
Молоко	Микробная инактивация <i>E. coli</i>	СК-СО ₂ при 8–18 МПа, 30–70 °C, 10–30 мин.	–	Условия обработки с более низким давлением, более высокой температурой и временем позволяют инактивировать <i>E. coli</i> в молоке	[26]

Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

1	2	3	4	5	6
Сыр типа моцарелла	Инактивация естественных микробов и привитых патогенов (<i>E. coli</i> , <i>Listeria innocua</i> и <i>Geobacillus stearothermophilus</i>)	СК-СО ₂ при 9,9 МПа, 35 °C, 30 мин	СК-СО ₂ + надускусная кислота (НУК) в концентрациях 50 и 100 ppm	<i>E. coli</i> была инактивирована при всех обработках. Синергетические эффекты наблюдались для <i>Listeria innocua</i> , спор <i>Geobacillus stearothermophilus</i> и местной микробиоты, такой как общее количество бактерий и общее количество дрожжей и плесени	[52]

Сокращения: НРР – высокое гидростатическое давление, НРУ – ультразвук высокой мощности.

Технология СК-СО₂ также показала эффективность в инактивации искусственно инокулированных патогенов (*Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* и/или *Listeria monocytogenes*) [26, 33, 44, 48] и микроорганизмы, вызывающие порчу (*Lactobacillus helveticus* и *Lacticaseibacillus casei*) [27, 43]. Аналогичная микробная инактивация была достигнута с помощью технологии СК-СО₂ по сравнению с традиционной термической обработкой [40, 46]. В нескольких исследованиях было достигнуто \geq 5-кратное логарифмическое снижение, что необходимо для обеспечения микробиологической стабильности [31, 42, 50, 52].

Напротив, в некоторых других исследованиях сообщалось о низкой инактивации вегетативных клеток патогенных бактерий и бактерий, вызывающих порчу, а также дрожжей [40, 44] и спор [45]. Поэтому оценка влияния остаточной микробиоты на параметры качества продукции важна для оптимизации параметров процесса и достижения полной инактивации. Насколько нам известно, результатов, полученных со спорами, недостаточно, чтобы сделать вывод об эффективности инактивационной технологии СК-СО₂. Обработанные продукты продемонстрировали стабильность при хранении при отсутствии роста микробов [39, 43] или с меньшим количеством микробов по сравнению с продуктами, подвергнутыми традиционной термической обработке [30, 52]. Однако необходимо отметить: в продуктах, обработанных СК-СО₂, были случаи возобновления роста микроорганизмов, что, как предполагалось, было связано с ростом ранее жизнеспособных, но не поддающихся культивированию клеток [31]. Эти результаты позволяют предположить, что технология СК-СО₂ может способствовать обратимым изменениям в микробных клетках. Таким образом, крайне важно, продолжить исследования с учетом возможного восстановления микробных клеток при оценке продуктов в течение периода хранения. Устойчивость микроорганизмов к действию технологии СК-СО₂ зависит от вида пищевого продукта. Технология СК-СО₂ способна инактивировать споры *Alicyclobacillus acidoterrestris* в яблочном соке (11,3 °Brix), но не в концентрированном яблочном соке (70,7 °Brix). Высокая концентрация

сухих веществ могла предотвратить прорастание спор и воздействие СО₂ на микробные клетки [45]. Кроме того, более высокая инактивация *E. Coli* O157:H7, *L. Monocytogenes* и *Salmonella* spp. наблюдалась у лука-порея, чем у семян люцерны [49]. Более низкое содержание воды и антимикробных соединений в семенах лука-порея могло способствовать более высокой эффективности СО₂ [49]. Кроме того, жидкие продукты имеют более высокую степень инактивации, чем твердые продукты, поскольку твердые продукты могут защищать микроорганизмы от СО₂ [51]. Также более эффективная степень инактивации наблюдалась в ветчине, приготовленной кубиками, чем в фарше, поскольку микроорганизмы были распределены по поверхности ветчины, нарезанной кубиками, а не по всему объему мяса [31]. Результаты отмеченных исследований позволяют сделать вывод о влиянии не только вида пищевого продукта, но также его состава и формы, поскольку эти факторы могут повлиять на эффективность технологии СК-СО₂.

Микробная инактивация также зависит от штамма: *E. coli* демонстрирует более высокую устойчивость, чем *S. Enterica* [48], *Listeria innocua* имеет более высокую устойчивость, чем *E. coli*, мезофильные бактерии с более высокой устойчивостью, чем плесени и дрожжи [29, 31, 39] и *Saccharomyces cerevisiae* с более высокой устойчивостью, чем *E. coli* [44]. В общем виде грамположительные бактерии обычно более устойчивы к процессингу СК-СО₂, чем грамотрицательные, из-за более толстой мембранны и состава клеточной стенки (в основном пептидогликана), что приводит к затруднению проникновения СО₂ в клетку и предотвращение экстракции соединений из мембран [19]. Кроме того, клеточная стенка *S. cerevisiae*, состоящая из глюкана, сшитого с белками клеточной стенки и хитином, может препятствовать эффекту СО₂ [44]. Важно подчеркнуть, что споры *Geobacillus stearothermophilus* также оказались более устойчивыми, чем вегетативные клетки бактерий [53]. Эти результаты показывают, что параметры обработки, используемые при применении СК-СО₂, могут быть определены с учетом целевого микроорганизма и необходимой инактивации. В продуктах с разнообразной микробиотой следует оценивать устойчивость раз-

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

личных микроорганизмов к СК-СО₂. Поэтому необходимы дальнейшие исследования устойчивость различных микроорганизмов не только к СК-СО₂, но и к термическим процессам.

Параметры обработки являются ключевыми факторами улучшения микробной инактивации технологии СК-СО₂, поэтому должны быть оптимизированы. В некоторых исследованиях оценивалось влияние параметров обработки на микробную инактивацию с использованием составов, обработанных в различных условиях давления, температуры и времени обработки [41–42], тогда как другие проводили эксперименты с использованием постоянных условий воздействия [39, 52].

Инактивация микроорганизмов зависит от диффузии СО₂ в микробных клетках, поскольку воздействие СО₂ увеличивает лаг-фазу и время роста микроорганизмов [13]. Таким образом, объемное соотношение СО₂ является важной, но часто игнорируемой переменной. Как правило, более высокое объемное соотношение СО₂ приводит к более высокой инактивации [27]. Результаты данного обзора показывают целесообразность и необходимость проведения дальнейших исследований по изучению объемного соотношения СО₂, а также и для других пищевых продуктов.

Применение более высоких температур приводило к большей инактивации микроорганизмов [31, 39, 51, 53]. Более высокие температуры улучшают диффузию СО₂ и увеличивают текучесть клеточной мембранны, улучшая проникновение СО₂ в клетки [10]. Однако следует отметить, что в ходе исследований в большинстве случаев использовались мягкие температуры (< 55 °С, таблица 1). Даже когда применялись высокие температуры, они, как правило, были ниже, чем те, которые используются при традиционной термической обработке, например, для пальмового масла (70–80 вместо 110–130 °С [47]). Таким образом, технология СК-СО₂ может обеспечить инактивацию микроорганизмов в более мягких температурных условиях.

Еще одним оцениваемым параметром обработки было давление. Более высокое давление приводило к большей инактивации микробов [41, 43, 47, 48, 52]. Однако в некоторых исследованиях не сообщалось о значительном влиянии давления [27, 39]. Более высокое давление может усилить контакт клеток с СО₂ и подкисление [10], что объясняет положительное влияние давления на инактивацию микробов в большинстве исследований. Однако следует отметить, что в некоторых исследованиях используемые диапазоны давления могли быть слишком низкими для улучшения контакта СО₂ с микробными клетками. Более того, иногда может существовать оптимальное давление, и при более высоких давлениях существенного влияния не наблюдается. Эти результаты показывают, что давление следует тщательно выбирать, чтобы улучшить инактивацию микробов и исключить увеличение затрат на использование

более высокого давления без существенного влияния на скорость инактивации.

Еще одним важным фактором является время обработки. Более длительное время обработки привело к более высокой микробной инактивации [29, 39, 41]. Однако в другом исследовании не было отмечено существенного влияния продолжительности обработки [54]. Несмотря на предполагаемую более высокую микробную инактивацию при более длительном времени обработки [10], часто сообщается об «остаточном» поведении (плато), при котором увеличение времени обработки не приводит к улучшению эффектов [26, 55]. Время обработки напрямую связано с начальной микробной нагрузкой, и более длительное время воздействия необходимо, когда продукт имеет высокую начальную концентрацию бактерий, поскольку высокое количество микробов может препятствовать эффекту СО₂ [31, 55]. Таким образом, важно анализировать микробиологическое качество сырья, чтобы избежать увеличения времени обработки.

В некоторых исследованиях технология СК-СО₂ использовалась с другими ингредиентами или добавками для повышения ее эффективности в инактивации микробов. Комбинация технологии СК-СО₂ и порошка розмарина снизила микробные популяции в свином фарше [32], тогда как сочетание с надкусной кислотой (НУК) улучшило инактивацию микробов в сыре типа моцарелла [53]. Однако свежие травы (розмарин и кoriандер) не показали синергического эффекта с технологией СК-СО₂ в курином мясе [29]. Результаты показывают, что условия процесса должны быть способны извлекать противомикробные соединения из трав для создания синергетического эффекта [29]. Кроме того, следует учитывать начальную микробную нагрузку, поскольку синергетический эффект технологии СК-СО₂ и надкусной кислоты наблюдался только при максимальной микробной нагрузке 3–4 log КОЕ/г [53].

Необходимо отметить, что в некоторых случаях для обеспечения безопасности и стабильности пищевых продуктов требуется длительное время обработки, а также высокие температуры и давления, что ограничивает использование технологии СК-СО₂ и увеличивает производственные затраты [31]. Более того, в некоторых случаях споры невозможно инактивировать, используя только технологию СК-СО₂ [50]. Таким образом, было рекомендовано одновременное применение технологии СК-СО₂ с другими технологиями [44]. Ультразвук высокой мощности (НРУ) может улучшить эффект инактивации *E. coli*, *S. cerevisiae*, *S. Enterica* спор в пищевых продуктах [31, 33, 44, 29]. Следовательно, это сократило необходимое время инактивации (30–45 минут против 15 минут) за счет усиления массообмена [31, 33]. Кроме того, для твердых продуктов (сырокопченой ветчины) погружение в солевой раствор усиливало действие СК-СО₂ –

НРУ на инактивацию *E. coli*. Этот эффект был связан с более энергичным перемешиванием образцов мяса и усилением кавитации [51].

Физико-химические, технологические и сенсорные свойства

В таблице 2 представлены результаты основных исследований влияния технологии СК-СО₂ на физико-химические, технологические и сенсорные свойства пищевых продуктов. В целом исследования были аналогичны тем, которые об-

суждались в отношении микробиологического качества [31, 33, 44, 46, 47, 50–55]. Однако необходимо отметить, что в некоторых исследованиях учитывались только физико-химические и технологические свойства [12, 22, 30], тогда как в других оценивались только микробиологическое качество [26, 27, 31, 47]. Всесторонняя оценка качества продуктов важна для определения результатов воздействия новой технологии на продукты.

Таблица 2 – Влияние технологии сверхкритического диоксида углерода (СК-СО₂) на физико-химические, сенсорные и качественные параметры пищевых продуктов

Table 2 – The influence of supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) technology on the physico-chemical, sensory and qualitative parameters of food products

Наименование продукта	Определяемые показатели	Параметры обработки	Альтернативная обработка	Результаты обработки	Источник
1	2	3	4	5	6
Гранатовый сок	Содержание фенола, антиоксидантная активность и цвет	СК-СО ₂ при 12,7 МПа, 45 °C, 40 мин	Обычная термическая обработка (90 °C, 1 мин) и процесс ННР (600 МПа, 3 мин)	Обработка только СК-С ₂ частично инактивировал активность ПОД. Добавление аскорбиновой кислоты показало синергетический эффект. Не влияет на значения pH и TSS. Стабильный цвет до 2 недель, меньшие изменения, чем после термической обработки	[39]
Яблочный сок	Полифенолоксидаза, активность пероксидазы, фенольный профиль, витамин С и сахара	СК-СО ₂ при 10, 30 и 60 МПа, 45 °C, 30 мин	Необработанный образец	Ни каких изменений pH и TSS. Хранение вызвало гидролиз сахарозы (15 %)	[30]
Яблочный сок, обогащенный водным экстрактом корня <i>Pfaffia glomerata</i>	pH и содержание растворимых сухих веществ, бета-эксидон, сахара и ФОС	СК-СО ₂ при 8 и 21 МПа, 40 и 60 °C, 10 мин	Термическая обработка при 105 °C в течение 10 мин, необработанный образец	Ни каких изменений в pH, содержании растворимых твердых веществ и содержании сахара. Высокотемпературная термическая обработка снизила содержание сахарозы	[22]
Клубничный сок	Полифенолоксидаза, активность пероксидазы, антиоцианы, витамин С и сахара во время хранения	СК-СО ₂ при 10, 30 и 60 МПа, 35, 45 и 65 °C, 10, 20 и 30 мин	Необработанный образец	Пероксидазы снизились на 85 %, а полифенолоксидазы были инактивированы. Гидролиз сахара. Изменения цветовых параметров, но приводящие к низким коэффициентам ΔE	[41]
Апельсиновый сок	Витамин С, органолептические показатели, мутность, общая кислотность, pH и °Brix	СК-СО ₂ при 25 МПа, 40 °C, 90 мин	Термическая обработка при 70 °C в течение 7,2 с, необработанный образец	Ни каких различий в цветовых параметрах, pH, общей кислотности, TSS и мутности не установлено. Сенсорные характеристики, аналогичные свежевыжатому	[43]
Апельсиновый сок	pH, °Brix и титруемая кислотность, цвет, аскорбиновая кислота и остаточное содержание CO ₂	СК-СО ₂ при 7,6 МПа, 42 °C, 20 мин	Термическая обработка при 90 °C в течение 60 с, необработанный образец	Ни каких изменений pH, Brix и титруемой кислотности. Изменения цветовых параметров, но приводящие к низким коэффициентам ΔE , 50 % снижение CO ₂	[46]

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

Продолжение таблицы 2 / Continuation of table 2

1	2	3	4	5	6
Монгольский сыр	Профиль текстуры, летучие соединения и сенсорный анализ во время хранения	СК-СО ₂ при 10, 15 и 20 МПа, 40, 50 и 60 °C, 60 мин	Необработанный образец	СК-СО ₂ сохраняет стабильность текстуры при хранении, снижает содержание летучих соединений (кислот и сложных эфиров), избегая появления посторонних привкусов. Не влияет на органолептические свойства	[52]
Молоко	Щелочная фосфата-за	СК-СО ₂ при 8–18 МПа, 30–70 °C, 10–30 мин	Необработанный образец	Инактивация фермента 94,5 % была достигнута при 70 °C, 8 МПа, в течение	[26]
Сывороточно-виноградный коктейль	pH, титруемая кислотность, общее количество растворимых сухих веществ, фенольные соединения, антоцианы, DPPH, активность АСЕ и летучие соединения	СК-СО ₂ при 14, 16 и 18 МПа, 35 °C, 10 мин	Термическая обработка при 72 °C в течение 15 с, образец не подвергался обработке	pH, титруемая кислотность, растворимые сухие вещества были одинаковыми. В обработанных продуктах выявлены кетоны и кислотные соединения	[28]
Сывороточно-виноградный коктейль	Цвет, размер частиц, тесты на реологию, физическая стабильность и органолептическая приемлемость	СК-СО ₂ при 14, 16 и 18 МПа, 35 °C, 10 мин	Термическая обработка при 72 °C в течение 15 с, образец не подвергался обработке	Изменения цветовых параметров, но не приводящие к визуальным изменениям. Не влияет на кажущуюся вязкость. Меньший диаметр частиц и индекс консистенции. Органолептические показатели не изменились	[23]
Сывороточный напиток Soursop, обогащенный инулином	pH, растворимые сухие вещества, микроструктурные характеристики, реологическое изменение, параметры цвета и кинетика фазового разделения	СК-СО ₂ при 10 и 20 МПа, 35 и 55 °C, 20 мин	–	Никаких изменений физико-химических и цветовых показателей. Температура и объемное соотношение СО ₂ оказали влияние на микроструктуру, реологическое поведение и кинетическую стабильность	[56]
Ветчина сырояловленная	pH, цветной и сенсорный анализ (описательный анализ)	СК-СО ₂ при 8 и 12 МПа, 35, 40, 45 и 50 °C, 5, 15 и 60 мин	Необработанный образец	Изменения цвета (меньшие значения L^* и более высокие значения a^* и b^*). Никаких изменений pH. При органолептическом анализе не было обнаружено различий в текстуре и аромате. Обработанные образцы были признаны менее яркими, с низкой общей однородностью цвета и интенсивностью цвета, чем необработанные образцы	[54]
Вареная ветчина	Текстура, pH и цвет во время хранения	СК-СО ₂ при 8, 10 и 12 МПа, 40, 45 и 50 °C, 5, 10 и 15 мин	Необработанный образец	Цветовые параметры после процесса существенно не увеличились; однако через 30 дней необработанные и обработанные образцы показали значительное снижение светлоты (L^*) и увеличение покраснения (a^*). pH и текстура существенно не изменились	[55]
Сырое куриное мясо	Текстура, pH и цвет	СК-СО ₂ при 8 и 14 МПа, 40 °C, 15, 30 и 45 мин	Образец необработанный и термообработанный (80 °C, около 1 ч)	Никаких изменений в teste на усилие резания и твердости для 8 МПа. Более низкие значения pH. Увеличение светлоты (L^*) и уменьшение красноты (a^*) на поверхности	[29]

Продолжение таблицы 2 / Continuation of table 2

1	2	3	4	5	6
Свежая курица	pH, потери при варке, водоудерживающая способность, текстура, цвет, перекисное окисление липидов при хранении	СК-СО ₂ при 2 и 14 МПа, 45 °C, 40 мин	Необработанный образец	Никаких изменений pH, потерь при приготовлении и водоудерживающей способности в результате обработки. Обработка СК-СО ₂ привела к более твердой текстуре, большей светлote и желтизне, а также уменьшению покраснений. Не влияет на цвет, аромат, вкус, сочность, нежность	[57]
Свиной фарш	pH, общий летучий основной азот, окисление липидов и цвет при хранении	СК-СО ₂ при 13,8 МПа, 35°C, 120 мин	Необработанный образец	Более высокие значения pH. Более высокие значения	[32]

Обозначение:НРР – высокое гидростатическое давление; ПМЭ – пектинмилэстераза; ПОД – полифенолоксидаза; СВ – общее количество растворимых сухих веществ.

Как видно из таблицы 2, большинство исследований связано с фруктово-овощной продукцией, в основном соками, но есть также исследования с мясом (ветчина, курица и свинина) и молочными продуктами (молоко и сыр). Преобладание фруктовых соков и других жидкых напитков может быть связано с имеющимся оборудованием и возможностью эффективной обработки жидкых продуктов. Это приводит к соответствующей микробной инактивации без негативного воздействия на качество и сенсорные параметры, в отличие от воздействия традиционной термической обработки.

Инактивация ферментов

Оксидоредуктивные ферменты, такие как полифенолоксидаза (ПФО) и пероксидаза (ПОД), могут проявлять активность во время обработки и хранения пищевых продуктов, вызывая реакции потемнения и потери качества. Инактивация этих ферментов необходима для сохранения качества продуктов на основе фруктов, и зачастую она более сложна, чем микробная инактивация [39]. Инактивация ПФО оказалась эффективной во фруктовых и овощных соках [41, 57]. В то же время инактивация ПОД была эффективной в овощном соке [57]. Однако в других исследованиях с фруктовыми соками полная инактивация ПОД и/или ПФО не достигнута [39]. Следует отметить, что даже если полная инактивация ферментов не была достигнута, активность ферментов во время хранения не вызывала изменения качества продуктов [41]. Необходимо отметить целесообразность оценки эффективности технологии СК-СО₂ в каждом продукте, поскольку степень инактивации зависела от пищевого продукта.

Ферменты гидролазы, такие как пектинмилэстераза (ПМЭ) и пектинэстераза (ПЭ), ответственны за деградацию пектина клеточной стенки, что может отрицательно влиять на качество пищевых продуктов, приводя к снижению

вязкости и изменению параметров мутности и цвета продукта [57]. Технология СК-СО₂ способна инактивировать или снизить активность ПМЭ во фруктовых и овощных соках [46, 57]. Также щелочная фосфатаза является эндогенным ферментом молока, и ее инактивация используется в качестве стандартного теста для оценки эффективности пастеризации. Технология СК-СО₂ снижала активность щелочной фосфатазы в молоке до 94,5 % [26].

Как правило, более высокие температуры и давления, а также длительное время обработки приводили к более высокой и/или более быстрой инактивации ферментов [59–60]. Однако более жесткие параметры обработки могут повлиять на пищевую ценность и/или сенсорные характеристики продуктов, при этом происходила в некоторых случаях частичная инактивация [57]. Кроме того, получены результаты, что некоторые пищевые добавки улучшают инактивацию ферментов без радикальных условий обработки. Например, в гранатовый сок была добавлена аскорбиновая кислота (0,1 %), которая показала синергетический эффект с технологией СК-СО₂ на инактивацию ферментов [39]. Сообщалось о нескольких механизмах действия денатурации фермента, таких как нарушение водородных связей и гидрофобных взаимодействий, что приводит к разворачиванию полипептидной цепи фермента, конформационных изменений из-за более низких значений pH и взаимодействия CO₂ с аминокислотными остатками в белках [10, 21].

pH, общее количество растворимых сухих веществ (СВ) и содержание сахаров

Влияния технологии СК-СО₂ на величину pH и/или общее содержание растворимых сухих веществ (СВ) в процессе обработки фруктовых соков не установлено [13, 39, 41, 46, 56], а также мясных продуктов (сырокопченая и вареная ветчина) [54, 55]. Только в двух исследованиях

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

сообщалось о влиянии на значения pH: значение pH было немного ниже для куриного мяса и немного выше значения pH для фарша из свинины [29, 32]. Во время обработки СК-CO₂ может наблюдаться небольшое и временное снижение pH в жидкой системе из-за образования угольной кислоты. Однако pH обычно возвращается к своему первоначальному значению после этапа сброса давления, не влияя на значения pH жидких продуктов [22]. Значения pH и/или СВ также не изменялись во время хранения [22, 30, 43]. Стабильность значений pH важна для поддержания биологически активных соединений, сенсорных свойств и микробной стабильности. В то же время изменения СВ могут способствовать изменению органолептических показателей фруктовых соков, что повлечет несоответствие нормативным требованиям, поскольку для этих продуктов обычно устанавливаются минимальные значения. Таким образом, в целом технология СК-CO₂ не влияет на значения pH и СВ жидких продуктов, но влияние на твердые продукты остается неясным. Также исследовали влияние обработки СК-CO₂ на содержание сахаров. В яблочном соке изменений не установлено, тогда как в клубничном соке сообщалось о гидролизе сахарозы [22, 41]. Влияние на содержание сахара зависит от вида продукта и параметров обработки. Более высокая кислотность во время обработки СК-CO₂ может ускорить реакции гидролиза [41].

Параметры цвета и мутность

Цвет считается одним из основных параметров качества и потребительского восприятия пищевых продуктов. В большинстве исследований технология СК-CO₂ не оказывала влияния на параметры цвета (L^* , a^* и b^*) [39, 46, 54]. Сообщалось о положительных изменениях цветовых параметров других продуктов, таких как более интенсивные и более светлые цвета [30, 41]. Как правило, пигменты не разрушаются при использовании технологии СК-CO₂, поскольку давление практически не влияет на ковалентные связи. Кроме того, при применении в определенных условиях технология СК-CO₂ может инактивировать ферменты и микроорганизмы, модифицирующие цвет, что приводит к стабильности цвета [43]. Также высокое давление может способствовать высвобождению пигментов из пищевой матрицы во время обработки, в результате чего получаются продукты с более интенсивными цветовыми характеристиками [16].

Вместе с тем сообщалось о нежелательных изменениях цвета некоторых продуктов, в основном о более темном цвете [46, 55] и обесцвечивании [28, 29, 32]. Более темный цвет может быть связан с реакциями потемнения, которые инициируют ферментативную деградацию полифенолов до хинонов и последующее образование пигментов [29]. В данном случае используемые параметры обработки, вероятно, не смогут эффективно инактивировать ферменты. Обесцвечивание других продуктов может быть

связано с изменениями размера частиц в продуктах, обработанных СК-CO₂, увеличивающими их дисперсность и способствующими отражению света [16, 39, 41]. Более бледный цвет мяса, вероятно, связан с денатурацией саркоплазматического белка [29, 32]. Однако в целом изменения, вероятно, не наблюдались визуально, о чем свидетельствуют низкие коэффициенты ΔE . Важно подчеркнуть, что во время хранения не было зарегистрировано никаких изменений цвета или минимальных изменений по сравнению с продуктами, прошедшими термическую обработку [39, 43]. Снижение активности фермента необходимо во избежание реакций потемнения и контроля параметров процесса для предотвращения избыточной денатурации белка.

Мутность является одним из важных показателей для фруктовых соков. В некоторых соках, таких как апельсиновый и неосветленный яблочный сок, мутность необходима; в других осветленных соках (яблочном и виноградном) мутность нежелательна. О влиянии технологии СК-CO₂ на мутность апельсинового сока не сообщалось [43]. Кроме того, стабильность к помутнению была выше в продуктах, обработанных СК-CO₂, чем в контрольных образцах [46]. Эта стабильность может быть связана с полной или частичной инактивацией ПМЭ. Кроме того, технология СК-CO₂ оказывает эффект гомогенизации, минимизируя размер частиц и повышая стабильность к помутнению [21]. Следует отметить, что необходимы дополнительные исследования для оценки влияния технологии СК-CO₂ на мутность, в основном для продуктов, для которых мутность нежелательна.

Текстурные и реологические параметры

Текстурные и реологические параметры важны для принятия продуктов потребителем, обращения с ними, хранения и реализации. В мясных продуктах технология СК-CO₂ не изменила параметры текстуры вареной ветчины [54] и куриного мяса [29, 57], при этом происходило изменение твердости и жевательной способности монгольского сыра [52]. Результаты могут быть связаны с замедлением процесса протеолиза и осаждения жира в сыре, обработанном по технологии СК-CO₂, что задерживает изменения текстуры и приводит к получению более твердых продуктов [52]. Кроме того, высокое давление в процессе воздействия технологии СК-CO₂ может повысить компактность продукта из-за его влияния на потерю белка и воды [29, 57]. СК-CO₂ является растворителем липидов и может влиять на жирность продукта, повысяв его твердость и жевательную способность. Однако параметры текстуры находились в пределах эталонных значений, полученных в предыдущих исследованиях, и имели высокую стабильность при хранении [52]. В жидких пищевых продуктах технология СК-CO₂ снизила индекс консистенции и улучшила текучесть сы-

вороточных напитков [28, 56]. Эффективность была значимой при более высоком объемном соотношении CO_2 и температуре [56]. Кроме того, кажущаяся вязкость не изменилась в сывороточно-виноградных напитках, но снизилась в сывороточных напитках из сметанного яблока. Высокое давление в технологии СК- CO_2 вызывает увеличение напряжений в системе, что приводит к разрыву агрегатов, образованию частиц меньшего диаметра и продуктов меньшей консистенции. Это также может дестабилизировать гелевую сетку, образованную ингредиентами [28, 56]. В случае сывороточного напитка из сметанного яблока присутствовали инулин, геллановая камедь и молочные белки, что объясняет более низкую кажущуюся вязкость [56]. В итоге это может вызвать структурные изменения в белках, изменяя реологическое поведение, главным образом за счет снижения консистенции [28]. Сывороточные напитки характеризуются как жидкие продукты; следовательно, технология СК- CO_2 могла способствовать улучшению реологических свойств продуктов за счет снижения индекса консистенции и, в некоторых случаях, кажущейся вязкости. Однако важно оценить влияние технологии СК- CO_2 на продукты с более высокой вязкостью, такие как йогурты, поскольку этот эффект может негативно повлиять на восприятие продуктов потребителем. В связи с этим необходимы дополнительные исследования по установлению конкретных параметров, главным образом давления, для получения продуктов, обработанных СК- CO_2 , со свойствами текстуры, аналогичными необработанным продуктам. Также следует отметить, что влияние технологии СК- CO_2 на текстуру более выражено для сложных продуктов, содержащих ингредиенты с разнообразными физико-химическими свойствами, и влияние технологии СК- CO_2 не следует экстраполировать. Поэтому применение технологии СК- CO_2 для продуктов с высоким содержанием белка и жира должно быть тщательно оценено из-за их модификации под высоким давлением и последующих изменений в текстуре продуктов.

Летучие соединения

Летучие соединения являются важными составляющими общего аромата и вкуса пищевых продуктов. Поэтому важно сохранять летучие соединения пищевых продуктов при их обработке. В ходе обзора научных исследований нами установлено только два исследования по оценке влияния технологии СК- CO_2 на состав летучих соединений пищевых продуктов, где сообщается о сохранении или улучшении состава летучих веществ после обработки при умеренном давлении по сравнению с контрольными и/или термически обработанными продуктами. Кроме того, сообщалось о более низких концентрациях летучих соединений, вызывающих неприятный привкус во время хранения, чем в необработанных продуктах [28, 56]. Одна-

ко применение более высокого давления привело к потере некоторых летучих соединений [28]. Некоторые летучие соединения демонстрируют низкую термическую стабильность в пищевых продуктах, что приводит к снижению концентрации летучих соединений после традиционной термической обработки [61]. Кроме того, нагревание может привести к реакции Майяра и окислению липидов в итоге к образованию нежелательных соединений. Однако низкое давление в технологии С-СК- CO_2 может увеличить гомогенизацию и выделение летучих соединений. Кроме того, обработка может способствовать активации ферментов, изменениям в метаболических субстратах ароматических соединений (в основном аминокислот и жирных кислот) и/или большему сохранению типичных ароматических соединений во время обработки из-за его низкого воздействия на структуру этих небольших молекулярных соединений. Однако при более высоких давлениях могут возникать реакции разложения [28, 62]. В этих случаях целесообразно восстановить летучие соединения в выходной системе и повторно включить их в продукты [28]. На основании анализа опубликованных научных исследований можно сделать вывод, что исследований по оценке летучих соединений недостаточно, чтобы точно определить влияние технологии СК- CO_2 на каждое летучее соединение, поэтому необходимо проведение дальнейших исследований для целевых летучих веществ в зависимости от пищевой матрицы. В целом технология СК- CO_2 оказывает меньшее влияние на состав летучих соединений продуктов по сравнению с традиционной термической обработкой при использовании оптимизированных параметров процесса. Таким образом, технология СК- CO_2 может оказаться перспективной для сохранения исходного ароматического профиля пищевых продуктов.

Биологически активные соединения и антиоксидантная активность

Биологически активные соединения

Биологически активные соединения, как правило, чувствительны к воздействию термической обработки, поэтому использование нетермических технологий может способствовать сохранению содержания этих соединений в пищевых продуктах. В таблице 3 обобщены основные результаты исследования влияния технологии СК- CO_2 на биологически активные соединения и антиоксидантную активность пищевых продуктов. Результаты влияния технологии СК- CO_2 на общее количество фенолов, антицианов и/или флаванонов были противоречивыми: сохранение [28], увеличение [39, 63], а в некоторых и снижение содержания [54, 64]. Однако их содержание было выше в продуктах, обработанных СК- CO_2 , чем в продуктах, подвергшихся традиционной термической обработке [63].

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

Таблица 3 – Влияние технологии сверхкритического диоксида углерода (СК-СО₂) на содержание биологически активных соединений в пищевых продуктах

Table 3 – The effect of supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) technology on the content of biologically active compounds in food products

Наименование пищевого продукта	Цель воздействия	Параметры воздействия	Альтернативная обработка	Основные результаты	Источник
Апельсиновый сок	Витамин С, антоцианы, общее количество флавонов и общее количество фенольных соединений	СК-СО ₂ при 130–230 бар, 36 °С, 15 мин	Необработанный сок и термическая обработка при 90 °С в течение 30 с	Апельсиновый сок, обработанный СК-СО ₂ , привел к более высоким значениям флавонолов, общего количества антоцианов, фенольных соединений и антиоксидантной способности, чем пастеризованный продукт	[46]
Апельсиновый сок	Концентрация витамина С	СК-СО ₂ при 25 МПа, 40 °С, 90 мин	Термическая обработка при 90 °С в течение 60 с и необработанный образец	Сок, обработанный СК-СО ₂ , сохранил 88 % витамина С, тогда как термически обработанный – 57 %	[43]
Гранатовый сок	Общее содержание фенолов и антиоксидантная активность	СК-СО ₂ при 12,7 МПа, 45 °С, 40 мин	Обычная термическая пастеризация (90 °С, 1 мин) и процесс высокого гидростатического давления (600 МПа, 3 мин)	Сок, обработанный СК-СО ₂ , увеличение общего содержания фенолов на 22 %; в термообработанном образце снижение на 15 %. Сок, обработанный СК-СО ₂ , имел антиоксидантную активность ниже (32 %), чем остальные образцы (44,5–68 %)	[39]
Виноградный сок с сывороткой	Фенольные соединения, антоцианы, активность DPPH и ACE	СК-СО ₂ при 14, 16 и 18 МПа, 35 ± 2 °С, 10 мин	Пастеризация (72 °С, 15 с)	Обе обработки не влияли на общее количество фенолов, общее количество антоцианов и активность DPPH Установлена прямая связь между ингибирующей активностью АПФ и повышением давления: 34,63 %, 38,75 % и 44,31 % (14, 16 и 18 МПа соответственно)	[28]
Сок черной смородины	Стабильность, антиоксидантная способность и биодоступность витамина С и антоцианы	СК-СО ₂ при 10, 30 и 60 МПа, 45 °С, 10 мин	Термическая обработка при 45 и 85 °С в течение 10 мин и необработанный образец	Сок, обработанный СК-СО ₂ , имел большую стабильность витамина С, общих антоцианов и антиоксидантную способность, чем термически обработанный	[63]
Клубничный сок	Антоцианы, витамин С	СК-СО ₂ при 10, 30 и 60 МПа, 35, 45 и 65 °С, 10, 20 и 30 минут	Необработанный образец	Антоцианы не подверглись воздействию обработки с СК-СО ₂ . При хранении произошла полная деградация витамина С (до четвертой недели) и деградация почти 90 % антоцианов	[41]
Клубника	Витамин С, общий антоциан и флавоноиды	СК-СО ₂ при 13,3 МПа, 40 °С, 7 ч	Необработанный образец	Сушеная клубника, обработанная СК-СО ₂ , сохраняет общее содержание витамина С (358,5 мг/100 г), 95 % общего количества антоцианов (61,68 мг/100 г) и 76 % общего содержания флавоноидов (25,85 мг/100 г). 100 г по сравнению со свежими образцами	[48]

Сокращения: АПФ, ангиотензинпревращающий фермент; DPPH – 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилгидрат; TFC – общее количество флавоноидных соединений; ТРС – общее количество фенольных соединений.

Сохранение биоактивных соединений после обработки СК-СО₂ может быть связано с сопутствующими процессами деградации одних соединений и усиленной экстракции других под действием давления [30]. Кроме того, это связано с более низкой концентрацией ингибирующих соединений в продуктах, обработанных СК-СО₂, таких как фурфурол, обычно образующийся после традиционной термической обработки. Эти соединения могут образовывать продукты конденсации с полифенолами и антоцианами, снижая их содержание. Также недостаток растворенного кислорода может предотвратить разложение фитонутриентов [28]. Учитывая результаты исследований, в которых сообщалось о повышении концентрации биоактивных соединений после обработки СК-СО₂, повышенная кислотность во время повышения давления может увеличить гидролиз полифенолов и способствовать высвобождению простых фенольных соединений, что приводит к более высоким концентрациям [30]. Кроме того, технология СК-СО₂ способствует уменьшению размера, улучшая массоперенос и скорость извлечения биологически активных соединений фитовеществ [16]. Необходимо отметить, что в большинстве исследований проведена оценка только общего содержания биологически активных соединений, ограничивая выводы только общей эффективностью новой технологии. Поэтому дальнейшие научные исследования должны быть сосредоточены на влиянии технологии СК-СО₂ на отдельные соединения пищевых продуктов, с целью оценки воздействия и возможных последствий на антиоксидантную активность.

Витамин С (аскорбиновая кислота) выполняет в организме человека несколько функций, таких как метаболизм тирозина и углеводов, синтез липидов и белков, а также усвоение железа. В ходе исследований установлено, что влияние технологии СК-СО₂ на витамин С также было неоднозначным: сохранение концентрации [46, 48], увеличение [63], а в некоторых исследованиях происходило снижение его содержания в обработанном продукте и пониженное [41, 43]. Сохранение витамина С в продуктах, обработанных СК-СО₂, было связано с заменой кислорода на СО₂ [43]. Однако, как уже отмечалось ранее, содержание витамина С все же было выше в продуктах, обработанных СК-СО₂, чем в продуктах, обработанных традиционными термическими методами.

Результат влияния технологии СК-СО₂ оценивалось также и на другие соединения, оказывающие положительное влияние на организм человека. Сообщалось о сохранении содержания, аналогичного необработанным продуктам, например, эллаговой кислоты, цианидин-3,5-диглюкозида, цианидина-3-глюкозида, дельфинидина-3,5-диглюкозида, дельфинидина-3-глюкозида и пеларгонидина-3-диглюкозида в гранатовом соке [39], протокатехиновой, хло-

рогеновой кислотах, рутина и инулина в яблочном соке [56], кофейной кислоты, эпикатехина и рутина в замороженном соке личи [20], фруктоолигосахариды (ФОС, 1-kestоза, нистоза и фруктофуранозилнистоза) и бета-экдизон в яблочном соке с добавлением водного экстракта *Pfaffia glomerata* [13], а также витамины В₁, В₂, и В₃ в курином мясе [33]. Поддержание содержания ФОС и инулина имеет первостепенное значение из-за их пребиотических свойств. Если разложение пребиотических соединений будет высоким, предприятиям придется добавлять их в более высоких концентрациях, что приведет к увеличению стоимости продуктов [16]. Бета-экдизон обладает противовоспалительными и антианальгетическими свойствами [22]. Таким образом, следует отметить, что обработка продуктов СК-СО₂ способствует сохранению биологически активных соединений на уровне необработанных продуктов. Вместе с тем, в ходе исследований получены результаты, показывающие о снижении содержания таких соединений, как галловая кислота, хлорогеновая кислота, катехин, эпикатехин, процианидин В₁ и В₂ и фlorидзин в яблочном соке [30]. В ходе хранения происходят естественные процессы окисления, однако продукты, обработанные СК-СО₂, были более стабильными, чем продукты, обработанные термически [39]. Существуют различия в устойчивости фенольных соединений к технологии СК-СО₂, а галловая кислота считается наиболее чувствительным соединением. Поэтому необходимо продолжать научные исследования с целью установления оптимальных параметров обработки для поддержания максимального содержания биологически активных соединений.

Хотя концентрация биологически активных соединений, благотворно влияющих на организм, является приемлемым параметром для определения, их потенциал влияния на здоровье человека в основном измеряется с использованием подходов биодоступности *in vitro*. Биодоступность – это количество активного соединения, высвобождаемого из пищевого матрикса и доступного для всасывания в кровоток [63]. Нами установлено, что на момент написания данного обзора только в одном исследовании оценивалось влияние технологии СК-СО₂ на биодоступность полезных для здоровья соединений, при этом не было отмечено никаких изменений в отношении витамина С и антоцианов [63]. Это в очередной раз подтверждает необходимость дальнейших научных исследований в данном направлении.

Антиоксидантная активность

Обзор результатов научных исследований показал, что антиоксидантную активность пищевых продуктов оценивали с использованием нескольких методик, таких как 2,2-дифенил-1-

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

пикрилгидразилгидрат (DPPH), 2,2'-азинобис-(3-этилбензоизазолин-6-сульфоновая кислота) (ABTS), способность поглощать кислородные радикалы и антиоксидантную способность, эквивалентную Тролоксу. Технология СК-СО₂ способствовала сохранению антиоксидантной активности пищевых продуктов, аналогичную активности необработанных продуктов, таких как фруктовые соки [27, 63] и фруктовые напитки с сывороткой [28]. Напротив, традиционная термическая обработка снижала антиоксидантную активность некоторых пищевых продуктов [63]. Сохранение антиоксидантной активности было связано с поддержанием концентрации биологически активных соединений.

Ангиотензинпревращающий фермент (АПФ) отвечает за расщепление субстратов, участвующих в регуляции артериального давления, то есть ангиотензина и брадикинина. Ингибиция АПФ используют в качестве параметра для оценки возможного антигипертензивного действия пищевых продуктов [28]. Обработка СК-СО₂ способна повысить ингибирующую активность АПФ сывороточно-виноградных напитков, главным образом, при более высоких давлениях. Авторы исследования высказали предположение, что в ходе использования технологии СК-С₂ происходит взаимодействие с биологически активными соединениями виноградного сока, в ходе которого происходит увеличение ингибирующей активности АПФ [28]. Следует отметить, что это исследование *in vitro* показывает возможное антигипертензивное действие продуктов, обработанных СК-СО₂, что открывает возможности для исследований *in vivo* на животных или клинических испытаний.

ВЫВОДЫ

Исследования, проведенные в течение более двух десятилетий, направлены на разработку эффективных технологий, гарантирующих не только безопасность пищевых продуктов, но и повышение их качества (улучшение внешнего вида, сохранение пищевой ценности и т. д.), увеличение срока хранения и снижение производственные затрат. Обзор результатов проведенных научных исследований показал, что микробная инактивация с использованием технологии сверхкритического диоксида углерода приводит к снижению микроорганизмов, вызывающих порчу и патогенных микроорганизмов больше чем на 5 log КОЕ/мл, помимо денатурации ферментов и стабильности обработанных продуктов в процессе хранения. Обработка продуктов питания СК-СО₂ способствует сохранению их органолептических и физико-химических показателей, изначального содержания биологически активных соединений и антиоксидантной активности. С целью повышения эффективности воздействия необходима оптимизация параметров обработки с целью снижения

температуры и времени обработки и, следовательно, затрат на обработку. Обработка пищевых продуктов технологией СК-СО₂, для обеспечения безопасности и микробиологической стабильности которых необходимо проводить с использованием высоких температур и давления, целесообразно сочетать с использованием противомикробных соединений. Комбинированное воздействие позволит не только обеспечить безопасность продуктов, но и снизить производственные затраты.

Необходимо продолжать научные исследования по обработке технологией сверхкритического давления диоксида углерода различных видов как сырья, так и готовых пищевых продуктов, в основном с твердых, поскольку их состав и пищевая ценность и связанная с ними порча и патогенная микробиота не позволяют на данный момент сделать общие выводы об эффективности технологии СК-СО₂. Важное значение имеют исследования по определению срока годности обработанных продуктов, поскольку после использования СК-СО₂ может происходить восстановление и рост микроорганизмов. Кроме того, биодоступность полезных для здоровья соединений и оценка биологической активности в исследованиях *in vitro* и *in vivo* имеют первостепенное значение для доказательства благотворного воздействия этой технологии. Следует проводить дальнейшие исследования для оценки влияния технологии СК-СО₂ на органолептические показатели качества и, главным образом, на восприятие потребителем пищевых продуктов, обработанных СК-СО₂. С целью дальнейшего широкого промышленного внедрения данной технологии необходимо проведение технико-экономической эффективности данного способа обработки. Необходимо оценить, будет ли оправданы инвестиционные затраты и технические проблемы для достижения качественных физико-химических и органолептических показателей продуктов питания, обработанных СК-СО₂. Высокие капитальные вложения являются главным недостатком, но более экологичный подход и снижение эксплуатационных расходов могут способствовать ее внедрению, потому как важным фактором является возрастающий потребительский спрос на технологии переработки с минимальным воздействием на качество продуктов питания и окружающую среду.

Вместе с тем важно определить цену обработанной продукции, поскольку от нее зависит готовность потребителей покупать данные продукты. Хотя многие исследования показали, что потребители были готовы платить более высокую цену за более полезные, с высокой пищевой ценностью и экологически чистые продукты питания. Потребительский спрос на более здоровые продукты питания является важным фактором, определяющим успешную реа-

лизацию и поддержание инициатив в сфере розничной торговли здоровыми продуктами питания.

Важным аспектом является нормативное законодательство, так как на сегодняшний день во всех странах ЕС, Российской Федерации, странах Таможенного Союза и многих других пищевые продукты, обработанные СК-СО₂, рассматриваются как новые продукты, для которых необходимо разработка и утверждения на законодательном уровне нормативной документации и получение разрешения на промышленное производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Burak, L.Ch., Sapach, A.N. Use of ohmic heating technology in the process of processing fruits and vegetables. Review of the subject field // Food systems. 2024. No. 7(1). P. 59-70. 73. (In. Russ.). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70>.
2. Chacha, J.S., Zhang, L., Ofoedu, C.E., Suleiman, R.A., Dotto, J.M., Korzwniowska, M. & Guiné, R.P. Revisiting non-thermal food processing and preservation methods-Action mechanisms, pros and cons: A technological update (2016–2021) // Foods. 2021. V. 10(6). p. 1430. <https://doi.org/10.3390/foods10061430>.
3. Liu, J., Bi, J., McClements, D.J., Liu, X., Yi, J., Lyu, J., Zhou, M., Verkerk, R., Dekker, M., Wu, X. & Liu, D. Impacts of thermal and non-thermal processing on structure and functionality of pectin in fruit-and vegetable-based products: A review // Carbohydrate Polymers. 2020. V. 250. p. 116890. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116890>.
4. 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>.
5. Burak, L.Ch. Modern methods of food processing. Critical review // The Scientific Heritage. 2024. No. 130(130). pp. 45-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10632041>.
6. Martins, I.B.A., Oliveira, D., Rosenthal, A., Ares, G. & Deliza, R. Brazilian consumer's perception of food processing technologies: A case study with fruit juice // Food Research International. 2019. V. 125. P.108555.
7. Dhakane-Lad, J., Kar, A. & Patel, A.S. SC-CO₂ extraction of lycopene from red papaya using rice bran oil as a co-solvent lessens its degradation during storage. Separation Science and Technology. 2023. V. 58(13). pp. 23572368. <https://doi.org/10.1080/01496395.2023.2255738>.
8. Kariyawasam, T., Doran, G.S., Howitt, J.A. & Prenzler, P.D. Optimization and comparison of microwave-assisted extraction, supercritical fluid extraction, and eucalyptus oil-assisted extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil and sediment // Environmental Toxicology and Chemistry. 2023. V. 42(5). p.982994. <https://doi.org/10.1002/etc.5593>.
9. Luca, S.V., Zengin, G., Sinan, K.I., Korona-Głowniak, I., Minceva, M., Skalicka-Woźniak, K. & Trifan, A. Value-added compounds with antimicrobial, antioxidant, and enzyme-inhibitory effects from post-distillation and post-supercritical CO₂ extraction byproducts of rosemary // Antioxidants. 2023. V. 12(2). p. 244. <https://doi.org/10.3390/antiox12020244>.
10. Wang, W., Rao, L., Wu, X., Wang, Y., Zhao, L. & Liao, X. Supercritical carbon dioxide applications in food processing // Food Engineering Reviews. 2021. V. 13. pp. 1-22. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09270-9>.
11. Allai, F.M., Azad, Z.A.A., Mir, N.A. & Gul, K. Recent advances in non-thermal processing technologies for enhancing shelf life and improving food safety // Applied Food Research. 2022. V. 3(1). p. 100258. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100258>.
12. Amaral, G.V., Silva, E.K., Costa, A.L.R., Alvarenga, V.O., Cavalcanti, R.N., Esmerino, E.A., Guimarães, J.T., Freitas, M.Q., Sant'Anna, A. S., Cunha, R.L., Moraes, J., Silva, M.C., Meireles, M.A.A. & Cruz, A. G. Whey-grape juice drink processed by supercritical carbon dioxide technology: Physical properties and sensory acceptance // LWT. 2018. V. 92. pp. 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.005>.
13. Silva, E.K., Meireles, M.A.A. & Saldaña, M.D. Supercritical carbon dioxide technology: A promising technique for the non-thermal processing of freshly fruit and vegetable juices // Trends in Food Science & Technology. 2020. V. 97. pp. 381390. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.025>.
14. Almada, C.N., Almada-Erix, C.N., Bonatto, M.S., Pradella, F., dos Santos, P., Abud, Y.K.D., Farias, A.S., Martínez, J., Sant'Anna Filho, C.B., Lollo, P.C., Cost, W.K.A., Magnani, M., & Sant'Anna, A.S. Obtaining paraprobiotics from *Lactobacillus acidophilus*, *Lacticaseibacillus casei* and *Bifidobacterium animalis* using six inactivation methods: Impacts on the cultivability, integrity, physiology, and morphology // Journal of Functional Foods. 2021. V. 87. p. 104826. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104826>.
15. Almada, C.N., Almada-Erix, C.N., Roquette, A.R., Santos-Junior, V.A., Cabral, L., Noronha, M.F., Gonçalves, A.E.S.S., dos Santos, P., dos Santos, A., Martínez, J., Lollo, P.C., Costa, W.K.A., Magnani, M. & Sant'Anna, A.S. Paraprobiotics obtained by six different inactivation processes: Impacts on the biochemical parameters and intestinal microbiota of Wistar male rats // International Journal of Food Sciences and Nutrition. 2021. V. 72(8). pp. 1057-1070. <https://doi.org/10.1080/09637486.2021.1906211>.
16. Ferreira, D.P., Magnani, M., Silva, F.A., de Oliveira, L.H., Rosset, M., Verruck, S. & Pimentel, T.C. Understanding the potential of ultrasound as an innovative tool for microbial inactivation, functionalization of plant-based foods, and improvements of functional food potential // Food Bioscience. 2023. V. 56. p. 103342. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103342>.
17. Pedrosa, G.T.S., Pimentel, T.C., Gavahian, M., de Medeiros, L.L., Pagán, R. & Magnani, M. The combined effect of essential oils and emerging technologies on food safety and quality // LWT. 2021. V. 147. p. 111593. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111593>.
18. Pravallika, K., Chakraborty, S. & Singhal, R. S. Supercritical drying of food products: An insightful review // Journal of Food Engineering. 2022. V. 343. p. 111375. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111375>.
19. Smigic, N., Djekic, I., Tomic, N., Uдовичи, B. & Rajkovic, A. The potential of foods treated with supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) as novel foods // British Food Journal. 2019. V. 121(3). pp. 815-834. <https://doi.org/10.1108/BFJ-03-2018-0168>.
20. Buszewski, B., Wrona, O., Mayya, R.P., Zakharrenko, A.M., Kalenik, T.K., Golokhvast, K.S., Piekoszewski, W., & Rafińska, K. (2021). The potential application of supercritical CO₂ in microbial inactivation of food raw materials and products. // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. V. 62(24). pp. 65356548. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1902939>.
21. Chen, Z., Spilimbergo, S., Mousavi Khaneghah, A., Zhu, Z. & Marszałek, K. The effect of supercritical carbon dioxide on the physiochemistry, endogenous enzymes, and nutritional composition of fruit and vegetables and its prospects for industrial application: A overview // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022. Dec 28. pp. 115. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2157370>.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

22. Silva, E.K., Bargas, M.A., Arruda, H.S., Vardanega, R., Pastore, G.M. & Meireles, M.A.A. Supercritical CO_2 processing of a functional beverage containing apple juice and aqueous extract of *Pfaffia glomerata* roots: Fructooligosaccharides chemical stability after non-thermal and thermal treatments // *Molecules*. 2020. V. 25(17). p. 3911. <https://doi.org/10.3390/molecules25173911>.
23. Amaral, G.V., Silva, E.K., Cavalcanti, R.N., Cappato, L.P., Guimaraes, J.T., Alvarenga, V.O., Esmerino, E. A., Portela, J.B., Sant'Ana, A.S., Freitas, M.Q., Silva, M.C. & Cruz, A.G. Dairy processing using supercritical carbon dioxide technology: Theoretical fundamentals, quality and safety aspects // *Trends in Food Science & Technology*. 2017. V. 64. pp. 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.04.004>.
24. Bastante, C.C., Cran, M.J., Cardoso, L.C., Serrano, C.M., De La Ossa, E.M. & Bigger, S.W. Effect of supercritical CO_2 and olive leaf extract on the structural, thermal and mechanical properties of an impregnated food packaging film // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2019. V. 145. p 181. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.12.009>.
25. Braga, M.E., Gaspar, M.C. & de Sousa, H.C. Supercritical fluid technology for agrifood materials processing // *Current Opinion in Food Science*. 2023. V. 50. p.100983. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100983>.
26. Ceni, G., Silva, M.F., Valério, C.Jr., Cansian, R.L., Oliveira, J.V., Dalla Rosa, C. & Mazutti, M.A. Continuous inactivation of alkaline phosphatase and *Escherichia coli* in milk using compressed carbon dioxide as inactivating agent // *Journal of CO_2 Utilization*. 2016. V. 13. pp. 24-28. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.11.003>.
27. Silva, E.K., Alvarenga, V.O., Bargas, M.A., Sant'Ana, A.S. & Meireles, M.A.A. Non-thermal microbial inactivation by using supercritical carbon dioxide: Synergic effect of process parameters // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018. V. 139. pp. 97104. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.05.013>.
28. Amaral, G.V., Silva, E.K., Cavalcanti, R.N., Martins, C.P., Andrade, L.G.Z., Moraes, J., Alvarenga, V.O., Guimaraes, J.T., Esmerino, E.A., Freitas, M.Q., Silva, M.C., Raices, R.S.L., Sant'Ana, A.S., Meireles, M.A.A. & Cruz, A.G. Whey-grape juice drink processed by supercritical carbon dioxide technology: Physicochemical characteristics, bioactive compounds and volatile profile // *Food Chemistry*. 2018. V. 239. pp. 697-703. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.003>.
29. González-Alonso, V., Cappelletti, M., Bertolini, F.M., Lomolino, G., Zambon, A. & Spilimbergo, S. Research note: Microbial inactivation of raw chicken meat by supercritical carbon dioxide treatment alone and in combination with fresh culinary herbs // *Poultry Science*. 2020. V. 99. pp. 536-545. <https://doi.org/10.3382/ps/pez563>.
30. Marszałek, K., Woźniak, Ł., Barba, F.J., Skapska, S., Lorenzo, J.M., Zambon, A. & Spilimbergo, S. Enzymatic, physicochemical, nutritional and phytochemical profile changes of apple (Golden Delicious L.) juice under supercritical carbon dioxide and long-term cold storage. *Food Chemistry*. 2018. V. 268. pp. 279286. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.109>.
31. Cappelletti, M., Ferrentino, G. & Spilimbergo, S. Supercritical carbon dioxide combined with high power ultrasound: An effective method for the pasteurization of coconut water // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2014. V. 92. pp. 257263. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.06.010>.
32. Huang, S., Liu, B., Ge, D. & Dai, J. Effect of combined treatment with supercritical CO_2 and rosemary on microbiological and physicochemical properties of ground pork stored at 4°C // *Meat Science*. 2017. V. 125. pp. 114120. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.11.022>.
33. Morbiato, G., Zambon, A., Toffoletto, M., Poloniato, G., Dall'Acqua, S., de Bernard, M. & Spilimbergo, S. (2019). Supercritical carbon dioxide combined with high power ultrasound as innovative drying process for chicken breast // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2019. V. 147. pp. 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.02.004>.
34. Rawson, A., Tiwari, B.K., Brunton, N., Brennan, C., Cullen, P.J. & O'donnell, C. P. Application of supercritical carbon dioxide to fruit and vegetables: Extraction, processing, and preservation // *Food Reviews International*. 2022. V. 28. pp. 253276. <https://doi.org/10.1080/87559129.2011.635389>.
35. Zeng, R., Lian, K., Su, B., Lu, L., Lin, J., Tang, D., Lin, S. & Wang, X. Versatile synthesis of hollow metal sulfides via reverse cation exchange reactions for photocatalytic CO_2 reduction // *Angewandte Chemie International Edition*. 2021. V. 60(47). pp. 2505525062. <https://doi.org/10.1002/anie.202110670>.
36. Yu, Z., Tang, J., Gong, H., Gao, Y., Zeng, Y., Tang, D., & Liu, X. Enzyme-encapsulated protein trap engineered metal-organic framework-derived biomimetic probes for non-invasive prostate cancer surveillance // *Advanced Functional Materials*, 2023. V. 33. p. 2301457. <https://doi.org/10.1002/adfm.202301457>.
37. Chen, Y.Y., Temelli, F. & Gänzle, M.G. Mechanisms of inactivation of dry *Escherichia coli* by high-pressure carbon dioxide // *Applied and Environmental Microbiology*. 2017. V. 83(10). e00062-17. <https://doi.org/10.1128/AEM.00062-17>.
38. Rao, L., Wang, Y., Chen, F., Hu, X., Liao, X. & Zhao, L. High pressure CO_2 reduces the wet heat resistance of *Bacillus subtilis* spores by perturbing the inner membrane // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. V. 60. p. 102291. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102291>.
39. Bertolini, F.M., Morbiato, G., Facco, P., Marszałek, K., Pérez-Esteve, É., Benedito, J., Zambon, A. & Spilimbergo, S. Optimization of the supercritical CO_2 pasteurization process for the preservation of high nutritional value of pomegranate juice // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2020. V. 164. p. 104914. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104914>.
40. Guo, M., Wu, J., Xu, Y., Xiao, G., Zhang, M. & Chen, Y. Effects on microbial inactivation and quality attributes in frozen lychee juice treated by supercritical carbon dioxide // *European Food Research and Technology*. 2011. V. 232. pp. 803811. <https://doi.org/10.1007/s00217-011-1447-3>.
41. Marszałek, K., Skapska, S., Woźniak, Ł. & Sokołowska, B. Application of supercritical carbon dioxide for the preservation of strawberry juice: Microbial and physicochemical quality, enzymatic activity and the degradation kinetics of anthocyanins during storage // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2015. V. 32. pp. 101109. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.10.005>.
42. Ortúñoz, C., Balaban, M. & Benedito, J. Modelling of the inactivation kinetics of *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae* and pectin methylesterase in orange juice treated with ultrasonic-assisted supercritical carbon dioxide // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2014. V. 90. pp. 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.03.004>.
43. Oulé, K.M., Dickman, M. & Arul, J. Properties of orange juice with supercritical carbon dioxide treatment // *International Journal of Food Properties*. 2013. V. 16(8). pp. 1693-1710. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.604893>.
44. Paniagua-Martínez, I., Mulet, A., García-Alvarado, M.A. & Benedito, J. Orange juice processing using a continuous flow ultrasound-assisted supercritical CO_2 system: Microbiota inactivation and product quality // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2018. V. 47. pp. 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.024>.
45. Porębska, I., Sokołowska, B., Skapska, S. & Rzosa, S.J. Treatment with high hydrostatic pressure and supercritical carbon dioxide to control *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores in apple juice // *Food Control*. 2017. V. 73. pp. 2430. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.06.005>.
46. Yuk, H.G., Sampedro, F., Fan, X. & Geveke, D.J.

- Non-thermal processing of orange juice using a pilot-plant scale supercritical carbon dioxide system with a gas-liquid metal contactor // Journal of Food Processing and Preservation. 2014. V. 38(1). pp.630638. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12013>.
47. Omar, A.M., Norsalwani, T.T., Khalil, H.A., Nagao, H., Zuknik, M.H., Hossain, M.S. & Norulaini, N.N. Waterless sterilization of oil palm fruitlets using supercritical carbon dioxide // The Journal of Supercritical Fluids. 2017. V. 126. pp. 6571. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.02.019>.
48. Zambon, A., Facco, P., Morbiato, G., Toffoletto, M., Poloniato, G., Sut, S., Andrigò, P., Dall'Acqua, S., Bernard, M. & Spilimbergo, S. Promoting the preservation of strawberry by supercritical CO_2 drying // Food Chemistry. 2022. V. 397. p.133789. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133789>.
49. Bourdoux, S., Zambon, A., Van der Linden, I., Spilimbergo, S., Devlieghere, F. & Rajkovic, A. Inactivation of food-borne pathogens on leek and alfalfa seeds with supercritical carbon dioxide // The Journal of Supercritical Fluids. 2022. V. 180. p. 105433. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105433>.
50. Michelino, F., Zambon, A., Vizzotto, M.T., Cozzi, S. & Spilimbergo, S. High power ultrasound combined with supercritical carbon dioxide for the drying and microbial inactivation of coriander // Journal of CO_2 Utilization. 2018. V. 24. pp. 516521. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.02.010>.
51. Castillo-Zamudio, R.I., Paniagua-Martínez, I., Ortúñoz-Cases, C., García-Alvarado, M.A., Larrea, V. & Benedito, J. Use of high-power ultrasound combined with supercritical fluids for microbial inactivation in dry-cured ham // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2021. V. 67. p. 102557. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102557>.
52. Feng, J., Zheng, Y., Zhang, X., Zhou, R. & Ma, M. Effect of supercritical carbon dioxide on bacterial community, volatile profiles and quality changes during storage of Mongolian cheese // Food Control. 2023. V. 143. p. 109225. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109225>.
53. Sikin, A.M., Walkling-Ribeiro, M. & Rizvi, S.S. Synergistic effect of supercritical carbon dioxide and peracetic acid on microbial inactivation in shredded Mozzarella-type cheese and its storage stability at ambient temperature // Food Control. 2016. V. 70. pp. 174182. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.05.050>.
54. Ferrentino, G., Balzan, S. & Spilimbergo, S. Optimization of supercritical carbon dioxide treatment for the inactivation of the natural microbial flora in cubed cooked ham // International Journal of Food Microbiology. 2013. V. 161. pp. 189196. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.12.004>.
55. Ferrentino, G., Balzan, S. & Spilimbergo, S. Supercritical carbon dioxide processing of dry cured ham spiked with *Listeria monocytogenes*: Inactivation kinetics, color, and sensory evaluations // Food and Bioprocess Technology. 2013. V. 6(5). pp.11641174. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0819-4>.
56. Silva, E.K., Guimaraes, J.T., Costa, A.L.R., Cruz, A.G. & Meireles, M.A.A. Non-thermal processing of inulin-enriched soursop whey beverage using supercritical carbon dioxide technology // The Journal of Supercritical Fluids. 2019. V. 154. p. 104635. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104635>.
57. Jauhar, S., Ismail-Fitry, M.R., Chong, G.H., Nor-Khaizura, M.A.R. & Ibadullah, W.Z.W. Application of supercritical carbon dioxide (SC- CO_2) on the microbial and physicochemical quality of fresh chicken meat stored at chilling temperature // International Food Research Journal. 2020. V. 27. pp. 103-110.
58. Marszałek, K., Krzyżanowska, J., Woźniak, Ł. & Skapska, S. Kinetic modelling of tissue enzymes inactivation and degradation of pigments and polyphenols in cloudy carrot and celery juices under supercritical carbon dioxide // The Journal of Supercritical Fluids. 2016. V. 117. pp. 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.07.016>.
59. Ren, R., Cai, G., Yu, Z. & Tang, D. Glucose-loaded liposomes for amplified colorimetric immunoassay of streptomycin based on enzyme-induced iron (II) chelation reaction with phenanthroline // Sensors and Actuators B: Chemical. 2018. V. 265. pp. 174181. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.049>.
60. Zeng, R., Huang, Z., Wang, Y. & Tang, D. Enzyme-encapsulated DNA hydrogel for highly efficient electrochemical sensing glucose // Chem Electro Chem. 2020. pp. 15371541. <https://doi.org/10.1002/celc.202000105>.
61. Liu, X., Wang, R., Liu, H., Wang, Y., Shi, Y. & Zhang, C. High-pressure treatment enhanced aromatic compound concentrations of melon juice and its mechanism // Frontiers in Nutrition. 2022. V. 9. p. 1052820. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1052820>.
62. Debbabi, H., El Mokni, R., Majdoub, S., Aliev, A. & Hammami, S. The effect of pressure on the characteristics of supercritical carbon dioxide extracts from *Calamintha nepeta* subsp. *Nepeta* // Biomedical Chromatography. 2020. V. 34(9). e4871. <https://doi.org/10.1002/bmc.4871>.
63. Trych, U., Buniowska, M., Skapska, S., Kapusta, I. & Marszałek, K. Bioaccessibility of antioxidants in blackcurrant juice after treatment using supercritical carbon dioxide // Molecules. 2022. V. 27. p. 1036. <https://doi.org/10.3390/molecules27031036>.
64. Bušić, A., Vojvodić, A., Kornes, D., Belščak-Cvitanović, A., Stolk, M. & Hofland, G. Comparative evaluation of CO_2 drying as an alternative drying technique of basil (*Ocimum basilicum* L.) - The effect on bioactive and sensory properties // Food Research International. 2014. V. 64. pp. 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.06.013>.

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 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЯСА КУРИНОЙ ГРУДКИ

**Марина Геннадьевна Курбанова¹, Сергей Сергеевич Рязанов²,
Роман Владимирович Крюк³, Арсений Дмитриевич Балаба⁴**

^{1, 2, 3, 4} ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово, Россия

¹ kurbanova-mg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0563-1007>

² serergey050503@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0950-0074>

³ roman.kryuk.94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5884-8598>

⁴ arsenibalaba003@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2003-5861>

Аннотация. Для определения свежести мяса применяют органолептические методы, на результаты которых влияет человеческий фактор и определение продуктов первичного распада белков в бульоне. В работе разработали и модернизировали методику определения свежести мяса куриной грудки, используя спектрофотометр. Исследовали степень разведения бульона, подбирали длину волны оптической плотности, проводили измерения в процессе порчи мяса куриной грудки как в естественных, так и в искусственных условиях. Показатели свежести мяса куриной грудки по оптической плотности из мясной вытяжки лучше всего определялись при следующих условиях: соотношение бульон: дистиллированная вода – 1:4 и длине волны 390 нм. Выявили, что для свежего мяса показатели оптической плотности варьируются от 0,570 до 0,445. Объектами исследования был фарш из куриной грудки. Куриное мясо является наиболее популярным источником животного белка в современном мире. Одной из причин популярности данного вида сырья является более низкая цена, которая удовлетворяет спрос среди потребителей. Сравнивая куриное мясо с другими видами сырья животного происхождения, оно является скоропортящимся продуктом, имеющим ограниченный срок годности. Большое количество микроорганизмов, находящихся на всей поверхности мяса, играют немаловажную роль в порче курицы. Данный фактор является неблагоприятным для производства, поскольку несет в себе большие потери при создании продуктов питания. Предотвращение порчи на раннем этапе производства является перспективным направлением в области определения степени свежести куриного мяса, поскольку позволит сохранить большие объемы производственного сырья.

Полученные результаты в ходе проведенных исследований позволяют сделать вывод, что в ходе проведенных научных экспериментов был выявлен объективный показатель качества, который определялся фотометрическим методом. Такой метод позволит значительно сократить время для проверки определения степени свежести куриного мяса.

Ключевые слова: куриная грудка, спектрофотометр, оптическая плотность, свежесть мяса, порча.

Для цитирования: Курбанова М. Г., Рязанов С. С., Крюк Р. В., Балаба А. Д. Новый подход к определению качественных характеристик мяса куриной грудки // Ползуновский вестник. 2025. № 1. С. 51–57. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.005. EDN: <https://elibrary.ru/QMVPVC>.

Original article

A NEW APPROACH TO DETERMINING THE QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF CHICKEN BREAST MEAT

**Marina G. Kurbanova¹, Sergey S. Ryazanov², Roman V. Kryuk³,
Arseniy D. Balaba⁴**

^{1, 2, 3, 4} Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

© Курбанова М. Г., Рязанов С. С., Крюк Р. В., Балаба А. Д., 2025

¹ kurbanova-mg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0563-1007>

² serergey050503@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0950-0074>

³ roman.kryuk.94@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5884-8598>

⁴ arsenibalaba003@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2003-5861>

Abstract. To determine the freshness of meat, organoleptic methods are used, the results of which are influenced by the human factor and the determination of the products of the primary breakdown of proteins in the broth. In the work, we developed and modernized a method for determining the freshness of chicken breast meat using a spectrophotometer. The degree of broth dilution was investigated, the optical density wavelength was selected, and measurements were made during the spoilage of chicken breast meat, both in natural and artificial conditions. The freshness indicators of chicken breast meat by optical density from meat extract were best determined under the following conditions: The ratio of broth: distilled water is 1:4 and the wavelength is 390nm. It was found that optical density values for fresh meat range from 0.570 to 0.445. The objects of the study are minced chicken breast. Chicken meat is the most popular source of animal protein in the modern world. One of the reasons for the popularity of this type of raw material is the lower price, which satisfies the demand among consumers. Comparing chicken meat with other types of raw materials of animal origin, it is a perishable product with a limited shelf life. A large number of microorganisms located on the entire surface of meat play an important role in spoiling chicken. This factor is unfavorable for production, since it carries great losses in the creation of food products. Preventing spoilage at an early stage of production is a promising direction in the field of determining the degree of freshness of chicken meat, since it will save large volumes of production raw materials. The results obtained in the course of the conducted research allow us to conclude that during the conducted scientific experiments, an objective quality indicator was identified, which was determined by the photometric method. This method will significantly reduce the time for checking the degree of freshness of chicken meat.

Keywords: chicken breast, spectrophotometer, optical density, meat freshness, spoilage.

For citation: Kurbanova, M. G., Ryazanov, S. S., Kryuk, R. V. & Balaba, A. D. (2025). A new approach to determining the qualitative characteristics of chicken breast meat. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 51-57. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.005. EDN: <https://elibrary.ru/QMVPVC>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мясо сельскохозяйственной птицы пользуется большим спросом среди производителей мясной продукции и у потребителей. Развитие птицеводства оказалось наиболее выгодным с точки зрения стандартизации процессов и повышения сбора готового переработанного сырья, что привело к значительному снижению затрат [1]. Урбанизация является главной причиной, из-за которой происходит расширение рынка, что приводит к распологаемому доходу и изменению образа жизни [17]. Мировой рынок куриного мяса быстро расширялся, особенно за последние 30 лет (рис. 1). По данным литературных источников, в 2022 году потребление курицы на человека составило 35 кг в год, в связи, с чем увеличились объемы его производства [2]. Из-за высокого роста спроса мясо птицы признано перспективным и востребованным сырьем в мясной и мясоперерабатывающей промышленности, что стимулирует рост рынка сырого куриного мяса (рис. 2).

Куриное мясо и продукты из него обладают высокой пищевой и биологической ценностью, характеризуются высоким содержанием полноценного белка (варьируется от 16 до 22 %), содержит все девять незаменимых аминокислот, макро- и микронутриенты, витамины группы В, участвующие в метаболических процессах, об-

ладает легкой усвояемостью. Мясо куриной грудки пользуется высокой популярностью, поскольку оно относится к диетическому и является альтернативным источником белка для людей во многих странах. Известно, что компоненты мяса птицы обладают различными функциональными свойствами, которые оказывают положительное влияние на здоровье и жизнедеятельность человека. К таким можно отнести: нормализацию уровня холестерина в крови; снижение возникновение риска атеросклероза и вероятности наступления инфаркта [16].

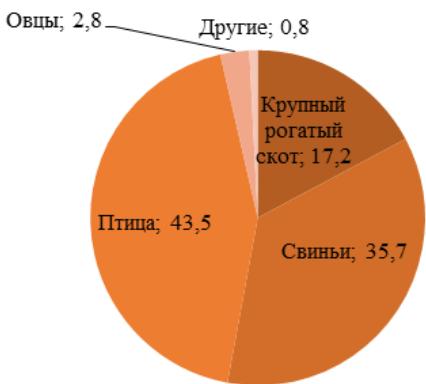


Рисунок 1 – Мировой рынок производства мяса

Figure 1 – Global meat production market

НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЯСА КУРИНОЙ ГРУДКИ

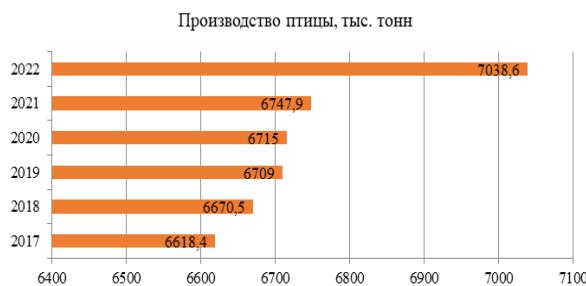


Рисунок 2 – Показатели производства мяса птицы в Российской Федерации

Figure 2 – Indicators of poultry meat production in the Russian Federation

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения ряда сравнительных экспериментов был выбран фарш из куриной грудки.

Важным фактором при переработке мяса на мясоперерабатывающих предприятиях является степень определения его свежести, которые описаны в соответствии с патентом КZ А4 31582 [3]. Для определения данного качественного показателя применяют различные методы, каждый из которых имеет как положительные, так и отрицательные аспекты. Известно, что лакмусовая бумага используется для оценки изменения pH в результате порчи мяса. Недостатком использования лакмусовой бумаги в качестве индикатора является неточное значение измерения [18].

Одной из общеизвестных методик является органолептический метод с непосредственным определением летучих жирных кислот, а также с использованием бактериоскопии мазков и подсчитыванием общего количества обнаруженных микроорганизмов. Сообщается, что к органолептическим свойствам следует относить внешний вид, запах, цвет и пробу варкой и др. Недостатком указанных способов является сложность методик и множество факторов, среди которых обязательное наличие прибора для отгонки летучих веществ с помощью серной кислоты под вытяжным шкафом. Для использования в ветеринарно-санитарной экспертизе органолептический метод небезопасен, требует опыта в проведении и подтверждения достоверности результатов [3].

Среди других методов встречаются аналогичные, но с рядом отличительных свойств: с измельчением пробы исследуемого продукта и смешиванием с дистиллированной водой в заданном соотношении. Далее, вследствие дезаминирования, протекающего под действием микроорганизмов, в нем определяют количество реагента, которым является аммиак. Недостаток этого способа заключается в длительности выполнения методики и то, что аммиак не всегда может образовываться при порче мяса [3].

Также присутствует экспресс-анализ, основанный на воздействии электромагнитного излучения определенных длин волн, а также интенсивности их отражения. В качестве показателя используют компаратор цвета, значений длины величин, интенсивность отражений исследуемого образца и эталона. Контроль ведут с учетом полученных значений величин этого отношения. Недостатком является наличие постоянного доброкачественного эталонного образца, который нужно менять при смене каждой партии мяса [3].

Наиболее приближенным способом является проба варкой, которая может применяться в лабораториях ветеринарно-санитарной экспертизы. Описание рабочего метода состоит в следующем: 20 г мясного фарша находящегося в конической колбе на 100 мл заливают дистиллированной водой в количестве 60 мл. Затем происходит тщательное перемешивание и закрытие крышкой. Далее в водяной бане готовится мясной бульон в разведении 1:3. Запах данного бульона определяется в процессе нагревания до температуры 80–85 °C в момент выхода паров. Затем 20 мл бульона наливают в мерный цилиндр и визуально устанавливают степень его прозрачности, на основании чего определяют степень свежести мяса. Недостатком также является то, что визуальная оценка разных экспертов может отличаться. И данный способ рассматривает степень определения свежести мяса в качественном, а не в количественном отношении [3].

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из вышеперечисленного, целью наших исследований явилось найти новые инновационные подходы к определению качественных характеристик мяса куриной грудки.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

1. разработать методику определения условной свежести мяса куриной грудки доступным способом;

2. подобрать и модернизировать ускоренный способ «искусственного старения» (порчи) мяса куриной грудки для исследований оптической плотности в процессе хранения и отработки методики;

3. провести исследования порчи мяса в естественных и «искусственных» условиях, для создания доступной методики определения качества куриной грудки.

В целом, идея создания методики заключается в наиболее быстром количественном определении степени свежести мяса, путем измерения оптической плотности мясной вытяжки.

Отбор проб и подготовки образцов к исследованию осуществляли согласно ГОСТ 7269-2015 «Мясо. Методы отбора образцов и органолептические методы определения свежести». Исследуемую пробу мяса куриной грудки

(без жира и кожи) измельчали и готовили фарш, затем 20 г фарша помещали в коническую колбу на 300 мл и добавляли дистиллированной воды в соотношении 1:4, 1:6, 1:10. Вытяжку встраивали в течение 10 минут, после чего профильтровывали через бумажный фильтр в чистую посуду. Далее, с помощью пипетки, с полученных фильтратов отбирали 5 мл вытяжки для дальнейшего определения оптической плотности на спектрофотометре (принцип работы представлен на рис. 3). Измерения проводили при различных длинах волн. В качестве контроля использовали кювету с дистиллированной водой.



Рисунок 3 – Схема строения спектрофотометра
Figure 3 – Diagram of the spectrophotometer structure

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На точность результатов анализа оказывается множество различных факторов, включая стабильность и качество продукта. Также доказано, что время хранения и температура влияют на состав продукта [4]. УФ – спектрофотометр наиболее точное устройство для исследования спектрального состава, применяя для этого различные длины волн в оптических диапазонах. В большинстве спектрофотометрах диапазон находится в пределах от 315 до 900 нм [5]. Данный аппарат применяется для исследования жидкых, газообразных и твердых веществ.

Спектрофотометр также широко применяется в пищевой, фармацевтической промышленности, медицине, косметологии и биотехнологии и является наиболее перспективным устройством в различных областях производства.

Для проведения исследований в лабораторных условиях технологического института пищевой промышленности Кемеровского государственного университета использовали спектрофотометр B-1100 ECOVIEW. РФ. Измерения проводили при длинах волн 390, 450, 510 нм. Ряд исследований проводили в свежей куриной грудке и в процессе ее хранения и порчи в естественных условиях при температуре 4 ± 2 °C на протяжении 4 дней. Один из наиболее перспективных методов является ускоренное старение под действием повышенной температуры окружающей среды, превышающей нормируемую температуру хранения [6]. В этой связи параллельно проводили эксперименты по «искусственному» старению мяса куриной грудки. Для ускоренной порчи куриной грудки пытались со-

здать условия, чтобы порча мяса происходила интенсивнее [11]. Принято считать, ускорение многих физико-химических и биологических процессов, а также заметное изменение органолептических показателей исследуемого сырья происходит при отклонении температурно-влажностных режимов хранения и при воздействии прямых солнечных лучей, что является наиболее агрессивным внешним фактором [7].

Все изначальные образцы свежей куриной грудки были одинакового бледно-розового цвета, без видимых дефектов, без посторонних запахов. По мере старения и порчи куриной грудки наблюдалось изменение поверхности самой грудки, образовывалась на поверхности слизь и появлялся неприятный запах. На разных этапах проводили измерения оптической плотности вытяжки, полученной из фарша мяса куриной грудки, как описывалось выше [8].

Изменения свойств продуктов при хранении обусловливаются происходящими в них процессами – физическими, химическими, биохимическими, микробиологическими, гистологическими и др., которые в одних случаях улучшают потребительские свойства продуктов, а в других вызывают их порчу [12].

Куриное мясо является быстро портящимся продуктом питания, у которого стадия порчи начинается в течение 1 недели после забоя, в зависимости от систем хранения в охлажденном виде [9]. Данная порча обусловлена различными типами микроорганизмов, таких как *Pseudomonasspp* и *Shewanellaputrefaciens*, в зависимости от исходного качества мяса птицы [13]. Микроорганизмы усваивают продукты распада белков, образующихся под воздействием выделяемых ими ферментов, таким образом, в процессе жизнедеятельности микроорганизмов происходит изменение белковых веществ, при глубоком распаде которых возникают продукты гниения [14]. В процессе гниения участвует большое число разнообразных микроорганизмов [10].

Результаты исследования представлены на рисунках 4 и 5.

Общий биохимический характер этих процессов довольно постоянен; детали изменяются в зависимости от вида микрофлоры, внешних условий, состава и свойства разлагающихся белков. В зависимости от состава белков продукты гниения будут различны, и соответственно, показатели преломления тоже отличаться. Так, анализ данных, представленных на рис. 4, показал, что в условиях естественного старения мяса куриной грудки при разбавлении бульона 1:4 (рис. 4, а) показатели оптической плотности при разных длинах волн в целом отличались, но характер изменения показателей имел общую тенденцию. Так, например, оптическая плотность для свежей грудки составила 0,429, 0,243

НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЯСА КУРИНОЙ ГРУДКИ

и 0,178 при длине волн 390, 450 и 510 нм соответственно.

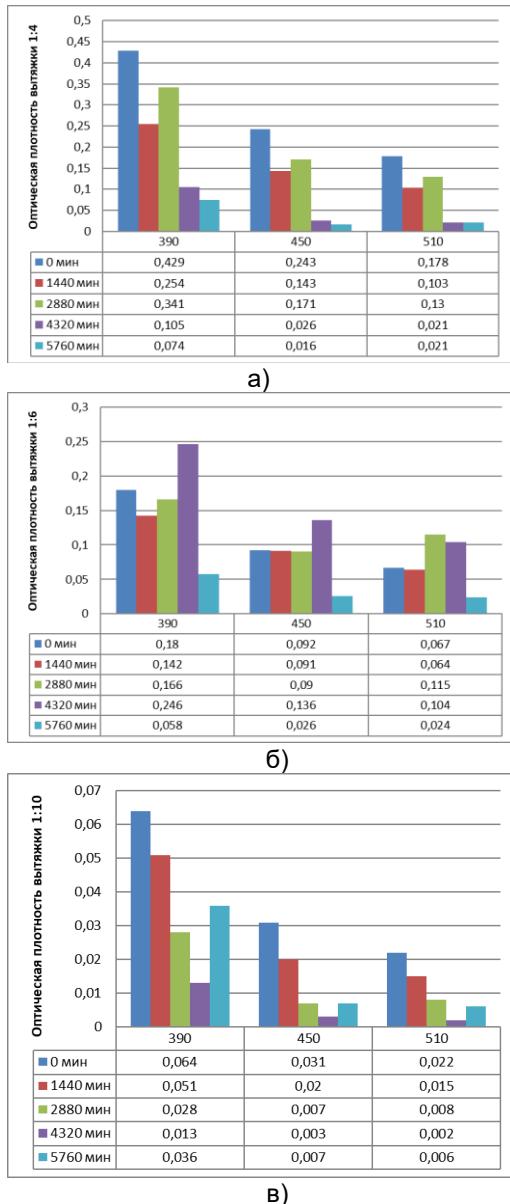


Рисунок 4 – Показания оптической плотности вытяжки бульона при естественном старении мяса куриной грудки при соотношении бульон: дистиллированная вода: а) 1:4; б) 1:6; в) 1:10 при длинах волн 390, 450, 510 нм

Figure 4 – Optical density readings of broth extraction during natural aging at the ratio of broth: distilled water: a) 1:4; b) 1:6; c) 1:10 at wavelengths of 390, 450, 510 nm

В процессе хранения мяса куриной грудки 24 часа при температуре 6 ± 2 °C и относительной влажности 78 ± 3 % наблюдалось видимое изменение показателей оптической плотности практически в 2 раза во всех исследуемых образцах и составило 0,254, 0,143 и 0,103 соответственно. При этом запах бульона не отли-

чался на восприятие сенсорной порчи от бульона из свежей грудки. Однако через 48 ч в пробах бульона при всех длинах волн показала повышенную оптическую плотность примерно на 16–20 % от показателя оптической плотности после 24 ч хранения грудки. Стоит отметить, что при разведении бульона 1:4 более выраженные показания были при длине волны 390, чем при длине волн 450 и 510 нм, тем не менее наблюдалась пропорциональные изменения оптической плотности по истечении времени для всех исследуемых образцов. Резкое падение показателей оптической плотности во всех образцах отмечались на 3 сутки естественного хранения.

При разведении вытяжки 1:6 (рисунок 4, б), тенденция измеряемых показателей несколько изменилась, и оптическая плотность для бульона свежей грудки составила 0,180, 0,092 и 0,067 соответственно при длинах волн 390, 450, 510 нм соответственно. При длине волны 390 нм наблюдалась аналогичное развитие хода эксперимента, как и при разведении бульона 1:4, однако при длинах волн 450 и 510 нм оптическая плотность изменялась в менее логичном направлении, что позволяет сделать выбор длины волны 390 нм для разведения вытяжки бульона из куриной грудки 1:6.

Разведение вытяжки бульона из куриной грудки 1:10 в принципе отражали аналогичное направление процессов порчи, как и при разведении 1:4, только результаты оптической плотности уменьшались в силу разведения бульона.

По мере увеличения продолжительности хранения куриной грудки и, соответственно, возрастаания уровня микроорганизмов изменялась и интенсивность запахов бульона, причем значительные изменения наблюдались после хранения в течение 48 часов.

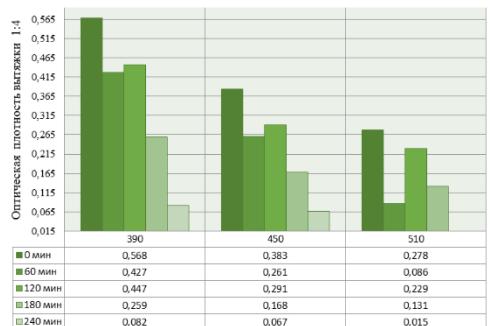
Поскольку естественный процесс порчи занимает длительное время, рабочей гипотезой послужило подбора и модернизации способа «искусственного старения» мяса куриной грудки при создании специальных температурно-влажностных режимов окружающей среды 35 ± 2 °C и влажности 80 ± 5 %.

Опыт проводили в течение 4 часов в 3-кратной повторности. Далее пытались провести сравнительную оценку «старения» мяса куриной грудки между естественным способом и искусственным, по показателям оптической плотности.

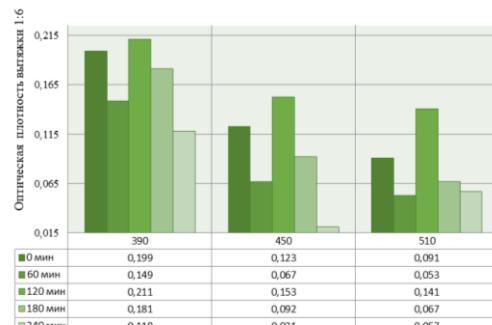
Анализ полученных результатов показал, что процессы «старения» при искусственном способе имели ту же тенденцию протекания биохимических процессов, что и в естественных условиях, только более интенсивнее [15].

Данные изменения при различном времени порчи мяса можно связать с различными видами микрофлоры, внешних условий и свойствами белков, что также приводит к различным показателям преломления.

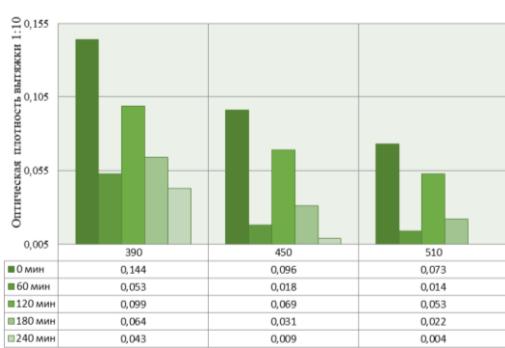
Мясо куриной грудки при искусственном старении в вытяжке 1:4 (рис. 5, а) через 60 мин выдержки в созданных условиях имел схожую тенденцию с показателями мяса порчи при естественном старении по истечении 24 часов. Бульон не имел резких посторонних запахов, характерных при порче мяса.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Показания оптической плотности вытяжки бульона при искусственном старении при соотношении бульон: дистиллированная вода: а) 1:4; б) 1:6, в) 1:10 при длинах волн 390, 450, 510 нм

Figure 5 – Optical density readings of the broth extract during artificial aging at the ratio of broth: distilled water: a) 1:4; b) 1:6, c) 1:10 at wave lengths of 390, 450, 510 nm

Резкое изменение показателей оптической плотности при всех концентрациях разведения бульона и длинах волн отмечалось после 120 мин. хранения. Показатели оптической

плотности через 180 мин. выдержки в испытуемых пробах бульона уменьшались.

В образцах с разведением вытяжки 1:6 (рисунок 5, б) показатели изменились в отличие разведения 1:4, как и при естественном старении. Оптическая плотность бульона свежей грудки составляла 0,199; 0,123 и 0,091 соответственно при длинах волн 390; 450 и 510 нм.

По полученным данным, разведение вытяжки бульона из куриной грудки 1:10 схоже по направлению процессов порчи с разведением вытяжек 1:4 и 1:6, с условием уменьшения оптической плотности, в связи с разведением бульона.

Подводя итог по определению качества куриной грудки при искусственном старении, было отмечено множество схожих факторов порчи с естественным старением, среди которых возрастание уровня микроорганизмов и появление неприятного запаха после хранения в течение 120 мин.

На основании проведенного ряда экспериментов можно сделать рекомендации по определению свежести куриной грудки спектрофотометрическим методом как при естественном старении, так и при искусственном – разведение бульона 1:4 и длине волны 390 нм (таблица 1).

Таблица 1 – Условные показатели свежести мяса по результатам оптической плотности

Состояние мяса куриной грудки	Показатели оптической плотности
Свежее	0,570-0,445
Сомнительной свежести	0,444-0,341
Несвежее	0,340-0,260

ВЫВОД

В ходе проведения ряда научных экспериментов разработали объективный показатель качества определения свежести мяса куриной грудки спектрофотометрическим методом. Определили показатели свежести мяса куриной грудки по оптической плотности из мясной вытяжки в соотношении 1:4 и длине волны 390 нм. Выявили, что для свежего мяса показатели оптической плотности варьируются от 0,570 до 0,445. С увеличением продолжительности хранения и протеканием в мясе биохимических и микробиологических процессов, приводящих к порче продукта, оптическая плотность снижается вместе с качеством мяса. Мясо куриной грудки сомнительной свежести и несвежее имело диапазон показателей оптической плотности 0,444–0,341 и 0,340–0,260 соответственно.

Для более быстрого проведения исследований, модернизировали способ «искусственного старения мяса», который заключался в создании специальных температурно-влажностных режимов окружающей среды 35 ± 2 °C, и влажности 80 ± 5 %.

НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЯСА КУРИНОЙ ГРУДКИ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Understanding the main factors that influence consumer quality perception and attitude towards meat and processed meat products / PD. de Araújo, WMC. Araújo, L. Patarata [et al.] // Meat Sci. 2022. № 193. P. 108952.
2. ГОСТ 7269-2015. Мясо. Методы отбора образцов и органолептические методы определения свежести. Дата приказа о закреплении документа за ТК 25.01.2023.
3. Патент № А4 29175 Республика Казахстан, МПК G01N 33/12. Способ определения степени свежести мяса: № 2013/1456 : заявл. 30.10.2013 : опубл. 20.10.2014 / Балджи Юрий Александрович; Майканов Балгабай Садепович. 7 с.
4. Лапшина А. А. Новые подходы к увеличению сроков годности мяса и мясопродуктов / А. А. Лапшина, Т. С. Шамина, Н. В. Тихонова // Мясные технологии. 2012. № 4(112). С. 38–40.
5. Consumers' perceptions, attitudes and perceived quality of game meat in ten European countries / I. Tomasevic, S. Novakovic, B. Solowiej [et al.] // Meat Sci. 2018. №142:5. P. 13.
6. Исследование определения срока годности лекарственных средств на спектрофотометре / С. С. Рязанов, А. Д. Балаба, А. Ю. Колбина [и др.] // Медико-биологические и нутрициологические аспекты здоровьесберегающих технологий. 2023. С. 331.
7. Сафина Г. Ф. Долговечность семян при хранении и ее прогнозирование методом ускоренного старения / Г. Ф. Сафина, Г. И. Филипенко // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2013. Т. 174. С. 123–130.
8. Сроки годности безалкогольных напитков с применением методов ускоренного старения / М. Н. Школьникова, Е. В. Аверьянова, И. Э. Цапалова [и др.] // Пиво и напитки. 2006. № 4.
9. Factors affecting stated liking for meat products: Focus on demographics, oral responsiveness, personality, and psycho-attitudinal traits / C. Dinnella, F. Napolitano, S. Spinelli [et al.] // Meat Sci. 2023. № 195. P. 109004.
10. Introduction to the special issue of meat science on 'perspectives on consumer attitudes to meat consumption' / P. P. Purslow, W. Zhang [et al.] // Meat Sci. 2022. № 193. P. 108956.
11. Perception of beef quality for Spanish and Brazilian consumers / B. Boito, E. Lisbinski, MDM. Campo [et al.] // Meat Sci. 2021. № 172. P. 108312.
12. Mathematical modeling for freshness/spoilage of chicken breast using chemometric analysis / H. J. Kim, H. C. Kim, D. Lee [et al.] // Curr Res Food Sci. 2023. № 7. P. 100590.
13. Перкель Т. П. Физико-химические и биохимические основы производства мяса и мясных продуктов : учеб. пособие для студентов вузов / Т. П. Перкель / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. Кемерово, 2004. 100 с.
14. Perception of fat and other quality parameters in minced and burger meat from Spanish consumer studies / M. Cardona, A. Gorri, JM. Barat [et al.] // Meat Sci. 2020. № 166. P. 108138.
15. The effect of housing system on rabbit growth performance, carcass traits, and meat quality characteristics of different muscles / O. Krunt, L. Zita, A. Kraus [et al.] // Meat Sci. 2022. № 193. P. 108953.
16. Kinetics of enthalpy relaxation of milk protein concentrate powder upon ageing and its effect on solubility / E. Haque, AK. Whittaker, MJ. Gidley [et al.] // Food Chem. 2012. № 134(3). P. 1368–1373.
17. Change in molecular structure and dynamics of protein in milk protein concentrate powder upon ageing by solid-state carbon NMR / H. Enamul, B. R. Bhesh, M. J. Gidley [et al.] // Food Hydrocolloids. 2015. № 44. P. 66–70.
18. Effect of processing methods and protein content of the concentrate on the properties of milk protein concentrate with 80% protein / L. S. Rupp, M. S. Molitor, J. A. Lucey [et al.] // Dairy Sci. 2018. № 101(9). P. 7702–7713.

Информация об авторах

М. Г. Курбанова – доктор технических наук, профессор, Кемеровский государственный университет, заведующая кафедрой технологии продуктов питания животного происхождения.

С. С. Рязанов – Кемеровский государственный университет студент.

Р. В. Крюк – кандидат технических наук, Кемеровский государственный университет, доцент кафедры технологии продуктов питания животного происхождения.

А. Д. Балаба – Кемеровский государственный университет студент.

Information about the authors

M. G. Kurbanova - Doctor of Technical Sciences, Professor, Kemerovo State University, Head of the Department of Food Technology of Animal Origin.

S. S. Ryazanov - Kemerovo State University student.

R. V. Kruk - Candidate of Technical Sciences, Kemerovo State University, Associate Professor of the Department of Food Technology of Animal Origin.

A. D. Balaba - Kemerovo State University student.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)

УДК 663.03:664.87

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.006

EDN: RNRMKD

ВЫСУШЕННЫЙ ФЕРМЕНТОЛИЗОВАННЫЙ ПОЛУФАБРИКАТ ИЗ МЯКОТИ ТЫКВЫ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

Евгений Дмитриевич Рожнов¹, Марина Николаевна Школьникова²,
Венера Нагимовна Аббазова³, Вячеслав Леонидович Захаров⁴

^{1, 2, 3} Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

red@btu.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3982-9700>

² shkolnikova.m.n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9146-6951>

³ abbazova@usue.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2009-8856>

⁴ Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, Елец, Россия

zakharov7979@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4891-658X>

Аннотация. Статья посвящена получению высушенного полуфабриката из мякоти тыквы с высокой биологической ценностью за счет разрушения нативных полимеров сырья использованием ферментных препаратов Амилоризин и Протозим. Ферментолиз нативного пюре осуществляли в лабораторном реакторе объемом 2 дм³ при температуре 70±2 °C и непрерывном перемешивании в течение 60 мин, высушивание – в вакуумном сушильном шкафу Labtex LT-VO/50 при температуре 60–80 °C на силиконовых ковриках при толщине слоя пюре 5–7 мм до влажности 5 %. Эффективность процессов оценивали по содержанию каротиноидов. Установлено, что полный гидролиз крахмала мякоти тыквы обеспечивает обработка в течение 60 мин мультиэнзимной композицией с содержанием Амилоризина 25 ед. АС/г, Протозима – 10 и 15 ед. ПС/г сырья, позволяющая увеличить содержание β-каротина на 8,4–10,3 % и улучшить органолептические показатели: текстура приобретает однородность без характерной для нативного пюре крупинчатости, что делает внешний вид и аппетитность пюре более привлекательными, во флейворе нет тона сырых овощей, аромат и вкус пареной тыквы, приятные и гармоничные. Доказано, что вакуумная сушка (при остаточном давлении 133 Па) при температуре 70 °C позволяет получить пюре с конечной влажностью 5 % и сохранением 96 % β-каротина от начального содержания в ферментолизованном пюре. Показано, что одним из перспективных направлений в переработке тыквы может стать гибридная технология ферментолиза и сушки пюре при температуре 60–80 °C для получения наиболее оптимальной формы полуфабриката – пюре, использование которого в пищевых системах имеет значительные перспективы.

Ключевые слова: ферментолиз, мякоть тыквы, пюре, вакуумная сушка, каротиноиды, пищевые системы.

Для цитирования: Рожнов Е. Д., Школьникова М. Н., Аббазова В. Н., Захаров В. Л. Высушенный ферментолизованный полуфабрикат из мякоти тыквы как основа для пищевых систем // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 58–68. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.006. EDN: <https://elibrary.ru/RNRMKD>.

Original article

DRIED FERMENTED SEMI-FINISHED PRODUCT FROM PUMPKIN PULP AS A BASE FOR FOOD SYSTEMS

Evgeny D. Rzhnov¹, Marina N. Shkolnikova²,
Venera N. Abbaeva³, Vyacheslav L. Zakharov⁴

^{1, 2, 3} Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

¹ red@btu.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3982-9700>

² shkolnikova.m.n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9146-6951>

© Рожнов Е. Д., Школьникова М. Н., Аббазова В. Н., Захаров В. Л., 2025

ВЫСУШЕННЫЙ ФЕРМЕНТОЛИЗОВАННЫЙ ПОЛУФАБРИКАТ ИЗ МЯКОТИ ТЫКВЫ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

³abbazova@usue.ru , <https://orcid.org/0000-0002-2009-8856>

⁴Yelets State University named after I.A. Bunin, Yelets, Russia
zaxarov7979@mail.ru , <https://orcid.org/0000-0003-4891-658X>

Abstract. The article is devoted to the production of a dried semi-finished product from pumpkin pulp with high biological value due to the destruction of native polymers of raw materials using the enzyme preparations Amilorizine and Protozyme. The fermentolysis of the native puree was carried out in a laboratory reactor with a volume of 2 dm³ at a temperature of 70 ± 2 °C with continuous stirring for 60 minutes, drying - in a Labtex LT-VO/50 vacuum drying cabinet at a temperature of 60-80 °C on silicone mats with a layer thickness of mashed potatoes 5-7 mm to a humidity of 5%. The effectiveness of the processes was assessed by the content of carotenoids. It was found that the complete hydrolysis of pumpkin pulp starch is provided by treatment for 60 minutes with a multienzyme composition with an Amylorizine content of 25 units. AC/g, Protozyme - 10 and 15 units. PS/g of raw materials, which allows to increase the content of β-carotene by 8.4-10.3% and improve organoleptic parameters - the texture acquires uniformity without the characteristic coarseness of the native puree, which makes the appearance and appetitiveness of the puree more attractive, there is no tone of raw vegetables in the flavor, the aroma and taste of steamed pumpkin are pleasant and harmonious. It has been proven that vacuum drying (at a residual pressure of 133 Pa) at a temperature of 70 °C allows you to obtain a puree with a final moisture content of 5% and preservation of 96% β-carotene from the initial content in the fermentalized puree. It is shown that one of the promising directions in pumpkin processing can be a hybrid technology of fermentolysis and drying of puree at a temperature of 60-80 °C to obtain the most optimal form of semi-finished product - puree, the use of which in food systems has significant prospects.

Keywords: fermentolysis, pumpkin pulp, puree, vacuum drying, carotenoids, food systems.

For citation: Rozhnov, E. D., Shkolnikova, M. N., Abbazova, V. N. & Zakharov, V. L. (2025). Dried fermented semi-finished product from pumpkin pulp as a base for food systems. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 58-68. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.006. EDN: <https://elibrary.ru/RNRMKD>.

ВВЕДЕНИЕ

Тыква – одна из традиционных сельскохозяйственных культур, выращиваемая практически на всей территории России. В настоящее время род семейство Тыквенные (*Cucurbitaceae*) включает в себя пять одомашненных видов, из которых три (*Cucurbita moschata*, *C. pepo* и *C. maxima*) являются промышленно выращиваемыми и экономически значимым сырьевым ресурсом [1, 2].

Состав мякоти плодов тыквы весьма разнообразен (рисунок 1), что обуславливает ряд ее терапевтических эффектов.

Так, основная часть сухого вещества тыквы представлена полисахаридами – растворимыми и нерастворимыми (пищевыми волокнами) [3]. Имеются исследования, в которых *in vivo* достоверно установлена связь между употреблением полисахаридов из мякоти тыквы и снижением уровня глюкозы в сыворотке крови крыс с диабетом, индуцированным аллоксаном или стрептозотоцином [4-6]. В исследованиях [7-9] показана положительная динамика от употребления тыквенного порошка и других продуктов из мякоти тыквы на снижение концентрации глюкозы в крови пациентов с инсулинозависимым диабетом (диабет 1 типа) и инсулиннезависимым диабетом (диабет 2 типа).

В плодах тыквы обнаружено три фрак-

ции пектиновых веществ: водорастворимых, растворимых в ЭДТА и щелочах [10-12]. Экспериментально установлено, что пектиновые вещества тыквы обладают эффектом задержки глюкозы и желчных кислот [13, 14], а также оказывают стимулирующее действие на развитие полезной микрофлоры желудочно-кишечного тракта [15]. В опытах *in vivo* на самцах крыс линии Sprague-Dawley показано значительное снижение уровня холестерина и жирных кислот в крови при содержании их на рационе с мякотью тыквы [9].

Мякоть тыквы содержит высокое количество каротиноидов (в среднем 7,5 мг/100 г) – основного источника витамина А, необходимого для нормальной работы зрительного аппарата и эмбрионального развития, поддержания эпителиальной ткани, а также иммунной системы это тоже из источника [16]. Основным каротиноидом кожуры и мякоти тыквы является β-каротин (от 0,05 мг/100 г до 29,4 мг/100 г [17], также содержатся лютеин (0,03-12,9 мг/100 г) [17], ликопин, криптоксантины и цис-каротин [18]. Имеются сведения о положительном использовании каротиноидов тыквы для эффективного восполнения их дефицита каротиноидов в плазме крови, вызванного курением и употреблением алкоголя [19], а также при разработке рационов геронтологической направленности [20].

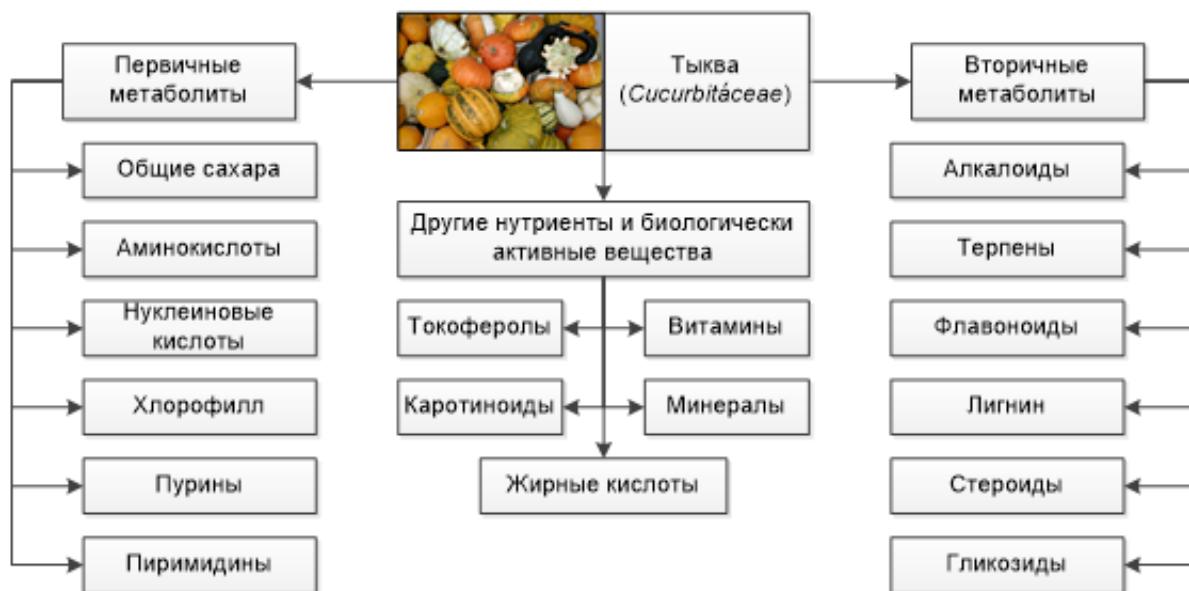


Рисунок 1 – Обобщенный химический состав мякоти тыквы (составлено авторами)

Figure 1 – Generalized chemical composition of pumpkin (compiled by the authors)

Ряд сортов тыквы содержат значительное количество кальция (до 200 мкг/г) и калия (до 1800 мкг/г) при низком содержании натрия (менее 30 мкг/г) [21, 22], что делает пищевые системы на основе тыквы привлекательными в рационе для людей среднего и пожилого возраста [23], а также для профилактики остеопороза и гипертонии [24, 25]. Высокое содержание в тыкве хрома, являющегося компонентом фактора толерантности к глюкозе и необходимого для повышения активности инсулина, еще раз подчеркивает необходимость включения тыквы в рационы людей, страдающих диабетом, в том числе в сочетании с гипертонической болезнью [26, 27].

Несмотря на относительно низкое содержание белка в плодах тыквы (около 2 % от массы сухого вещества), в мякоти тыквы присутствуют различные незаменимые аминокислоты (в первую очередь, лизин, валин, лейцин, изолейцин, фенилаланин и треонин) [28, 29].

Имеются исследования, указывающие на наличие в тыкве широкого спектра иммунокомпетентных пептидов [30–32], играющих важную роль в поддержании иммунной системы организма. Также обнаружены противогрибковые белки, способные подавлять развитие гиф *Neurospora crassa* и ингибировать рост *Fusarium oxysporum* и *Candida albicans* что спровоцировало ряд исследований в области использования белков тыквы в качестве натуральных консервантов [33–35].

Тыква по объему производства занимает девятое место среди овощей и, несмотря на некоторую хранимоспособность, сезонная переработка плодов, и как следствие, увеличение срока годности и минимизация послеуборочных

потерь приобретают все большую значимость [36]. При этом тенденции в переработке направлены на разработку максимально эффективных технологий, позволяющих сохранить нативный потенциал мякоти тыквы.

Таким образом актуальность и значимость исследований в области технологий переработки плодов тыквы (в том числе с использованием методов пищевой биотехнологии) для использования в качестве основы для разработки пищевых систем не вызывает сомнений. Одним из перспективных направлений в переработке тыквы может стать гибридная технология ферментолиза и сушки пюре при пониженной температуре для получения наиболее оптимальной формы полуфабриката, который компактно хранится длительное время, легко восстанавливается водой, содержит значительное количество микронутриентов и т.д.

Цель исследований – разработка подходов к получению высушенного полуфабриката из тыквы с высокой пищевой и биологической ценностью за счет разрушения нативных полимеров сырья использованием ферментных препаратов.

МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись образцы пюре из мякоти тыквы «Россиянка» урожая 2023 г, выращенной в Свердловской области: нативное, ферментолизованное и ферментолизованное высушенное. Дизайн эксперимента представлен на рисунке 2.

ВЫСУШЕННЫЙ ФЕРМЕНТОЛИЗОВАННЫЙ ПОЛУФАБРИКАТ ИЗ МЯКОТИ ТЫКВЫ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

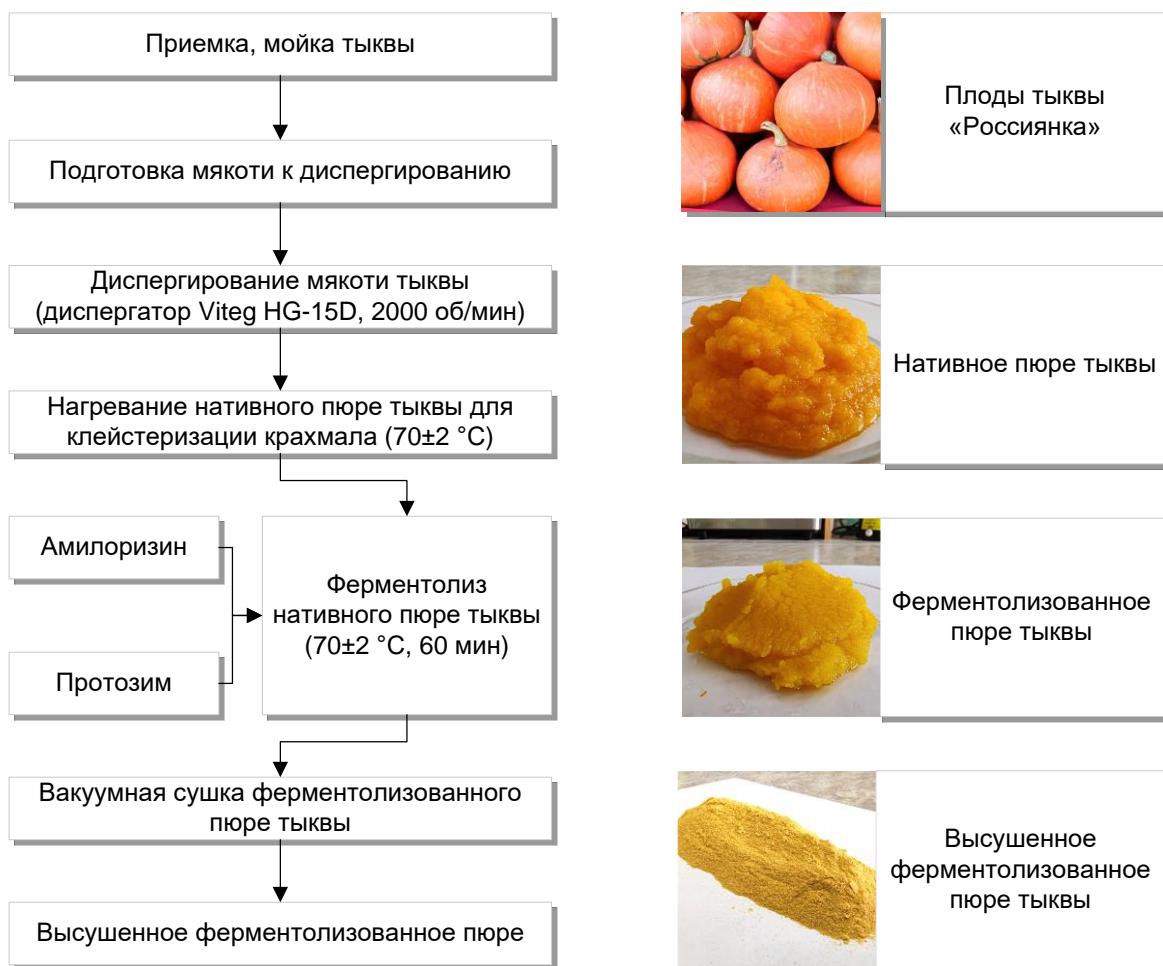


Рисунок 2 – Дизайн эксперимента

Figure 2 – Experiment design

Нативное пюре получали диспергированием очищенной от кожуры и семянной массы мякоти тыквы в гомогенизаторе Viteg HG-15D при частоте вращения ротора 2000 об/мин.

Для ферментации биополимеров нативного пюре тыквы (прежде всего крахмала и белков) использовали ферментные препараты Амилоризин и Протозим (ООО Биопрепарат, Россия), характеристика которых представлена в таблице 1.

Для проведения ферментолиза нативное пюре тыквы нагревали до 70±2 °C для осуществления температурной клейстеризации крахмала сырья (значение температуры установлено экспериментально). Затем в пюре при постоянном перемешивании вводили водные растворы ферментных препаратов Амилоризин и Протозим (соотношение вода:препарат – 10:1). Ферментолиз нативного пюре тыквы продолжали в течение 60 минут при постоянном перемешивании и термостатировании.

Таблица 1 – Характеристика ферментных препаратов

Table 1 – Characteristics of enzyme preparations

Препарат	Активность	Рабочие условия действия	
		pH, ед.	T*, °C
Амилоризин	2 500ед. АС/г	3,5–8,0	30–70
Протозим	50 000ед. ПС/г	5,5–11,0	25–70

* Т – температура

Ферментолизованное тыквенное пюре высушивали в вакуумном сушильном шкафу Labtex LT-VO/50 при температуре 60–80 °C на силиконовых ковриках при толщине слоя пюре 5–7 мм. Сушку осуществляли до конечной влажности продукта не более 5 %.

Содержание сухих веществ в нативном пюре из тыквы, а также влажность высушенного ферментолизованного пюре определяли по ГОСТ 28561-90 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги.

Содержание сахаров в нативном и ферментолизованном пюре из тыквы определяли перманганатным методом по ГОСТ 8756.13-87 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сахаров.

Определение крахмала в нативном пюре тыквы и продуктах ферментолиза проводили спектрофотометрически по [37] с использованием однолучевого сканирующего спектрофотометра Shimadzu UV1800 (Shimadzu, Япония).

Определение белка проводили в соответствии с ГОСТ 54607.7-2016 Услуги общественного питания. Методы лабораторного контроля продукции общественного питания. Часть 7. Определение белка методом Кельдаля.

Определение содержания β -каротина проводили по ГОСТ ISO 6558-2-2019 Фрукты, овощи и продукты их переработки. Определение содержания каротина спектрофотометрическим методом (метод А).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе исследовали органолептические показатели и химический состав нативного пюре из тыквы (таблица 2).

Таблица 2 – Фитохимический профиль пюре из тыквы «Россиянка» ($M \pm m$, $n = 3$)

Table 2 – Phytochemical profile of pumpkin puree “Rossiyanka” ($M \pm m$, $n=3$)

Показатель	Значение
Массовая доля сухих веществ, %	$10,48 \pm 0,89$
Массовая доля сахаров, % (на а.с.в.)	$5,37 \pm 0,07$
Массовая доля крахмала, % (на а.с.в.)	$3,26 \pm 0,21$
Массовая доля белка, % (на а.с.в.)	$1,21 \pm 0,16$
Массовая концентрация β -каротина, мг/100 г	$4,18 \pm 0,09$

Нативное пюре тыквы представляет собой гомогенную массу со свойственным сырью цветом. Запах овощной, характерный. Вкус – сырых овощей, слабо сладкий, мало гармоничный. Отмечался слабый синерезис, в виде отделения незначительного объема жидкости (количественно не оценивалось).

В результате нагрева тыквенного пюре в диапазоне температур 65–75 °C пюре приобрело «шелковистую» поверхность, явление синерезиса не наблюдалось.

Ферментолиз нативного пюре тыквы осуществляли в лабораторном реакторе объемом 2 дм³ при непрерывном перемешивании и температуре 70±2 °C в течение 60 мин. В процессе ферментолиза контролировали содер-

жание каротиноидов, поскольку известно, что каротиноиды находятся в связанном состоянии с полимерами сырья, в первую очередь с белками. Таким образом, направленное воздействие ферментными препаратами на полимеры мякоти тыквы должно обеспечить высвобождение каротиноидов из матрикса, что повысит их биодоступность в составе пищевых систем. При ферментолизе совместно использовались следующие дозировки ферментных препаратов: Амилоризин – 25 ед. АС/г сырья (экспериментально найденная дозировка, обеспечивающая полный гидролиз крахмала тыквы в течение 60 мин); Протозим – 5, 10 и 15 ед. ПС/г сырья. Эффективность ферментолиза оценивали по количеству каротиноидов. Данный показатель был выбран в качестве контрольного, поскольку известно, что в растительном сырье каротиноиды находятся в основном в связанном состоянии с белками и другими полимерными молекулами [38], таким образом разрушение белкового каркаса должно приводить к накоплению каротиноидов в тыквенном пюре при ферментолизе. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.

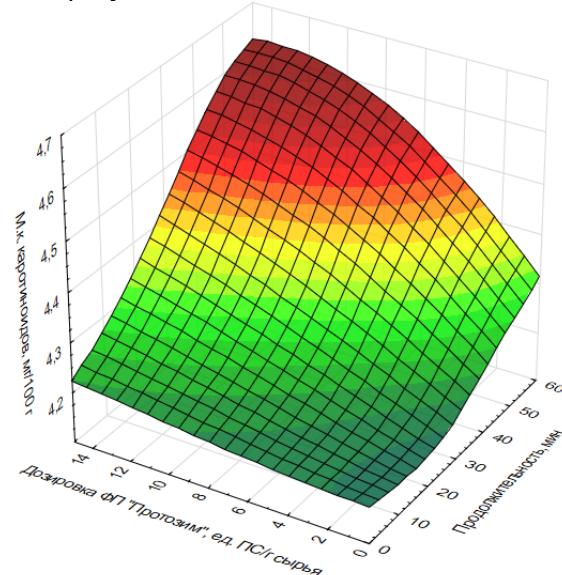


Рисунок 3 – Зависимость массовой концентрации каротиноидов в тыквенном пюре при ферментолизе (в пересчете на β -каротин)

Figure 3 – Dependence of the mass concentration of carotenoids in pumpkin puree during fermentolysis (in terms of β -carotene)

Полученные в ходе эксперимента результаты в целом описываются уравнением регрессии ($r^2 = 0,934$):

$$Car = 4,069 + 0,0068x + 0,0011y,$$

где Car – массовая концентрация каротиноидов, мг/100 г; x – продолжительность ферментолиза,

ВЫСУШЕНЫЙ ФЕРМЕНТОЛИЗОВАННЫЙ ПОЛУФАБРИКАТ ИЗ МЯКОТИ ТЫКВЫ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

мин; у – дозировка ферментного препарата «Протозим», ед. ПС/г сырья.

На следующем этапе исследовали химические показатели ферментолизованного тыквенного пюре (табл. 3).

Ферментолизованное тыквенное пюре охлаждали до комнатной температуры и сравнивали его органолептические характеристики с нативным пюре из мякоти тыквы (рисунок 4). В ходе опробования установлено, что в результате ферментолиза органолептические характеристики нативного пюре из мякоти тыквы существенно улучшаются. Так, отмечено значительное увеличение ощуще-

ния сладости во вкусе, текстура пюре приобретает однородность, при этом характерная для нативного пюре крупинчатость устраняется. Все это делает полуфабрикат более привлекательного внешнего вида и повышенной аппетитности. Во флейворе пропадают тона сырых овощей, ферментолизованное пюре приобретает приятные и гармоничные аромат и вкус пареной тыквы. Процесс высушивания ферментолизованного тыквенного пюре проводили в вакуумном сушильном шкафу Labtex LT-VO/50 при температуре 60–80 °С с интервалом 10 °С на силиконовых ковриках при толщине слоя пюре 5–7 мм.

Таблица 3 – Фитохимический профиль ферментолизованного пюре из тыквы «Россиянка» ($M \pm m$, $n = 3$)

Table 3 – Phytochemical profile of fermented pumpkin puree “Rossiyanka” ($M \pm m$, $n=3$)

Показатель	Значение		
	Протозим, 5 ед ПС/г сырья	Протозим, 10 ед ПС/г сырья	Протозим, 15 ед ПС/г сырья
Массовая доля сахаров, % (на а.с.в.)	7,36±0,13	7,45±0,11	7,41±0,08
Массовая доля крахмала, % (на а.с.в.)	н.о.	н.о.	н.о.
Массовая доля белка, % (на а.с.в.)	0,24±0,06	0,14±0,04	н.о.
Массовая концентрация β-каротина, мг/100 г	4,49±0,08	4,61±0,11	4,58±0,07

Примечание: н.о. – не определяется.

На рисунке 5 представлены данные, характеризующие изменение влагосодержания в слое ферментолизованного тыквенного пюре при вакуумной сушке (остаточное давление 133 Па) и скорость удаления влаги из образцов.

Отмечено, что повышение температуры вакуумной сушки с 60 до 80 °С позволяет со-

кратить время сушки в 2 раза (рисунок 5, а), что подтверждается данными о скорости удаления влаги (рисунок 5, б).

Также оценивали возможную убыль каротиноидов (на а.с.в.) при сушке (рисунок 6). В эксперименте установлено, что общие потери каротиноидов при сушке при температуре 60–70 °С незначительны и не превышают 4 %.

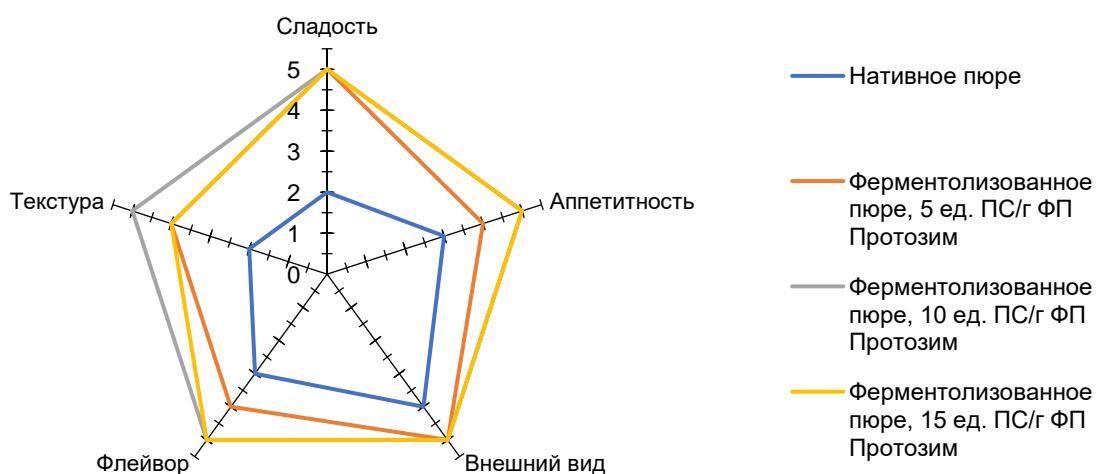


Рисунок 4 – Радар-диаграмма органолептических свойств опытных образцов тыквенного пюре

Figure 4 – Radar-diagram of organoleptic properties of experimental samples of pumpkin puree

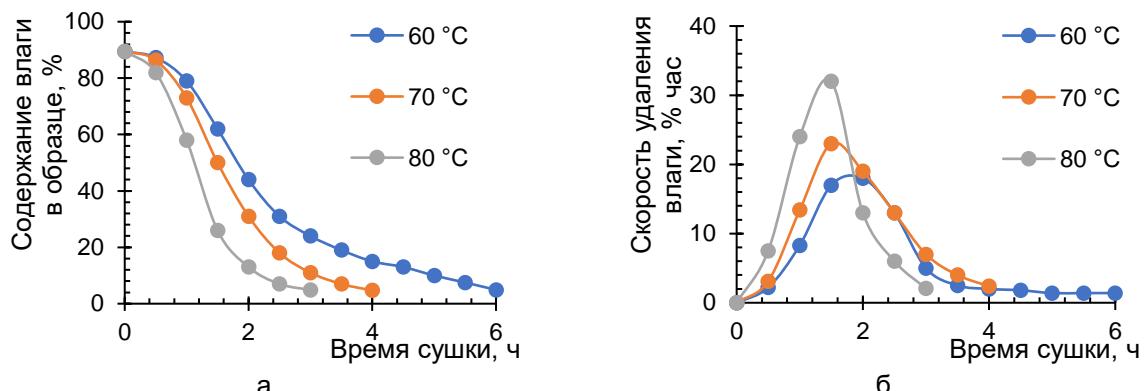


Рисунок 5 – Динамика процесса вакуумной сушки ферментолизованного тыквенного пюре:

Figure 5 – Process dynamics of vacuum drying of fermented pumpkin puree:
a – change in moisture content; b – rate of moisture removal

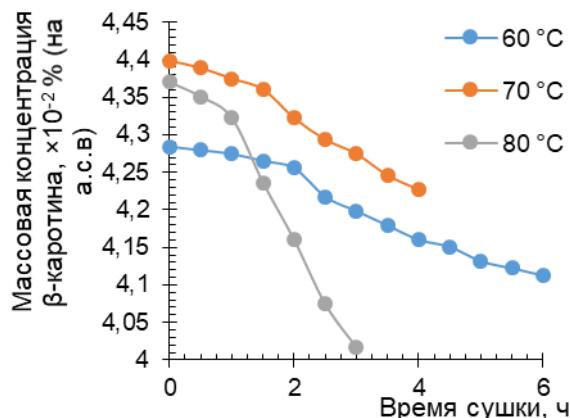


Рисунок 6 – Динамика убыли β-каротина при вакуумной сушке

Figure 6 – Dynamics of loss of β-carotene during vacuum drying

ОБСУЖДЕНИЕ

При получении нативного тыквенного пюре наблюдалось явление синерезиса – незначительного отделения свободной влаги от твердой части тыквенного гомогената, что согласуется с рядом экспериментальных данных [38–40], а само тыквенное пюре по совокупности реологических свойств можно классифицировать как псевдопластическую жидкость [41]. К наиболее значимым факторам, влияющим на реологическое поведение тыквенного пюре, можно отнести: размер частиц, общее содержание сухого вещества и общее количество нерастворенных веществ, в том числе биополимеров. Таким образом, целенаправленно влияя на биополимеры мякоти тыквы, возможно добиться однородности тыквенного пюре и повысить его пластичные свойства, что является важным при обосновании и выборе основного и вспомогательного оборудования при дизайне технологий и компоновке производственных линий.

Как показала серия проведенных экспериментов, крахмалистая часть мякоти тыквы подвергается клейстеризации в диапазоне температур 65–75 °C. Технологически этап нагревания тыквенного пюре для последующего ферментолиза необходим для эффективного воздействия амилолитическими ферментными препаратами. Экспериментально установлено, что в результате ферментолиза мультиэнзимной композицией, содержащей Амилоризин в дозировке 25 ед. АС/г сырья, полностью гидролизуется крахмалистая часть пюре, что сопровождается увеличением содержания сахаров и объективным увеличением сладости пюре с одновременным улучшением текстуры и аппетитности пюре (рисунок 4, таблица 3).

Использование мультиэнзимной композиции, включающей ферментные препараты Амилоризин и Протозим, позволяет увеличить содержание каротиноидов в пюре на 8,4–10,3 %, что объясняется разрушением комплексов каротиноидов и белковой матрицы мякоти тыквы [38], что в конечном итоге приводит к лучшей усвояемости каротиноидов в организме человека. В ходе проведенных исследований была выявлена тенденция к снижению содержания каротиноидов в тыквенном пюре при ферментолизе в течение более 60 минут, что, вероятно, связано с началом терминальной стадии окислительного разрушения каротиноидов.

При исследовании процесса сушки ферментолизованного пюре из мякоти тыквы в диапазоне температур от 60 до 80 °C экспериментально установлена потеря каротиноидов в количестве 4–8 % от начального содержания в тыквенном пюре. При этом при температуре сушки 60 и 70 °C потери каротиноидов сопоставимы, однако увеличение температуры сушки до 70 °C позволяет сократить длительность процесса на 2 часа. Таким образом, с учетом представленных данных, наиболее перспективным параметром для разработки технологии сушки с использованием вакуума является тем-

ВЫСУШЕНЫЙ ФЕРМЕНТОЛИЗОВАННЫЙ ПОЛУФАБРИКАТ ИЗ МЯКТИ ТЫКВЫ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

пература в сушильной камере не более 70 °С, что позволит сократить время сушки и обеспечить большую сохранность β-каротина.

ВЫВОДЫ

В ходе выполненных исследований получены следующие выводы:

1) подобрана мультиэнзимная композиция, содержащая ферментные препараты Амилоризин (25 ед. АС/г сырья) и Протозим (10 и 15 ед. ПС/г сырья), позволяющая увеличить содержание β-каротина на 8,4–10,3 % за счет разрушения устойчивых комплексов каротиноида и полимеров сырья;

1) установлена математическая зависимость между содержанием каротиноидов в ферментолизованном пюре тыквы и условий ферментолиза (его продолжительности и дозировки протеолитического ферментного препарата Протозим);

2) показано, что использование ферментолиза позволяет улучшить органолептические характеристики тыквенного пюре – флейвор и текстуру, а также аппетитность;

3) доказано, что вакуумная сушка (остаточное давление 133 Па) при температуре 70 °С позволяет получить продукт с конечной влажностью не более 5 % и с сохранением 96 % β-каротина от начального содержания в ферментолизованном пюре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структура урожая тыквы крупноплодной в Предуральской лесостепи / В.Б. Троц [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 5(97). С. 63–67. doi: 10.37670/2073-0853-2022-97-5-63-67.
2. Биоморфологическая характеристика плодов сортобразцов тыквы (*Cucurbita*) для механизированного возделывания в умеренной зоне / А.В. Гончаров [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2022. № 14(1). С. 168–174. doi: 10.36508/RSATU.2022.22.28.020.
3. Purification, structure and biological activity of pumpkin polysaccharides: a review / X. Ji [et al.] // Food Reviews International. 2023. Vol. 39. Is. 1. P. 307–319. doi: 10.1080/87559129.2021.1904973.
4. A novel low-molecular-mass pumpkin polysaccharide: Structural characterization, antioxidant activity, and hypoglycemic potential / F. Li [et al.] // Carbohydrate Polymers. 2021. Vol. 251. Article: 117090. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.117090.
5. Pumpkin polysaccharides: Purification, characterization and hypoglycemic potential / B. M. Khan [et al.] // International journal of biological macromolecules. 2019. Vol. 139. P. 842–849. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.08.053.
6. Synergistic hypoglycemic effects of pumpkin polysaccharides and puerarin on type II diabetes mellitus mice / X. Chen [et al.] // Molecules. 2019. Vol. 24. № 5. Article: 955. doi: 10.3390/molecules24050955.
7. In Vitro role of pumpkin parts as pharmaceuticals: antihyperglycemic and antihyperlipidemic activities of pumpkin peel, flesh, and seed powders, in alloxan-induced diabetic rats / A. Hussain [et al.] // International Journal of Food Science. 2022. Vol. 2022. Article ID: 4804408. doi: 10.1155/2022/4804408.
8. Abd-elnoor E. V. Hypoglycemic and hypolipidemic effects of pumpkin seeds powder and oil on alloxan-induced diabetic in rats // Egyptian Journal of Food Science. 2019. Vol. 47. № 2. P. 255–269. doi: 10.21608/ejfs.2019.19348.1027.
9. Nutritional value, phytochemical potential, and therapeutic benefits of pumpkin (*Cucurbita* sp.) / M. Battal [et al.] // Plants. 2022. Vol. 11. № 11. Article ID: 1394. doi: 10.3390/plants11111394.
10. Structure of pumpkin pectin and its effect on its technological properties / B. Salima [et al.] // Applied Rheology. 2022. Vol. 32. № 1. P. 34–55. doi: 10.1515/arh-2022-0124.
11. Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange. Research of Wheat Fiber with Pumpkin Pectin Plant Additive / M. Zheplinska [et al.] Cham : Springer International Publishing, 2022. P. 237–246. doi: 10.1007/978-3-031-06044-1_23.
12. Holistic review of polysaccharides isolated from pumpkin: Preparation methods, structures and bioactivities / F. Li [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2021. Vol. 193. P. 541–552. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.10.037.
13. Sequential extraction, characterization, and analysis of pumpkin polysaccharides for their hypoglycemic activities and effects on gut microbiota in mice / H. Wu [et al.] // Frontiers in nutrition. 2021. Vol. 8. Article ID: 769181. doi: 10.3389/fnut.2021.769181.
14. Tan H., Nie S. Deciphering diet-gut microbiota-host interplay: Investigations of pectin // Trends in Food Science & Technology. 2020. Vol. 106. P. 171–181. doi: 10.1016/j.tifs.2020.10.010.
15. Microbiota response of pectin determined by its structural characteristics during in vitro fecal fermentation: A comparative study of various pectin sources / Y. Zhao [et al.] // Food Hydrocolloids. 2024. Т. 150. С. 109730. doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.109730.
16. Carotenoid Content and Profiles of Pumpkin Products and By-Products / A. Ninčević Grassino [et al.] / Molecules. 2023. Vol. 28. № 2. Article ID: 858. doi: 10.3390/molecules28020858.
17. Нилова, Л.П., Потороко И.Ю. Каротиноиды в растительных пищевых системах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2021. Т. 9. № 4. С. 54–69. doi: 10.14529/food210407.
18. Determination of total phenolic, flavonoid, carotenoid, and mineral contents in peel, flesh, and seeds of pumpkin (*Cucurbita maxima*) / A. Hussain [et al.] // Journal of Food Processing and Preservation. 2021. Vol. 45. № 6. Article ID: e15542. doi: 10.1111/jfpp.15542.
19. Elvira-Torales L. I., García-Alonso J., Periago-Castón M. J. Nutritional importance of carotenoids and their effect on liver health: A review // Antioxidants. 2019. Vol. 8. № 7. Article ID: 229. doi: 10.3390/antiox8070229.
20. A carotenoid-enriched extract from pumpkin delays cell proliferation in a hu-man chronic lymphocytic leukemia cell line through the modulation of autophagic flux / S. Moccia [et al.] // Current Research in Biotechnology. 2020. Vol. 2. P. 74–82. doi: 10.1016/j.crbiot.2020.05.001.
21. Macro- and microelements in pumpkin seed oils: Effect of processing, crop season, and country of origin / N. Martinec [et al.] // Food Science & Nutrition. 2019. Vol. 7. № 5. P. 1634–1644. doi: 10.1002/fsn3.995.
22. Budak E., Güneş A. The Effects Of Potassium

Applied at Different Doses and Times on The Yield and Nutrient Content of Pumpkin Seed (*Cucurbita pepo* L.) // *Gesunde Pflanzen*. 2023. Vol. 75. P. 2879–2887. doi: 10.1007/s10343-023-00865-w.

23. Dietary factors, risk of developing depression, and severity of its symptoms in older adults-A narrative review of current knowledge / Z. Chrzastek [et al.] // *Nutrition*. 2023. Vol. 106. Article ID: 111892. doi: 10.1016/j.nut.2022.111892.

24. The role of macronutrients, micronutrients and flavonoid polyphenols in the prevention and treatment of osteoporosis / M. Martiniakova [et al.] // *Nutrients*. 2022. Vol. 14. № 3. Article ID: 523. doi: 10.3390/nu14030523.

25. Impact of micronutrients on hypertension: Evidence from clinical trials with a special focus on meta-analysis / H. F. Chiu [et al.] // *Nutrients*. 2021. Vol. 13. № 2. Article ID: 588. doi: 10.3390/nu13020588.

26. El Khatib S., Muhieddine M. Nutritional profile and medicinal properties of pumpkin fruit pulp / The Health Benefits of Foods-Current Knowledge and Further Development. 2020. P. 79–97.

27. Effects of Pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) Seed Protein on Blood Pressure, Plasma Lipids, Leptin, Adiponectin, and Oxidative Stress in Rats with Fructose-Induced Metabolic Syndrome / A. Chenni [et al.] // *Preventive Nutrition and Food Science*. 2022. Vol. 27. № 1. P. 78–88. doi: 10.3746/pnf.2022.27.1.78.

28. Manshi N. C., Sahrawat N. Effect of processing on nutraceutical profile and amino acid content on pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds // *Plant Archives*. 2023. Vol. 23. № 1. P. 358–362. doi: 10.51470/PLANTARCHIVES.2023.v23.no1.058.

29. Vinayashree S., Vasu P. Biochemical, nutritional and functional properties of protein isolate and fractions from pumpkin (*Cucurbita moschata* var. *Kashi Harit*) seeds // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 340. Article ID: 128177. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128177.

30. Szerszunowicz I., Kozicki S. Plant-Derived Proteins and Peptides as Potential Immunomodulators // *Molecules*. 2023. Vol. 29. № 1. Article ID: 209. doi: 10.3390/molecules29010209.

31. Immunomodulatory potential of vegetables vis-à-vis human health / H. Krishna [et al.] // *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2022. Vol. 97. № 5. P. 560–579. doi: 10.1080/14620316.2022.2046508.

32. A review on biochemical constituents of pumpkin and their role as pharma foods; a key strategy to improve health in post COVID 19 period / A. Hussain [et al.] // *Food Production, Processing and Nutrition*. 2023. Vol. 5. № 1. Article ID: 22. doi: 10.1186/s43014-023-00138-z.

33. Characterization of recombinant pumpkin 2S albumin and mutation studies to unravel potential DNA/RNA binding site / B.K. Savita [et al.] // *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2021. Vol. 580. P. 28–34. doi: 10.1016/j.bbrc.2021.09.076.

34. Dotto J. M., Chacha J. S. The potential of pumpkin seeds as a functional food ingredient: A review // *Scientific African*. 2020. Vol. 10. Article ID: e00575. doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00575.

35. Hashem T., Ahmed M. M. M. Microbial and Molecular Studies of Pumpkin Fruit Extract Effect on *Candida albicans* Disease // *Advances in Environmental Biology*. 2023. Vol. 17. № 6. P. 1–8.

36. Evaluation of chemical composition, antioxidant activity, and gut microbiota associated with pumpkin juice fermented by *Rhodobacterphaeoides* / Y. Wang [et al.] // *FoodChemistry*. 2023. Vol. 401. Article ID: 134122. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.134122.

37. Спектрофотометрическое определение

крахмала в томатных продуктах с антродионовым реагентом / В.П. Рачкова [и др.] // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2018. № 6 (141). С. 187–193.

38. Panato K., Muller C. M. O. Drying kinetics and physicochemical and technological properties of pumpkin purée flour dried by convective and foam-mat drying // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022. Vol. 46. № 2. Article ID: e16264. doi: /10.1111/jfpp.16264.

39. Effect of pectin oligosaccharide on quality control of quick-frozen pumpkin puree / W. Li [et al.] // *International Journal of Food Science & Technology*. 2022. Vol. 57. № 2. P. 1061–1073. doi: 10.1111/ijfs.15469.

40. Colin-Henrion M., Cuvelier G., Renard C. Texture of pureed fruit and vegetable foods // *Stewart Post-harvest Review*. 2007. Vol. 5. № 3. С. 1–14. doi: 10.2212/spr.2007.5.3.

41. The effect of enzyme concentration on physical characteristics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) puree and its dried extract / F. Kormin [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2021. Vol. 736. № 1. Article ID: 012031. doi: 10.1088/1755-1315/736/1/012031.

Информация об авторах

Е. Д. Рожнов – доктор технических наук, профессор кафедры биотехнологии и инженеринга Уральского государственного экономического университета.

М. Н. Школьникова – доктор технических наук, профессор кафедры технологии питания Уральского государственного экономического университета.

В. Н. Аббазова – старший преподаватель кафедры управления качеством и экспертизы товаров и услуг Уральского государственного экономического университета.

В. Л. Захаров – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры агротехнологий, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина.

REFERENCES

1. Trots, V.B., Dunin, A.P., Abdulvaleev, R.R. & Trots, N.M. (2022). Structure of the large-fruit pumpkin crop in the cedar forest-steppe. *News of the Orenburg State Agrarian University*, (5 (97)), 63-67. (In Russ.). doi: 10.37670/2073-0853-2022-97-5-63-67.
2. Goncharov, A.V., Gasparyan, I.N., Pivovarov, V.F. & Levshin A.G. (2022). Biomorphological characteristics of pumpkin (*Cucurbita*) fruits for mechanized cultivation in the temperate zone. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostycheva*, 14 (1), 168-174. (In Russ.). doi: 10.36508/RSATU.2022.22.28.020.
3. Ji, X., Peng, B., Ding, H., Cui, B., Nie, H. & Yan, Y. (2023). Purification, structure and biological activity of pumpkin polysaccharides: a review. *Food Reviews International*, 39(1), 307-319. doi: 10.1080/87559129.2021.1904973.

ВЫСУШЕНЫЙ ФЕРМЕНТОЛИЗОВАННЫЙ ПОЛУФАБРИКАТ ИЗ МЯКОТИ ТЫКВЫ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

4. Li, F., Wei, Y., Liang, L., Huang, L., Yu, G. & Li, Q. (2021). A novel low-molecular-mass pumpkin polysaccharide: Structural characterization, antioxidant activity, and hypoglycemic potential. *Carbohydrate Polymers*, 251, 117090. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.117090.
5. Khan, B.M., Cheong, K.L. & Liu, Y. (2019). Pumpkin polysaccharides: Purification, characterization and hypoglycemic potential. *International journal of biological macromolecules*, 139, 842-849. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.08.053.
6. Chen, X., Qian, L., Wang, B., Zhang, Z., Liu, H., Zhang, Y. & Liu, J. (2019). Synergistic hypoglycemic effects of pumpkin polysaccharides and puerarin on type II diabetes mellitus mice. *Molecules*, 24(5), 955. doi: 10.3390/molecules24050955.
7. Hussain, A., Kausar, T., Jamil, M. A., Noreen, S., Iftikhar, K., Rafique, A. ... & Ali, A. (2022). In Vitro role of pumpkin parts as pharma-foods: antihyperglycemic and antihyperlipidemic activities of pumpkin peel, flesh, and seed powders, in alloxan-induced diabetic rats. *International Journal of Food Science*, 2022. doi: 10.1155/2022/4804408.
8. Abdelnoor, E.V. (2019). Hypoglycemic and hypolipidemic effects of pumpkin seeds powder and oil on alloxan-induced diabetic in rats. *Egyptian Journal of Food Science*, 47(2), 255-269. doi: 10.21608/ejfs.2019.19348.1027.
9. Batool, M., Ranjha, M.M.A.N., Roobab, U., Manzoor, M.F., Farooq, U., Nadeem, H.R. ... & Ibrahim, S.A. (2022). Nutritional value, phytochemical potential, and therapeutic benefits of pumpkin (Cucurbita sp.). *Plants*, 11(11), 1394. doi: 10.3390/plants11111394.
10. Salima, B., Seloua, D., Djamel, F. & Samir, M. (2022). Structure of pumpkin pectin and its effect on its technological properties. *Applied Rheology*, 32(1), 34-55. doi: 10.1515/arrh-2022-0124.
11. Zheplinska, M., Vasyliv, V., Deviatko, O., Ulianko, S. & Kanivets, N. (2022). Research of Wheat Fiber with Pumpkin Pectin Plant Additive. In Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (pp. 237-246). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-031-06044-1_23.
12. Li, F., Zhao, J., Wei, Y., Jiao, X. & Li, Q. (2021). Holistic review of polysaccharides isolated from pumpkin: Preparation methods, structures and bioactivities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193, 541-552. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.10.037.
13. Wu, H.Q., Ma, Z.L., Zhang, D.X., Wu, P., Guo, Y.H., Yang, F. & Li, D.Y. (2021). Sequential extraction, characterization, and analysis of pumpkin polysaccharides for their hypoglycemic activities and effects on gut microbiota in mice. *Frontiers in nutrition*, 8, 769181. doi: 10.3389/fnut.2021.769181.
14. Tan, H. & Nie, S. (2020). Deciphering diet-gut microbiota-host interplay: Investigations of pectin. *Trends in Food Science & Technology*, 106, 171-181. doi: 10.1016/j.tifs.2020.10.010.
15. Zhao, Y., Wang, D., Wang, P., Zhao, W., Zhao, S., Ma, Y. ... & Zhao, X. (2024). Microbiota response of pectin determined by its structural characteristics during in vitro fecal fermentation: A comparative study of various pectin sources. *Food Hydrocolloids*, 150, 109730. doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.109730.
16. Ninčević Grassino, A., Rimac Brnčić, S., Bandanjak Sabolović, M., Šć Žlabur, J., Marović, R. & Brnčić, M. (2023). Carotenoid Content and Profiles of Pumpkin Products and By-Products. *Molecules*, 28(2), 858. doi: 10.3390/molecules28020858.
17. Nilova, L.P. & Potoroko, I.Yu. (2021). Carotenoids in plant food systems. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 9 (4), 54-69. (In Russ.). doi: 10.14529/food210407.
18. Hussain, A., Kausar, T., Din, A., Murtaza, M.A., Jamil, M.A., Noreen, S. ... & Ramzan, M.A. (2021). Determination of total phenolic, flavonoid, carotenoid, and mineral contents in peel, flesh, and seeds of pumpkin (Cucurbita maxima). *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6), e15542. doi: 10.1111/jfpp.15542.
19. Elvira-Torales, L.I., García-Alonso, J. & Perago-Castón, M.J. (2019). Nutritional importance of carotenoids and their effect on liver health: A review. *Antioxidants*, 8(7), 229. doi: 10.3390/antiox8070229.
20. Moccia, S., Russo, M., Durante, M., Lenucci, M. S., Mita, G. & Russo, G.L. (2020). A carotenoid-enriched extract from pumpkin delays cell proliferation in a human chronic lymphocytic leukemia cell line through the modulation of autophagic flux. *Current Research in Biotechnology*, 2, 74-82. doi: 10.1016/j.crbiot.2020.05.001.
21. Martinec, N., Balbino, S., Dobša, J., Šimunić-Mežnarić, V. & Legen, S. (2019). Macro- and microelements in pumpkin seed oils: Effect of processing, crop season, and country of origin. *Food Science & Nutrition*, 7(5), 1634-1644. doi: 10.1002/fsn3.995.
22. Budak, E. & Güneş, A. (2023). The Effects Of Potassium Applied at Different Doses and Times on The Yield and Nutrient Content of Pumpkin Seed (Cucurbita pepo L.). *Gesunde Pflanzen*, 1-9. doi: 10.1007/s10343-023-00865-w.
23. Chrzałek, Z., Guligowska, A., Sobczuk, P. & Kostka, T. (2023). Dietary factors, risk of developing depression, and severity of its symptoms in older adults-A narrative review of current knowledge. *Nutrition*, 106, 111892. doi: 10.1016/j.nut.2022.111892.
24. Martiníková, M., Babíková, M., Mondonková, V., Blahová, J., Kováčová, V. & Omelka, R. (2022). The role of macronutrients, micronutrients and flavonoid polyphenols in the prevention and treatment of osteoporosis. *Nutrients*, 14(3), 523. doi: 10.3390/nu14030523.
25. Chiu, H.F., Venkatakrishnan, K., Golovinskaia, O. & Wang, C.K. (2021). Impact of Micronutrients on Hypertension: Evidence from Clinical Trials with a Special Focus on Meta-Analysis. *Nutrients* 2021, 13, 588. doi: 10.3390/nu13020588.
26. El Khatib, S. & Muhieddine, M. (2020). Nutritional profile and medicinal properties of pumpkin fruit pulp. The Health Benefits of Foods-Current Knowledge and Further Development, 1-20.
27. Chenni, A., Cherif, F.Z.H., Chenni, K., Elius, E.E., Pucci, L. & Yahia, D.A. (2022). Effects of Pumpkin (Cucurbita pepo L.) Seed Protein on Blood Pressure, Plasma Lipids, Leptin, Adiponectin, and Oxidative Stress in Rats with Fructose-Induced Metabolic Syndrome. *Preventive Nutrition and Food Science*, 27(1), 78. doi: 10.3746/pnf.2022.27.1.78.
28. Neelam, M. & Neha Sahrawat, C. (2023). Effect of processing on nutraceutical profile and amino acid content on pumpkin (Cucurbita pepo L.) seeds. *Plant archives*, 23 (Suppliment-1), 358-362. doi: 10.51470/PLANTARCHIVES.2023.v23.no1.058.
29. Vinayashree, S. & Vasu, P. (2021). Biochemical, nutritional and functional properties of protein isolate and fractions from pumpkin (Cucurbita moschata var. Kashi Harit) seeds. *Food Chemistry*, 340, 128177. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128177.
30. Szerszunowicz, I. & Kozicki, S. (2023). Plant Derived Proteins and Peptides as Potential Immunomodulators. *Molecules*, 29(1), 209. doi: 10.3390/ molecules29010209.

31. Krishna, H., Janakiram, T., Singh, M.K., Karuppaiah, V., Yadava, R.B., Prasad, R.N. ... & Behera, T.K. (2022). Immunomodulatory potential of vegetables vis-à-vis human health. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 97(5), 560-579. doi: 10.1080/14620316.2022.2046508.
32. Hussain, A., Kausar, T., Sehar, S., Sarwar, A., Quddoos, M.Y., Aslam, J. ... & Nisar, R. (2023). A review on biochemical constituents of pumpkin and their role as pharma foods; a key strategy to improve health in post COVID 19 period. *Food Production, Processing and Nutrition*, 5(1), 1-14. doi: 10.1186/s43014-023-00138-z.
33. Savita, B.K., Dalal, V., Choudhary, S., Gupta, D.N., Das, N., Tomar, S. ... & Sharma, A.K. (2021). Characterization of recombinant pumpkin 2S albumin and mutation studies to unravel potential DNA/RNA binding site. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 580, 28-34. doi: 10.1016/j.bbrc.2021.09.076.
34. Dotto, J.M. & Chacha, J.S. (2020). The potential of pumpkin seeds as a functional food ingredient: A review. *Scientific African*, 10, e00575. doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00575.
35. Hashem, T. & Ahmed, M.M.M. (2023). Microbial and Molecular Studies of Pumpkin Fruit Extract Effect on *Candida albicans* Disease. *Advances in Environmental Biology*, 17(6), 1-8.
36. Wang, Y., Fan, L., Huang, J., Liang, J., Wang, X., Ren, Y. ... & Gao, Z. (2023). Evaluation of chemical composition, antioxidant activity, and gut microbiota associated with pumpkin juice fermented by *Rhodobacter phaeooides*. *Food Chemistry*, 401, 134122. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.134122.
37. Rachkova, V.P., Suraeva, N.M., Glazkov, S.V. & Samoilov, A.V. (2018). Spectrophotometric determination of starch in tomato products with anthrone reagent. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*, (6 (141)), 187-193. (In Russ.).
38. Panato, K. & Muller, C.M.O. (2022). Drying kinetics and physicochemical and technological properties of pumpkin purée flour dried by convective and foam-mat drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(2), e16264. doi: /10.1111/jfpp.16264.
39. Li, W., Wang, H., Yang, D., Liu, J., Wu, J. & Ge, Y. (2022). Effect of pectin oligosaccharide on quality control of quick-frozen pumpkin puree. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(2), 1061-1073. doi:10.1111/ijfs.15469.
40. Colin-Henrion, M., Cuvelier, G. & Renard, C.M.G.C. (2007). Texture of pureed fruit and vegetable foods. *Stewart Postharvest Review*, 5(3), 1-14. doi: 10.2212/spr.2007.5.3.
41. Kormin, F., Sakinah, R.A., Iwansyah, A.C. & Hesan, A. (2021, April). The effect of enzyme concentration on physical characteristics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) puree and its dried extract. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 736, No. 1, p. 012031). IOP Publishing. doi: 10.1088/1755-1315/736/1/012031.

Information about the authors

E.D. Rozhnov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Engineering at the Ural State Economic University.

M.N. Shkolnikova - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Nutrition Technology of the Ural State University of Economics.

V.N. Abbazova - senior lecturer at the Department of Quality Management and Expertise of Goods and Services at the Ural State University of Economics.

V.L. Zakharov - Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Agricultural Technologies, Storage and Processing of Agricultural Products, Yelets State University.n.a. I.A. Bunin.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



ВЛИЯНИЕ БЕЛКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МОЛОКОСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЗИРОВАННЫХ СЫРОВ

Галина Михайловна Свириденко¹, Анастасия Николаевна Шишкина²,
Василий Валерьевич Калабушкин³, Елена Васильевна Алексеева⁴

^{1, 2, 3, 4} Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, Углич, Россия

¹ g.sviridenko@fncps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9586-3786>

² a.shishkina@fncps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3935-766X>

³ v.kalabushkin@fncps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0507-0572>

⁴ e.alekseeva@fncps.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4643-2182>

Аннотация. Белковые компоненты участвуют в формировании структуры молокосодержащих продуктов. В производстве молокосодержащих продуктов применяются как молочные белки, так и растительные. Отечественными и зарубежными учеными изучено влияние белковых компонентов на показатели качества молокосодержащих продуктов, но не исследовано влияние на их функциональные свойства. В статье представлены результаты исследования влияния замены сырчужного казеина на обезжиренный сыр Кальятта и изолят соевого белка на органолептические, физико-химические, реологические показатели и функциональные свойства молокосодержащих продуктов, произведенных по технологии термизированных сыров. Установлено, что увеличение массы сыра приводит к уменьшению выраженности вкуса казеина и появлению кисломолочного вкуса в готовом продукте. Консистенция термизированных продуктов независимо от соотношения белковых компонентов молочного происхождения остается неоднородной, а изменяются эластично-пластичные характеристики. Увеличение доли изолята соевого белка приводит к ослаблению вкуса казеина и усилиению привкуса сои. Консистенция термизированного продукта с увеличением доли растительного белка становится плотной и крошивой. С увеличением доли обезжиренного сыра наблюдается снижение активной кислотности и пенетрационного напряжения термизированных продуктов. Не установлено негативного влияния замены казеина изолятом соевого белка на физико-химические свойства. Пенетрационное напряжение исследованных образцов возрастает с увеличением изолята соевого белка. Применение сыра улучшает оценку функциональных свойств термизированных продуктов и оценки близки к значению эталона. Замена 5 % казеина на изолят соевого белка не влияет на комплекс функциональных свойств термизированных продуктов. Увеличение растительного белка до 30 % приводит к ухудшению натираемости, растяжимости и плавимости термизированных продуктов. Для производства пиццы рекомендуется применять термизированные продукты с соотношением казеин/сыр 50/50. Замена молочных белков на растительные не приводит к улучшению функциональных свойств исследованных образцов. Возможно применение до 5 % изолята соевого белка для производства термизированных продуктов.

Ключевые слова: молокосодержащие продукты, функциональные свойства, термизированные продукты, сырчужный казеин, сыр, изолят соевого белка, шкала оценки, сыры для пиццы, НоReCa.

Для цитирования: Свириденко Г. М., Шишкина А. Н., Калабушкин В. В., Алексеева Е. В. Влияние белковых компонентов на функциональные свойства молокосодержащих продуктов, произведенных по технологии термизированных сыров // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 69–75. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.007. EDN: <https://elibrary.ru/TCVUBA>.

Original article

FLUENCE OF PROTEIN COMPONENTS ON FUNCTIONAL PROPERTIES OF MILK-CONTAINING PRODUCTS PRODUCED USING THERMIZED CHEESE TECHNOLOGY

Galina M. Sviridenko ¹, Anastasiya N. Shishkina ², Vasiliy V. Kalabushkin ³,
Elena V. Alekseeva ⁴

^{1, 2, 3, 4} All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking - Branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Uglich, Russia

¹ g.sviridenko@fncps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9586-3786>

² a.shishkina@fncps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3935-766X>

³ v.kalabushkin@fncps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0507-0572>

⁴ e.alekseeva@fncps.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4643-2182>

Abstract. Protein components are involved in the formation of the structure of milk-containing products. In the production of milk-containing products, both milk proteins and vegetable proteins are used. Domestic and foreign scientists have studied the influence of protein components on the quality indicators of milk-containing products, but have not studied the effect on their functional properties. The article presents the results of a study of the effect of replacing rennet casein with low-fat Calyatta cheese and soy protein isolate on the organoleptic, physico-chemical, rheological parameters and functional properties of milk-containing products produced using thermized cheese technology. It has been established that an increase in the mass of cheese leads to a decrease in the intensity of the taste of casein and the appearance of a sour milk taste in the finished product. The consistency of thermized products, regardless of the ratio of protein components of dairy origin, remains heterogeneous, and the elastic-plastic characteristics change. Increasing the proportion of soy protein isolate leads to a weakening of the casein taste and an increase in soy flavor. As the proportion of vegetable protein increases, the consistency of the thermized product becomes dense and crumbly. With an increase in the proportion of low-fat cheese, a decrease in the active acidity and penetration tension of thermized products is observed. No negative effect of replacing casein with soy protein isolate on the physicochemical properties has been established. The penetration tension of the studied samples increases with increasing soy protein isolate. The use of cheese improves the assessment of the functional properties of thermized products and the assessments are close to the standard value. Replacing 5% casein with soy protein isolate does not affect the complex of functional properties of thermized products. An increase in vegetable protein up to 30% leads to a deterioration in the abrasion, extensibility and meltability of thermized products. For pizza production, it is recommended to use thermized products with a casein/cheese ratio of 50/50. Replacing milk proteins with plant proteins does not lead to an improvement in the functional properties of the studied samples. It is possible to use up to 5% soy protein isolate for the production of thermalized products.

Keywords: milk-containing products, functional properties, thermized products, rennet casein, cheese, soy protein isolate, rating scale, pizza cheeses, HoReCa.

For citation: Sviridenko, G. M., Shishkina, A. N., Kalabushkin, V. V. & Alekseeva, E. V. (2025). Influence of protein components on functional properties of milk-containing products produced using thermized cheese technology. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 69-75. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.007. EDN: <https://elibrary.ru/TCVUBA>.

ВВЕДЕНИЕ

Молочное сырье на протяжении многих лет широко используется в самых разнообразных отраслях пищевой промышленности для повышения качества и питательной ценности продуктов, приятия им специфических функциональных свойств. Мировой рынок молочного сырья считается наиболее перспективным и показывает устойчивый рост, который, согласно прогнозам, составит около 7 % на период до 2028 года [1]. Одним из важнейших компонентов, определяющих биологическую ценность молочных и молокосодержащих продуктов, являются молочные белки [2].

Для производства молокосодержащих

продуктов в качестве белковых компонентов молочного происхождения применяют сырьевые сыры, сырное зерно, сырные обрезки, творог, сухие молочные белки, сухое обезжиренное молоко, сухую молочную сыворотку и казеин. Это позволяет производителю увеличить ассортимент выпускаемых продуктов и иметь возможность выбора сырья в зависимости от сезонности и стоимости [3-6].

В производстве молокосодержащих продуктов для пиццы применяются те же сыры, что и для термизированного сыра. К ним относятся:

- сыры, изготовленные из молока, без длительного созревания;

ВЛИЯНИЕ БЕЛКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МОЛОКОСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЗИРОВАННЫХ СЫРОВ

- сыры, изготовленные из молока, с созреванием, обеспечивающим полное сбраживание лактозы;
- сыры и сырные массы, в которых лактозу удаляют с помощью промывки зерна.

В настоящее время активно применяют сыр Кальята – полутвердый сыр, изготовленный с проведением чеддеризации сырной массы предназначенный для дальнейшей переработки [7, 8].

Во ВНИИМС были проведены исследования по установлению допустимого количества творога и нежирного сыра в рецептуры имитационного плавленого продукта, который можно применять для приготовления пиццы. Проводили выработки с разным соотношением нежирного сыра и нежирного творога от 0:100 до 100:0 при суммарном количестве указанных компонентов 520 кг на 1 т продукта. Установлено, что реологические характеристики и органолептическая оценка готового продукта снижается прямо пропорционально количеству творога в рецептуре. Наиболее приемлемые показатели качества получили при соотношении творога и нежирного сыра 50:50 [4], при этом оценку функциональных свойств не проводили.

Основой продуктового ассортимента молокоперерабатывающих предприятий, которые специализируются на производстве товаров в сегменте HoReCa, являются молочно-белковые концентраты. Концентраты молочного белка – продукты, получаемые путем фракционирования обезжиренного молока методом ультрафильтрации, содержащие белковой фракции в сухом веществе от 42 до 85 %. Изоляты молочного белка содержат около 90 % белка в сухом веществе и соотношением казеина и сывороточных белков как в молоке. Данные компоненты применяются в молокосодержащих продуктах для пиццы, так как готовый продукт не горит после выпечки [8–10].

Концентраты сывороточного белка – наиболее распространенные ингредиенты, получаемые путем фракционирования сыворотки методом ультрафильтрации. За счет удаления небелковых веществ готовый продукт содержит не менее 25 % белка в сухом веществе. Применение сывороточных белков и концентратов на их основе провоцирует появление многочисленных блистеров, которые придают пицце «пятнистый» рисунок расплавленного молокосодержащего продукта на поверхности пиццы. Это необходимо учитывать при расчете используемой концентрации сывороточных белков [8, 10].

Применение сухого молока при производстве молокосодержащих продуктов приводит к его сгоранию во время выпечки пиццы, так как сухое молоко содержит значительное количество лактозы [8].

Большинство молокосодержащих продуктов производят на основе казеинов и казеинатов.

Казеинаты используют в основном для пастообразных продуктов, выработанных по технологии плавленых сыров. Сычужный казеин предпочтительнее для полутвердых блочных продуктов, особенно для аналогов сыра для пиццы, для улучшения плавкости и растяжимости, в сравнении с исходным кислотным казеином, или казеинатом натрия, или кальция [11].

Сезонные колебания в обеспечении молочными белковыми сырьевыми ресурсами приводят к привлечению в молочную отрасль нетрадиционных источников белка. Проблему дефицита молочных белков можно решить путем их частичной замены на растительные белоксодержащие компоненты, которые являются наиболее распространенным и экономически выгодным видом белкового сырья [12].

Ряд отечественных и зарубежных ученых разрабатывали молокосодержащие продукты с растительными белками. В качестве растительного сырья применяли соевую, рисовую и овсяную муку, изоляты соевого и пшеничного белка, бобовые культуры, а также другие сырьевые компоненты [12–16].

Таким образом, при анализе литературных источников по использованию белков молочного и немолочного происхождения при производстве молокосодержащих продуктов, используемых в HoReCa, не выявлено работ, оценивающих их влияние на функциональные свойства. Цель работы – исследовать влияние различных белков на органолептические, физико-химические, реологические показатели и функциональные свойства молокосодержащих продуктов, произведенных по технологии термизированных сыров.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования являлись молокосодержащие продукты, произведенные по технологии термизированных сыров (далее термизированные продукты). Рецептурный состав термизированных продуктов состоит из белково-углеводной основы 40,0 % при соотношении казеин/крахмал 58,5/41,5 %; массовой доли эмульгирующей соли – 1,0 % и массовой доли влаги – 60,0 %.

В серии экспериментов проводили замену сырчужного казеина на обезжиренный сыр Кальята (далее сыр) и изолят соевого белка. В первой серии экспериментов проводили исследования функциональных свойств термизированных продуктов со следующими соотношениями казеин/сыр: 100/0; 70/30; 50/50; 30/70 и 0/100. Во второй серии экспериментов белковая часть образцов состояла из соотношения казеин/изолят соевого белка: 100/0; 95/5; 70/30.

В готовых термизированных продуктах стандартизованными методами определяли активную кислотность. Пенетрационное напряжение измеряли с помощью penetрометра AP 4/1. Оцен-

ку функциональных свойств (натираемость, плавимость, сгораемость, наличие блистеров и растяжимость сырной нити) проводили по специально разработанной во ВНИИМС шкале оценки органолептических и функциональных свойств сыров для пиццы [17] с использованием оригинальных методов, описанных в [18].

Исследования проводили в 5-кратной повторности. Математическую обработку результатов и построение графиков выполняли с использованием компьютерной программы Microsoft Excel 2010. С помощью описательной статистики за результат применяли средние значения изме-

ренных показателей и стандартное отклонение при уровне значимости 95 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В первой серии экспериментов проводили исследования по влиянию замены сырного казеина на обезжиренный сыр на органолептические, физико-химические, реологические показатели и функциональные свойства термизированных продуктов.

В таблице 1 представлены результаты органолептической оценки исследованных термизированных продуктов.

Таблица 1 – Влияние замены сырного казеина сыром на органолептические свойства термизированных продуктов

Table 1 – Effect of replacing rennet casein with cheese on the organoleptic properties of thermized products

Показатель	Соотношение казеин/сыр				
	100/0	70/30	50/50	30/70	0/100
Вкус и запах	Умеренно выраженный вкус казеина	Умеренно выраженный вкус казеина, кисловатый	Слабо выраженный вкус казеина и кисломолочный	Умеренно выраженный кисломолочный, привкус казеина	Кисломолочный, солоноватый
Консистенция	Эластично-пластичная, неоднородная	Неоднородная, крошившая	Эластично-пластичная, неоднородная	Пластичная, неоднородная	Пластичная, упругая, неоднородная

По результатам органолептической оценки установлено, что увеличение массы сыра приводит к уменьшению выраженности вкуса казеина и появлению кисломолочного вкуса в готовом продукте. Консистенция термизированных продуктов независимо от соотношения белковых компонентов остается неоднородной, а изменяются эластично-пластичные характеристики.

Влияние замены казеина сыром на активную кислотность термизированных продуктов представлено на рисунке 1.

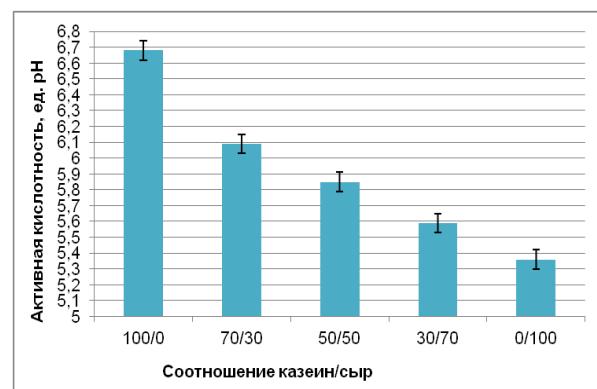


Рисунок 1 – Изменение активной кислотности термизированных продуктов при замене сырного казеина на сыр

Figure 1 – Change in the active acidity of thermized products when replacing rennet casein with cheese

Данные, представленные на рисунке 1, демонстрируют закономерное снижение активной кислотности при увеличении доли сыра, так

как сыр имеет более низкое значение pH по сравнению с сырным казеином (5,37 и 6,62 соответственно).

На рисунке 2 представлены результаты исследований реологических параметров термизированных продуктов.

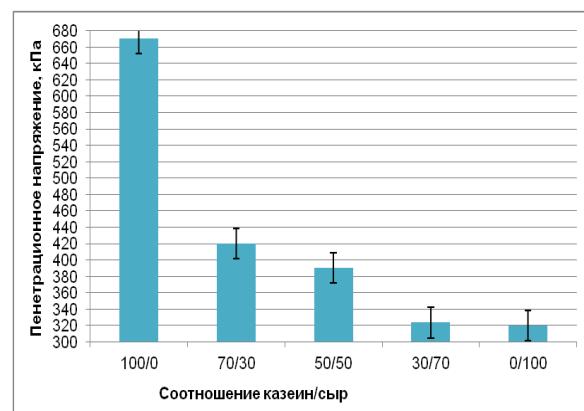


Рисунок 2 – Влияние замены сырного казеина сыром на пенетрационное напряжение термизированных продуктов

Figure 2 – The effect of replacing rennet casein with cheese on the penetration stress of thermized products

Установлено, что при увеличении доли сыра снижается пенетрационное напряжение исследованных образцов. Результаты исследования реологических свойств отражают консистенцию продукта, т.е. переход от эластично-пластичной консистенции в пластичную.

ВЛИЯНИЕ БЕЛКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МОЛОКОСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЗИРОВАННЫХ СЫРОВ

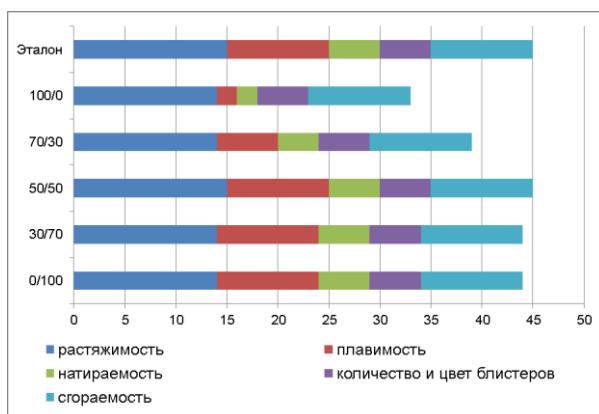


Рисунок 3 – Функциональные свойства исследованных термизированных продуктов

Figure 3 – Functional properties of the studied thermized products

Одними из самых важных свойств сыров для пиццы являются функциональные свойства (натираемость, плавимость, сгораемость, образование блистеров, растяжимость). Результаты исследования данных свойств представлены на рисунке 3. За эталон взят сыр Моцарелла, как чаще приме-

няемый сыр для пиццы, обладающий максимальными оценками за функциональные свойства, которые были определены нами ранее [18].

Установлено, что в термизированных продуктах, произведенных с применением казеина, отсутствует способность продукта к плавлению. Добавление сыра способствует появлению данного функционального свойства. Применение сыра улучшает оценку функциональных свойств термизированных продуктов и оценки близки к значению эталона. Образец с соотношением казеин/сыр 50/50 соответствует эталону. Некоторое снижение растяжимости термизированных продуктов наблюдается в вариантах с массовой долей сыра более 70 %, что может быть связано с длительностью термомеханической обработки.

Во второй серии экспериментов проводили исследования по влиянию замены сычужного казеина на изолят соевого белка на органолептические, физико-химические, реологические показатели и функциональные свойства термизированных продуктов.

В таблице 2 представлены результаты органолептической оценки исследованных термизированных продуктов.

Таблица 2 – Влияние замены сычужного казеина изолятом соевого белка на органолептические свойства термизированных продуктов

Table 2 – Effect of replacing rennet casein with soy protein isolate on the organoleptic properties of thermized products

Показатели	Соотношение казеин/изолят соевого белка		
	100/0	95/5	70/30
Вкус и запах	Умеренно выраженный вкус казеина	Умеренно выраженный вкус казеина, слабо выраженный привкус сои	Слабо выраженный вкус казеина, умеренно выраженный привкус сои
Консистенция	Эластично-пластичная, неоднородная	Плотная, неоднородная	Плотная, крошливая

Из данных, представленных в таблице 2, следует, что увеличение доли изолята соевого белка приводит к ослаблению вкуса казеина и усилению привкуса сои. Консистенция термизированного продукта с увеличением доли растительного белка становится плотной и крошливой.

Результаты физико-химических исследований представлены на рисунке 4.

Не выявлено значимого влияния доли изолята соевого белка на активную кислотность термизированных продуктов.

Влияние замены части казеина изолятом соевого белка на пенетрационное напряжение представлено на рисунке 5.

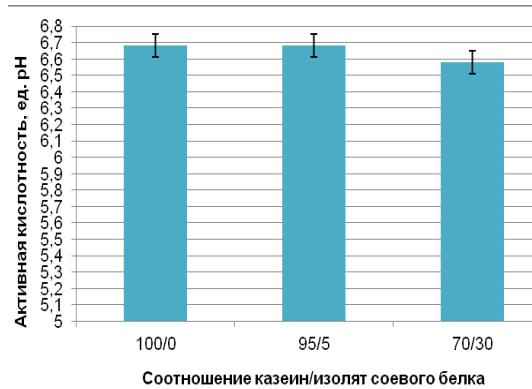


Рисунок 4 – Влияние замены сычужного казеина изолятом соевого белка на активную кислотность термизированных сыров

Figure 4 – Effect of replacing rennet casein with soy protein isolate on the active acidity of thermalized cheeses

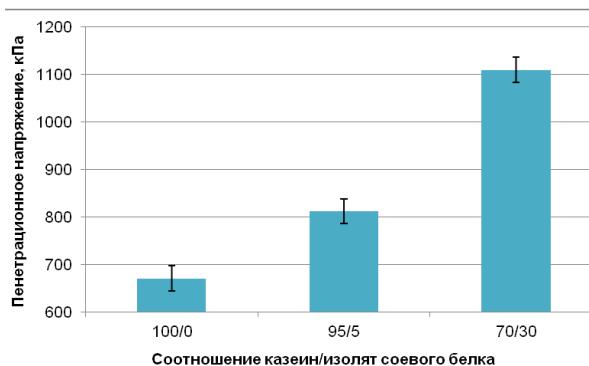


Рисунок 5 – Изменение пенетрационного напряжения исследованных термизированных продуктов

Figure 5 – Change in penetration stress of the studied thermized products

Установлено, что с увеличением доли изолята соевого белка пенетрационное напряжение возрастает. При замене 30 % казеина пенетрационное напряжение увеличивается в 1,6 раз. Полученные результаты отражают консистенцию выработанных продуктов.

Для оценки пригодности термизированных продуктов для производства пиццы исследовали их функциональные свойства (рисунок 6).

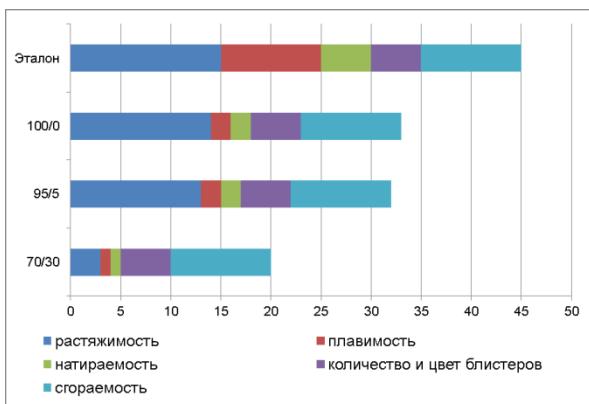


Рисунок 6 – Функциональные свойства исследованных термизированных продуктов

Figure 6 – Functional properties of the studied thermized products

Из представленных данных рисунка 6 видно, что замена 5 % казеина на изолят соевого белка не влияет на комплекс функциональных свойств термизированных продуктов. Увеличение растительного белка до 30 % приводит к ухудшению натираемости, растяжимости и плавимости термизированных продуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, белковые компоненты оказывают влияние на органолептические, физико-химические, реологические показатели и функциональные свойства термизированных продуктов.

Для производства пиццы рекомендуется применять термизированные продукты с соотношением казеин/сыр 50/50. Замена молочных белков на растительные не приводит к улучшению комплекса необходимых функциональных свойств исследованных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Dairy Ingredients Market By Form (Milk, Whey), By Type (Milk Powder, Whey Ingredients, Milk Protein Concentrates, Milk Protein Isolates, Lactose & Derivatives, Casein & Caseinates, Milk Protein Hydrolysates), By Application (Bakery & Confectionery, Dairy Products, Convenience Foods, Infant Milk Formula, Sports & Clinical Nutrition), And By Regional Analysis (North America, Europe, Asia Pacific, Latin America, and Middle East & Africa) and - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast (2023–2028). URL: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/global-dairy-ingredients-market>. (дата обращения: 28.03.2024).
2. Новое поколение белковых ингредиентов на основе фракционирования молока / Д.Н. Володин [и др.] // Переработка молока. 2021. № 8. С. 10–12.
3. Функциональные продукты на основе молока и его производных / Л.А. Остроумов [и др.] // Молочная промышленность. 2003. № 9. С. 21–22.
4. Дунаев А.В. Имитационные плавленые сырные продукты и вопросы импортозамещения // Сыроделие и маслоделие. 2017. № 4. С. 36–37.
5. Зозулин О. Вопросы производства имитационных сырных продуктов // Переработка молока. 2018. № 9. С. 34–35.
6. Альтернативные классическому сыру продукты: экономическое производство и разнообразие вкусов // Сыроделие и маслоделие. 2017. № 4. С. 40.
7. ГОСТ Р 59212-2020. Сыры для пиццы термизированные. Технические условия: введ. 2021-01-01. Москва, 2020, 12 с.
8. Свириденко Г.М., Калабушкин В.В. Сыры для пиццы. Необходимость подбора сырья для обеспечения безопасности и функциональных свойств продукта // Сыроделие и маслоделие. 2019. № 5. С. 10–12.
9. Технология производства концентрата общего белка молока / О.В. Дымар [и др.] // Молочная промышленность. 2017. № 1. С. 58–60.
10. Володин Д.Н., Гридин А.С., Евдокимов И.А. Перспективы производства сухих белковых ингредиентов на основе молочного сырья // Молочная промышленность. 2020. № 1. С. 28–30.
11. Chavan R.S., Jana A. Cheese substitutes: an alternative to natural cheese - a review // International journal of Food Science, Technology & Nutrition. 2007. Vol. 2. No. 2. P. 25–39.
12. Братчиков С.М. Разработка технологии плавленых сырных продуктов с использованием растительного белокодержащего сырья: дис. ... кан. техн. наук: 05.18.04 / Братчиков Сергей Михайлович. Углич, 2005. 127 с.
13. Молибога Е.А. Теоретическое обоснование и экспериментальные исследования технологии плавленых сырных продуктов: дис. ... док. техн. наук: 05.18.04 / Молибога Елена Александровна. Омск, 2016. 554 с.
14. Антропс М.Ю. Разработка ресурсосберегающей технологии плавленого сырного продукта смешанного сырьевого состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04 / Антропс Марис Юрьевич. Углич, 2006. 134 с.
15. Status and developments in analogue cheese formulations and functionalities / F. Masotti [and etc.] // Trends in Food Science & Technology. 2018. Vol. 74. P. 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.016>.
16. Kim (Lee) S.Y., Park P.S.W., Rhee K.C. Textural

ВЛИЯНИЕ БЕЛКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МОЛОКОСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЗИРОВАННЫХ СЫРОВ

properties of cheese analogs containing proteolytic enzyme-modified soy protein isolates // *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1992. Vol. 69. P. 755–759.

17. Свириденко Г.М., Калабушкин В.В., Шишкина А.Н. Шкала оценки сыров для пиццы // Сыроделие и маслоделие. 2022. № 4. С. 28–32. <https://doi.org/10.31515/2073-4018-2022-4-28-32>.

18. Свириденко Г.М., Шишкина А.Н., Калабушкин В.В. Возможность применения натуральных сыров для производства пиццы // Пищевые системы. 2023. Т. 6. № 3. С. 416–423. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-3-416-423>.

Информация об авторах

Г. М. Свириденко – доктор технических наук, руководитель направления микробиологических исследований молока и молочных продуктов ВНИИМС – филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

А. Н. Шишкина – младший научный сотрудник направления исследований по технологии плавленых сыров ВНИИМС – филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

В. В. Калабушкин – кандидат технических наук, руководитель направления по технологии плавленых сыров ВНИИМС – филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

Е. В. Алексеева – младший научный сотрудник направления исследований по технологии плавленых сыров ВНИИМС – филиала ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

REFERENCES

1. Global Dairy Ingredients Market By Form (Milk, Whey), By Type (Milk Powder, Whey Ingredients, Milk Protein Concentrates, Milk Protein Isolates, Lactose & Derivatives, Casein & Caseinates, Milk Protein Hydrolysates), By Application (Bakery & Confectionery, Dairy Products, Convenience Foods, Infant Milk Formula, Sports & Clinical Nutrition), And By Regional Analysis (North America, Europe, Asia Pacific, Latin America, and Middle East & Africa) and - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast (2023-2028). URL: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/global-dairy-ingredients-market>
2. Volodin, D.N., Topalov, V.K., Kulikova, I.K. & Evdokimov, I.A. (2021). A new generation of protein ingredients based on milk fractionation. *Milkprocessing*, (8), 10-12. (In Russ.).
3. Ostroumov, L.A., Popov, A.M., Postolova, A.M. & Kuprina, I.K. (2003). Functional products based on milk and its derivatives. *Dairy Industry*, (9), 21-22. (In Russ.).
4. Dunaev, A.V. (2017). Imitating processed cheese products and items of import replacement. *Cheese and butter making*, (4), 36-37. (In Russ.).
5. Zozulin, O. (2018). Issues in the production of imitation cheese products. *Milk Processing*, (9), 34-35. (In Russ.).
6. The products alternatives to the classic cheese: economic production and tastes varieties (2017). *Cheese and butter making*, (4), 40. (In Russ.).
7. Cheeses for pizza termized. Specifications. (2020). ГОСТР 59212-2020. from 1 Jan 2021. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).
8. Sviridenko, G.M. & Kalabushkin, V.V. (2019). Cheese for pizza. Necessity to select raw materials for ensuring safety and functional properties of the product. *Cheese and butter making*, (5), 10-12. (In Russ.).
9. Dymar, O.V., Efimova, E.V., Mikluh, I.V., Sokolovskaya, L.N. & Muavad, N. (2017). Technology of production of the total milk protein concentrate. *Dairy Industry*, (1), 58-60. (In Russ.).
10. Volodin, D.N., Gridin, A.S. & Evdokimov, I.A. (2020). Prospects of the production of dry protein ingredients based on the milk raw materials. *Dairy Industry*, (1), 28-30. (In Russ.).
11. Chavan, R.S. & Jana, A. (2007). Cheese substitutes: An alternative to natural cheese-A review. *International Journal of Food Science, Technology & Nutrition*, (2), 25-39.
12. Bratchikov, S.M. (2005). Development of technology for processed cheese products using vegetable protein-containing raw materials. PhDthesis. Uglich. (In Russ.).
13. Moliboga, E.A. (2016). Theoretical justification and experimental studies of the technology of processed cheese products. Doctoraldissertation. Omsk. (In Russ.).
14. Anthrops, M.Y. (2006). Development of resource-saving technology for a processed cheese product of mixed raw materials. PhD thesis. Uglich. (In Russ.).
15. Masotti, F., Cattaneo, S., Stuknytė, M. & De Noni, I. (2018). Status and developments in analogue cheese formulations and functionalities. *Trends in Food Science & Technology*, 74, 158-169. doi: 10.1016/j.tifs.2018.02.016.
16. Kim, S.Y., Park, P.S. & Rhee, K.C. (1992). Textural properties of cheese analogs containing proteolytic enzyme-modified soy protein isolates. *Journal of the American Oil Chemists Society*, (69), 755-759.
17. Sviridenko, G.M., Kalabushkin, V.V. & Shishkina, A.N. (2022). Rating scale of pizza cheeses. *Cheese and butter making*, (4), 28-32. doi: 10.31515/2073-4018-2022-4-28-32. (In Russ.).
18. Sviridenko, G.M., Shishkina, A.N. & Kalabushkin, V.V. (2023). Possibility of using natural cheeses for pizza production. *Food Systems*, (6(3)), 416-423. doi: 10.21323/2618-9771-2023-6-3-416-423. (In Russ.).

Information about the authors

G.M. Sviridenko - Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Microbiological Research of Milk and Dairy Products at VNIIMS, a branch of the Federal State Budgetary Institution "FSC Food Systems named after. V.M. Gorbatov" RAS.

A.N. Shishkina - junior researcher in the research area on the technology of processed cheeses at VNIIMS, a branch of the Federal State Budgetary Institution "FSC Food Systems named after. V.M. Gorbatov" RAS.

V.V. Kalabushkin - Candidate of Technical Sciences, head of the department for processed cheese technology at VNIIMS - a branch of the Federal State Budgetary Institution "FSC of Food Systems named after. V.M. Gorbatov" RAS.

E.V. Alekseeva - is a junior researcher in the research direction on the technology of processed cheeses at VNIIMS, a branch of the Federal State Budgetary Institution "FSC Food Systems named after. V.M. Gorbatov" RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 634.11
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.008

EDN: TPPVWD

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЯБЛОК СОРТОВ И ГИБРИДОВ СЕЛЕКЦИИ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

Людмила Ивановна Пусенкова¹, Анна Дмитриевна Заграничная²,
Олеся Юрьевна Калужина³

^{1, 2, 3} Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

¹ Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства УФИЦ РАН, Уфа, Россия

¹ I.pusenkova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6341-0486>

² Ann.mishunina17@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1417-6846>

³ 216322705@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5923-1231>

Аннотация. Яблочное сырье используется в промышленности для получения готовых продуктов питания и полуфабрикатов. Разнообразие сортов яблок обеспечивает различный химический состав сырья, что позволяет получать отличающиеся по свойствам пищевые продукты. В статье приведена сравнительная оценка сортов и перспективных гибридов яблони башкирской селекции по содержанию важнейших биохимических показателей качества, биологически активных веществ и микроэлементов. Изучено содержание витамина С, массовой доли титруемых кислот, сахара, общего содержания флавоноидов. Определено содержание микроэлементов: меди, цинка, железа и кобальта. Приведены результаты определения массовой доли пектиновых веществ с разделением по фракциям на протопектин и гидратопектин. На основании проведенных исследований установлено варьирование содержания веществ, формирующих химический состав в зависимости от сортовых особенностей яблони. По содержанию сахаров выделились гибриды 6-82 (9,88 %) и 1-60 (9,22 %). В исследуемых плодах массовая доля титруемых кислот составила от 0,13 % (сорт Бельфлер Башкирский) до 0,35 % (сорт Башкирское зимнее). Содержание аскорбиновой кислоты варьирует от 12,2 мг% до 13,25 мг%. В составе плодов обнаружено суммарное содержание биофлавоноидов на уровне от 50 до 176 мг/100 г сырого веса. Свыше 100 мг Р-активных катехинов в 100 г плодов отмечено в сортах Башкирский красавец, Башкирское зимнее (176 и 133 соответственно) и перспективных гибридах 6-82 и 1-19 (100 и 103 соответственно). Общее содержание пектиновых веществ в изученных образцах составляет от 1,46 до 2,88 %. На основе проведенных исследований получены технологически характеристики плодов сортов и перспективных гибридов, определяющие возможность их использования для промышленной переработки.

Ключевые слова: плоды яблони; сорта; гибриды; химический состав; пектин.

Для цитирования: Пусенкова Л. И., Заграничная А. Д., Калужина О. Ю. Перспективы технологической переработки яблок сортов и гибридов селекции Республики Башкортостан // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 76–83. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.008. EDN: <https://elibrary.ru/TPPVWD>.

Original article

PROSPECTS OF TECHNOLOGICAL PROCESSING OF APPLE VARIETIES AND HYBRIDS OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN SELECTION

Ludmila I. Pusenkova¹, Anna D. Zagranichnaya², Olesya Yu. Kaluzhina³

^{1, 2, 3} Bashkir Atate Agrarian University, Ufa, Russia

¹ Bashkiria Research Agricultural Institute, Ufa Federal Research Center RAS, Ufa, Russia

¹ I.pusenkova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6341-0486>

² Ann.mishunina17@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1417-6846>

³ 216322705@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5923-1231>

© Пусенкова Л. И., Заграничная А. Д., Калужина О. Ю., 2025

Abstract. Raw apple material is used in the food industry for ready-to-use and pre-packed products. The Diversity of apple kinds provides various chemical composition of raw apple materials, what allows to obtain food products with different properties. The article presents a comparative evaluation of the content of most important biochemical indicators of quality, biologically active substances and trace elements of apple types and promising hybrids of Bashkir selection. It is studied the content of vitamin C, mass fractions of titrated acids and sugar, total flavonoids content. The concentrations of four trace elements (copper, zinc, iron and cobalt) are determined. It describes the results of calculation of the mass fraction of pectin with the separation into fractions of protopectin and hydrate pectin. Based on the conducted research, it was concluded that the chemical composition depends on the apple tree type. According to the sugar content, hybrids 6-82 (9.88%) and 1-60 (9.22%) stood out. In the studied fruits, the mass fraction of titrated acids ranges from 0.13 (Belfleur Bashkir) to 0.35% (Bashkir zimnee). The content of citric acid varies from 12.2 mg% to 13.25 mg %. In the fruit composition, the total content of bioflavonoids is at the level from 50 to 176 mg / 100 g raw weight. Over 100 mg of P-active catechins in 100 g of fruits are noted in the Bashkir krasavets, Bashkir zimnee (176 and 133 accordingly) and promising hybrids 6-82 and 1-19 (100 and 103 accordingly). The total content of pectin in the studied samples varies from 1.46 to 2.88%. Based on the conducted research, technological characteristics of varieties and promising hybrids were obtained, directing the possibility of their use for industrial processing.

Keywords: apple; varieties; hybrids; chemical composition; pectin.

For citation: Pusenkova, L. I., Zagranichnaya, A. D. & Kaluzhina, O. Yu. (2025). Prospects of technological processing of apple varieties and hybrids of the Republic of Bashkortostan selection. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 76-83. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.008. EDN: <https://elibrary.ru/TPPVWD>.

ВВЕДЕНИЕ

Яблоня домашняя (*Malus domestica*) – растение с богатыми по биохимическому составу плодами, которые употребляются в свежем виде и являются ценным сырьем для производства многих пищевых продуктов. Плоды являются источником сахаров, органических кислот, пектинов, аскорбиновой кислоты (витамин С), фенольных соединений (витамин Р), макро- и микроэлементов [1].

Огромное разнообразие сортов, вкусов, уникальный химический состав яблочного сырья позволяет получать отличающиеся по свойствам пищевые продукты: соки [2], напитки [3], вина [4, 5], десерты [6, 7, 8] и др. Основное использование яблок в качестве промышленного сырьевого источника организовано по следующим направлениям: концентрированный яблочный сок; 100 % яблочный сок прямого отжима, яблочное пюре; яблочный сидр и яблочная водка (кальвадос, в небольших объемах); яблочное повидло, варенье, джем. Широкое внедрение находят также безотходные технологии переработки яблочного сырья, поскольку выжимки являются богатым источником природных антиоксидантов [9] и используются для получения пектина [10, 11].

Яблоневые насаждения в Республике Башкортостан расширяются за счет новых сортов, созданных селекционерами Башкирского научно-исследовательского института сельского хозяйства УФИЦ РАН. По мнению ряда ученых, спрос населения на фрукты и ягоды должен быть удовлетворен главным образом за счет местного производства, поскольку плоды привычной климатической зоны имеют наибольшую ценность для организма: повышают иммунитет, так как содержат комплекс антиокислительных веществ, выработанный против конкретных ло-

кальных стрессовых факторов экзогенного происхождения, действующих на человека [12]. В связи с чем важнейшей задачей является создание новых генотипов, отличающихся не только высокой продуктивностью, устойчивостью к болезням, стрессовым факторам, но и обеспечивающих получение качественных плодов с повышенным содержанием природных биологически активных соединений.

Цель данной работы – изучение биохимического состава сортов и новых перспективных селекционных форм плодов яблони селекции Башкирского НИИСХ УФИЦ РАН и оценка влияния его на качество кондитерских пастильных изделий.

УСЛОВИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований были плоды яблони широко распространенных сортов Башкирский красавец, Бельфлер Башкирский, Башкирское зимнее и перспективных гибридов 6-82, 1-60 1-19, выращенные в условиях Кушнаренковского селекционного центра Башкирского НИИСХ УФИЦ РАН.

Сорт Башкирский красавец, относящийся к раннезимним, занимает около 25 % площади яблоневых насаждений. Урожайность варьирует от 140 до 257 ц/га. Плоды средние, весом 92–137 г, одномерные, ширококонические, гладкие, правильной формы. Плоды хранятся 130 дней, транспортабельность и товарность высокие. Сорт Башкирское зимнее позднезимний, урожайность составляет от 110 до 210 ц/га. Плоды средних размеров, весом 87–145 г, правильной формы, плоскоокруглые. Срок хранения плодов 220 дней. Сорт устойчив к экстремальным погодным условиям и к парше. Особенностью раннезимнего сорта Бельфлёр Башкирский является почти чисто сладкий вкус плодов. Средняя урожайность составляет 105 ц/га.

Плоды массой до 90 г, овально-округлые, слаборебристые с зеленовато-желтой окраской, с румянцем и крапинками. Плоды хранятся до марта. Съемная зрелость наступает в конце августа–начале сентября. Сорт устойчив к парше [13].

Формирование урожая плодов проходило в условиях повышенных среднесуточных температур и недостатка влаги. Апрель характеризовался повышенным количеством осадков и контрастными температурами, поэтому распускание почек и цветение наступило позже средних многолетних сроков на 10–15 дней. Цветение яблони пришлось на конец III декады мая. Обильные дожди в период цветения явились причиной плохого завязывания плодов. Степень плодоношения большинства сортов колебалась от 0,5 до 3 баллов. Следует отметить, что значительные изменения химического состава плодов происходят под влиянием метеорологических условий вегетационного периода. Так, в условиях прохладного дождливого лета в плодах накапливается меньшее количество сухих веществ, а, следовательно, и сахаров, повышается кислотность. В годы с жарким летом наблюдается обратное явление.

С целью отбора наиболее перспективных селекционных форм для использования в промышленном садоводстве и для переработки исследовали биохимический состав плодов. Определяли содержание растворимых сухих веществ (РСВ), сахаров, титруемых кислот, аскорбиновой кислоты (АК), фенольных и пектиновых веществ, по общепринятым методикам [14, 15]. Определение микроэлементов проводили методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Были изготовлены образцы па-

стильных изделий из исследуемых сортов яблок и проведены исследования на соответствие требованиям ГОСТ 6441-2014. Изделия кондитерские пастильные. Общие технические условия по физико-химическим показателям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав и разработка технологий переработки плодов яблони являются постоянным предметом исследования в России и за рубежом. Показано, что сорт яблони является основной детерминантой химического состава и антиоксидантной активности плодов. Вместе с тем, биохимический состав плодов в значительной степени зависит от зоны выращивания [16].

Проведена оценка химического состава плодов яблони башкирской селекции. Определяли содержание растворимых сухих веществ, сахаров, титруемых кислот, аскорбиновой кислоты, пектиновых веществ и флавоноидов (таблица 1), а также микроэлементов (таблица 2).

Содержание сухих веществ – важный показатель, определяющий способность плодов к технологической переработке. Более высокое содержание сухих веществ положительно сказывается на свойствах готовых продуктов из яблок. Все изученные сортообразцы имели сходные показатели в пределах от 11,3...13,5 %. Сахара, формирующие содержание растворимых сухих веществ на 70–80 %, обуславливают степень сладости и уровень приемлемости для потребителей. Кроме того, уровень сахара важен и для переработки яблок на сок, джем, пастылу и т.д.

Таблица 1 – Химический состав плодов яблони, урожай 2023 г.

Table 1 – Chemical composition of apple fruits, harvest in 2023

Показатели	Сорта, гибриды яблок					
	Башкирский красавец	Бельфлер Башкирский	Башкирское зимнее	6-82	1-60	1-19
Содержание растворимых сухих веществ, %	12,4	13,5	11,3	12,8	12,1	12,0
Сумма сахаров, %	8,49	8,32	8,12	9,88	9,22	8,90
Титруемая кислотность, %	0,16	0,13	0,35	0,20	0,16	0,19
Аскорбиновая кислота, мг/100 г	13,08	13,25	12,46	12,64	12,29	12,20
Флавоноиды, мг катехина/ 100 г	176	50	133	100	85	103
Пектиновые вещества, %	1,94	2,88	1,46	1,92	2,43	1,91

Как следует из таблицы 1, в свежих плодах в период потребительской зрелости содержание сахаров составило 8,12...9,88 %. Наиболее высокое содержание сахаров выявлено у гибридов 6-82 (9,88 %) и 1-60 (9,22 %). В исследуемых образцах плодов отмечено значительное варирование массовой доли титруемых кислот – от 0,13 (сорт Бельфлер Башкирский) до 0,35 % (сорт Башкирское зимнее). Содержание титруе-

мых кислот в перспективных гибридах составило 0,16...0,20 %, в сортах – 0,13...0,35. При этом можно выделить гибрид 6-82, отличающийся высоким содержанием сахаров и низкой кислотностью, а также сорта Башкирское зимнее с наименьшим содержанием сахара и наибольшей кислотностью.

В изученных образцах плодов содержание аскорбиновой кислоты составило от 12,20 (гибрид 6-82) до 13,25 (сорт Бельфлер Башкирский) мг/100 г. Содержание флавоноидов колебалось в

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЯБЛОК СОРТОВ И ГИБРИДОВ СЕЛЕКЦИИ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

брид 1-19) до 13,25 мг/100 г (сорт Бельфлер Башкирский). Следует отметить, что содержание аскорбиновой кислоты в плодах является нестабильным признаком и в значительной степени зависит от преобладающих метеорологических условий года. В прохладное, влажное лето, как правило, аскорбиновой кислоты накапливается больше, чем в сухое и жаркое.

Большую ценность представляют биологически активные вещества плодов, являющиеся часто единственным источником поступления их в организм человека и играющие важную роль в жизнедеятельности. Так, в яблоках обнаружено около 10 фенольных соединений, среди которых наибольшее значение имеют катехины и лейкоантоксианы, обладающие высокими Р-активными свойствами. Предполагается, что при взаимодействии с аскорбиновой кислотой лучше проявляются их антибиотические и антиоксидантные свойства.

Изучено содержание биологически активных флавоноидов в исследуемых сортах и гибридах яблок. Установлены значительные сортовые различия по содержанию катехинов: суммарное содержание составило от 50 до 176 мг/100 г сырого веса. Свыше 100 мг Р-активных катехинов в 100 г яблок отмечено в сортах Башкирский красавец, Башкирское зимнее (176 и 133 мг/100 соответственно). Перспективные гибриды 6-82 и 1-19 содержали соответственно 100 и 103 мг катехина/ 100 г. Содержание Р-активных веществ в плодах является очень нестабильным показателем, который варьируется в зависимости от условий выращивания, причем больше накапливается в теплые влажные годы.

Яблоки являются одним из наиболее богатых источников пектиновых веществ, находящихся преимущественно в водорастворимой форме (60–70 % от общего количества) [17]. Продолжительность хранения и технологическая пригодность плодов, характер структуры мякоти во многом определяются качественным и количественным содержанием пектиновых веществ. Уникальная функциональность пектина (загуститель, гелеобразующий агент, стабилизатор и т. д.) определяет его широкое использование в пищевой промышленности для приготовления желе, джема, мармелада, повидла, пасты, мороженого, фруктовых начинок.

К моменту технологической спелости плодов по содержанию пектиновых веществ, имеющих важное технологическое значение, лидировали сорт Бельфлер Башкирский – 2,88 % и гибрид 1-60 – 2,43 %. У остальных сортов показатели пектиновых веществ имели близкие значения 1,46 ... 1,94 %.

Для оценки промышленной значимости изучаемых сортов и гибридов плодов яблони проведены исследования по определению как массовой доли, так и фракционного состава

пектиновых веществ: протопектина (ПП) – плотного нерастворимого вещества, содержащегося в клеточных стенках, и гидратопектина (РП) – растворимого вещества, находящегося в клеточном соке (рис. 1, 2).

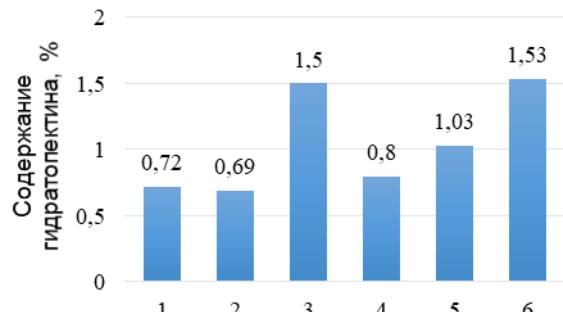


Рисунок 1 – Содержание гидратопектина в исследуемых сортах и гибридах яблок (%): 1 – Башкирский красавец; 2 – Башкирское зимнее; 3 – Бельфлер Башкирский; 4 – гибрид 6-82; 5 – гибрид 1-19; 6 – гибрид 1-60

Figure 1 – Hydratopectin content in the studied apple varieties and hybrids (%): 1 – Bashkir beauty; 2 – Bashkir winter; 3 – Bashkir Bellefleur; 4 – hybrid 6-82; 5 – hybrid 1-19; 6 – hybrid 1-60

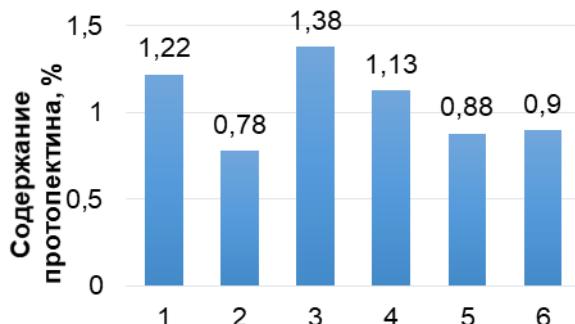


Рисунок 2 – Содержание протопектина в исследуемых сортах и гибридах яблок (%): 1 – Башкирский красавец; 2 – Башкирское зимнее; 3 – Бельфлер Башкирский; 4 – гибрид 6-82; 5 – гибрид 1-19; 6 – гибрид 1-60

Figure 2 – Protopectin content in the studied apple varieties and hybrids (%): 1 – Bashkir beauty; 2 – Bashkir winter; 3 – Bashkir Bellefleur; 4 – hybrid 6-82; 5 – hybrid 1-19; 6 – hybrid 1-60

По результатам проведенных исследований показано, что по наибольшему содержанию гидратопектина выделяются сорт Бельфлер Башкирский и гибрид 1-60 (1,53 и 1,5 % соответственно), протопектина – сорта Башкирский красавец (1,22 %), Бельфлер Башкирский (1,38 %) и гибрид 6-82 (1,13 %). При этом растворимый пектин сортов составил от общего количества 37...52,1 %, гибридов – 41,5...62,9 % соответственно.

Общее содержание пектиновых веществ в изученных образцах яблок достаточно велико и

составляет от 1,46 до 2,88 %, что дает основание для изучения возможности рассмотрения данных сортов и гибридов яблок в качестве пектинсодержащего сырья как для промышленного производства пектина, так и для производства продуктов функционального назначения.

Минеральные вещества, составляющие в среднем 0,5 % съедобной части плода, находятся в легкодоступной для организма форме, что способствует получению организмом содержащихся в яблоках жизненно важных соединений. При этом минеральный состав плода во многом обусловлен генетическими характеристиками сорта, а также почвенными условиями произрастания. Результаты определения четырех микроэлементов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Микроэлементный состав плодов

Table 2 – Microelement composition of fruits

Сорт, гибрид яблок	Содержание микроэлементов, мг/кг			
	Cu	Zn	Fe	Co
Башкирский красавец	14,70	0,20	4,48	0,15
Бельфлер Башкирский	15,42	–	6,40	0,09
Башкирское зимнее	13,72	–	3,21	0,19
6-82	14,40	–	7,04	0,10
1-60	4,99	–	10,88	0,11
1-19	12,24	–	6,40	0,19

Установлено, что изученные образцы яблок содержат микроэлементы: медь, железо, кобальт. Цинк в количестве 0,20 мг/кг был обнаружен только в плодах сорта Башкирский красавец, тогда как его содержание в других сортах было ниже порога определения.

Яблоки считают одним из ценных источников поступления в организм ионов железа, участвующих в процессе синтеза ферментов и гемоглобина. Наибольшее содержание железа 6,40..10,88 мг/кг выявлено в гибридах, а среди сортов лидировал Бельфлер Башкирский – 6,40 мг/кг. Выявлено достаточно высокое содержание меди в плодах всех образцов, кроме гибрида 1-60. Выделяется сорт Бельфлер Башкирский, содержание меди в котором достигает 15,42 мг/кг. По сумме показателей наиболее ценным среди сортов можно назвать Бельфлер Башкирский, а среди гибридов можно выделить 1-60 и 6-82.

Для оценки перспектив использования сырья из яблок изученных сортов в производстве кондитерских были изготовлены образцы пасты, так как именно для пастильной группы изделий важными являются структурные свойства сырья и способность гелеобразования, которую обеспечивает содержание пектиновых веществ.

Яблочное пюре получали путем термической обработки плодов в пароконвектомате при температуре 110 °С в течение 20 минут. Размягченные яблоки очищали от сердцевины, измельчали с помощью блендера и перетирали через сито. За счет термической обработки значительно уменьшается микробиологическая обсемененность пюре, а под действием имеющейся в яблоках кислоты происходит гидролиз протопектина с образованием гелеобразующих пектиновых веществ.

В качестве сравнительного образца изготовили пасты на основе яблочного пюре от

ООО «Садовод». Затем образцы используемого пюре путем упаривания привели к рекомендуемому для пастильных изделий содержанию сухих веществ – 12 %. Стоит отметить, что наиболее низкое содержание сухих веществ было у покупного пюре – 10,2 %. Полученные образцы представлены на рисунке 3. При изготовлении опытных образцов пасты руководствовались сводной рецептурой производства пасты «Пасты ванильная».

С целью определения зависимости потребительских качеств пасты от содержания пектина в яблоках были проведены физико-химические анализы полученных образцов. Данные представлены в таблице 3.

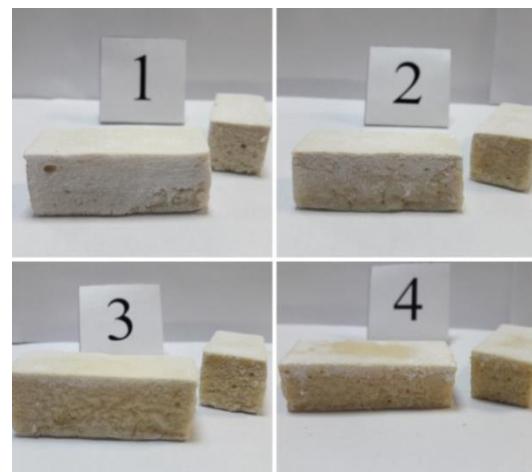


Рисунок 3 – Внешний вид образцов пасты на основе яблочного пюре: 1- сорт Бельфлер Башкирский; 2 – сорт Башкирский красавец; 3 – сорт Башкирское зимнее; 4 – покупное пюре

Figure 3 – Appearance of samples of apple paste based on applesauce: 1- Bashkir Bellefleur variety, 2 – Bashkir Krasavets variety, 3 – Bashkir winter variety, 4 – purchased mashed potatoes

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЯБЛОК СОРТОВ И ГИБРИДОВ СЕЛЕКЦИИ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

Таблица 3 – Физико-химические показатели качества пастилы

Table 3 – Physico-chemical indicators of the pastille quality

Характеристики	Используемое в рецептуре яблочное пюре			
	сорт Бельфлер Башкирский (№ 1)	сорт Башкир- ский красавец № 2	сорт Башкир- ское зимнее (№ 3)	покупное (№ 4)
Суммарное содержание пектиновых веществ в яблоках, %	2,88	1,94	1,46	–
Суммарное содержание пектиновых веществ в пюре, %	2,30	1,53	1,11	0,98
Плотность, г/см ³	0,58	0,72	0,79	0,87
Деформация при усилии 40 г, мм	0,5	1,2	1,6	2,2

Полученные данные свидетельствуют о прямой зависимости реологических характеристик пастилы от содержания пектина в используемом яблочном пюре. Наименьшая плотность образца № 1, которая говорит о развитой пористой структуре, наблюдается у образца на основе пюре из яблок сорта Бельфлер Башкирский, в котором содержание пектина было максимальным. Соответственно, чем выше в исходных яблоках содержание пектина – тем лучше пористая структура пастилы, о чем говорит и изменение деформации при равных усилиях на образцы. При этом все образцы соответствуют требованиям ГОСТ 6441-2014 Изделия кондитерские пастильные. Общие технические условия, согласно которому плотность пастилы не должна превышать 0,9 г/см³.

При органолептической оценке образцов пастилы из различного сортового яблочного пюре различия между вкусоароматическими профилями изделий были незначительными. Все образцы имели свойственные данному виду кондитерских изделий вкус и аромат. Цвет изделия варировался от белого с желтым оттенком до светло-желтого с коричневым оттенком, что объясняется процессом карамелизации сахаров при изготовлении пюре.

Консистенция пастилы всех образцов характеризовалась как мягкая, легко поддающаяся разламыванию. При этом дегустационная комиссия отметила значительные изменения по структуре образцов: менялась равномерность пористой структуры, увеличивался размер воздушных пор. Образец № 1 выделили как наиболее привлекательный для потребителей: с самой равномерной пенообразной структурой, четкими гранями и без деформаций. Наименее устойчивая форма изделий выявлена у образца № 4, что еще раз подтверждает зависимость между реологическими характеристиками пастилы и содержания пектиновых веществ в яблочном пюре.

Повышенное потребление пектиновых веществ, в том числе за счет изделий на основе продуктов переработки яблок, сейчас активно продвигается из-за их способности связывать ионы тяжелых металлов и благоприятного воздействия на микрофлору кишечника человека

[18, 19]. В связи с этим актуальным является выделение и внедрение в производство сортов, богатых пектиновыми соединениями.

ВЫВОДЫ

Установлено варырование химического состава плодов в зависимости от сортовых характеристик яблони. Выявлено, что изученные сорта Башкирский красавец, Башкирское зимнее и перспективные гибриды 6-82, 1-19 характеризуются довольно высоким содержанием в плодах биологически активных веществ (катахинов), свыше 100 мг/100 г, что соответствует требованиям Госкомиссии по испытанию плодовых и ягодных культур. Плоды сортов Башкирский красавец, Бельфлер Башкирский и гибридов 6-82, 1-19, 1-60 отличаются достаточно высоким содержанием пектиновых соединений, что особенно ценно при употреблении в свежем виде в качестве естественного адсорбента вредных веществ (тяжелые металлы, радионуклиды и др.). Сорт Бельфлер Башкирский содержит наибольшее содержание витамина С, меди и железа, обладая при этом наиболее низкой кислотностью, что выгодно выделяет его среди других сортов и обуславливает перспективы в качестве сырья для пищевой продукции. Данные сорта и гибриды обладают технологическими характеристиками, определяющими перспективность их использования для промышленной переработки, и могут быть предложены для получения пектиновых веществ и использования их в пищевой и фармацевтической промышленности.

Проведена органолептическая и физико-химическая оценка пастилы, изготовленной из яблок изучаемых сортов. Выявлена прямая зависимость реологических и органолептических качеств пастильных изделий от содержания пектиновых веществ в яблочном сырье: наилучшие изделия изготовлены из сорта Бельфлер Башкирский с наибольшим содержанием пектинов. При этом все образцы соответствуют требованиям ГОСТ 6441-2014.

Изучение перспективных селекционных форм позволит отобрать новые сорта с высоким содержанием в плодах биологически активных веществ и

комплексом других хозяйственных требований, а также источники для дальнейшей селекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов М. Ю., Макаров В. Н., Жбанова Е. В. Роль плодов и ягод в обеспечении человека жизненно важными биологически активными веществами // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 2. С. 56–60. doi: 10.24411/0235-2451-2019-10214.
2. Кох Д. А. Исследование химического состава сока из плодов мелкоплодных яблонь, произрастающих на территории Красноярского края // Ползуновский вестник. 2021. № 3. С. 30–34. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.004.
3. Мельникова Е. В., Беляков А. А., Лисовец Т. А., Соколова А. А. Разработка рецептуры безалкогольного напитка на основе ягод ирги и мелкоплодных яблок // Вестник КрасГАУ. 2022. № 8(185). С. 187–193. doi: 10.36718/1819-4036-2022-8-187-193.
4. Гусакова Г. С., Супрун Н. П., Раченко М. А. Исследование биохимического состава плодов яблони Южного Прибайкалья и продуктов виноделия, сброженных на древесной щепе // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 4(31). С. 722–736. doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-4-722-736.
5. Елисеева С. А., Барсукова Н. В., Саблина А. А. Влияние товароведных характеристик сортов яблок на формирование потребительских свойств десертов // Вестник КрасГАУ. 2019. № 9(150). С. 113–120.
6. Исследование сортов яблони алтайской селекции для производства высококачественных игристых вин / Н. К. Шелковская, И. П. Калинина, В. П. Коцюба, С. И. Камаева // Ползуновский вестник. 2013. № 4-4. С. 146–150.
7. Причко Т. Г., Казахмедов Р. Э., Дрофичева Н. В. Разработка рецептуры полифункционального желе из фруктового и овощного сырья // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2020. № 1(373). С. 52–56. doi: 10.26297/0579-3009.2020.1.14.
8. Скороспелова Е. В. Технологические аспекты производства протертых масс без сахара на основе плодового и ягодного сырья Алтайского сортимента / Е. В. Скороспелова, О. Ю. Михайлова, Н. К. Шелковская // Ползуновский вестник. 2022. № 4–1. С. 100–105. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.012.
9. Calvete-Torre I., Muñoz-Almagro N., Pacheco M.T., Antón M.J., Dapena E., Ruiz L., Margolles A., Villamiel M., Moreno F.J. Apple pomaces derived from mono-varietal Asturian ciders production are potential source of pectins with appealing functional properties // Carbohydrate Polymers. 2021. V. 264. P. 117980. doi: 10.1016/j.carbpol.2021.117980.
10. Ильина И. А., Мачнева И. А., Бакун Е. С. Технологические аспекты получения высококачественного сырья для производства пектина // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 6. С. 47–50. doi: 10.30850/vrsn/2019/6/47-50.
11. Morales-Contreras B. E., Wicker L., Rosas-Flores W., Conteras-Esquivel J. C., Gallegos-Infante J. A., Reyes-Jaquez D., Morales-Castro J. Apple pomace from variety "Blanca de Asturias" as sustainable source of pectin: Composition, rheological, and thermal properties // LWT. 2020. V.117. P.108641. doi: 10.1016/j.lwt.2019.108641.
12. Макаркина М. А., Янчук Т. В., Павел А. Р., Соколова С. Е. Биохимическая оценка перспективных форм яблони и смородины // Вестник ОрелГАУ. 2015. № 6(57). С. 71–78. doi: 10.15217/issn1990-3618.2015.6.71.
13. Демина Т. Г., Фазлиахметов Х. Н. Селекция яблони в Республике Башкортостан // Селекция и сорторазведение садовых культур. 2016. Т. 3. № 1. С. 32–34.
14. Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова. 3-е изд. переработанное и доп. Л. : Агропромиздат, Ленинградское отд. 1987. 430 с.
15. Программа и методика сортознания плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под общ. ред. Е. Н. Седова и Т. П. Огольцовой. Орел. ВНИИСПК, 1999. 608 с.
16. Седов Е. Н., Макаркина М. А. Биохимический состав и масса плодов в различных зонах выращивания яблони // Аграрный вестник Урала. 2008. № 5(47). С. 22–25.
17. Alexandra Buergy, Agnès Rolland-Sabaté, Alexandre Leca, Catherine M. G. C. Renard. Pectin modifications in raw fruits alter texture of plant cell dispersions // Food Hydrocolloids. 2020. V. 107. P. 105962. doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105962.
18. Weijie Lan, Catherine M. G. C. Renard, Benoit Jaillais, Alexandre Leca, Sylvie Bureau. Fresh, freeze-dried or cell wall samples: Which is the most appropriate to determine chemical, structural and rheological variations during apple processing using ATR-FTIR spectroscopy? // Food Chemistry. 2020. V. 330. P. 127357. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127357.
19. Ines Calvete-Torre, Carlos Sabater, María José Antón, F. Javier Moreno, Sabino Riestra, Abelardo Margolles, Lorena Ruiz. Prebiotic potential of apple pomace and pectins from different apple varieties: Modulatory effects on key target commensal microbial populations // Food Hydrocolloid. 2022. V. 133. P. 107958. doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.107958.

Информация об авторах

Л. И. Пусенкова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технологии общественного питания и переработки растительного сырья Башкирского государственного аграрного университета.

А. Д. Заграницная – аспирант Башкирского государственного аграрного университета.

О. Ю. Калужина – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии общественного питания и переработки растительного сырья Башкирского государственного аграрного университета.

REFERENCES

1. Akimov, M.Yu., Makarov, V.N. & Zhanova, E.V. (2019). The role of fruits and berries in providing a person with vital biologically active substances. *Achievements of Science and Technology of AIC*, 33 (2), 56-60. (In Russ.). doi: 10.24411/0235-2451-2019-10214.
2. Kokh, D.A. (2021). Study of the chemical composition of juice from the fruits of small-fruited apple trees growing in the Krasnoyarsk Territory. *Polzunovskiy Vestnik*, (3): 30-34. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.004.

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЯБЛОК СОРТОВ И ГИБРИДОВ СЕЛЕКЦИИ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

3. Melnikova, E.V., Belyakov, A.A., Lisovets, T.A., Sokolova, A.A. (2022). Development of a non-alcoholic drink formulation based on shadberry berries and small-fruited apples. *Vestnik KrasGAU*, 8(185): 187-193. (In Russ.). doi: 10.36718/1819-4036-2022-8-187-193.
4. Gusakova, G.S., Suprun, N.P. & Rachenko, M.A. (2019). Study of the biochemical composition of apple fruits of the Southern Baikal region and wine-making products fermented on wood chips. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 9(31): 722-736. (In Russ.). doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-4-722-736.
5. Eliseeva, S.A., Barsukova, N.V. & Sablina, A.A. (2019). Influence of commodity characteristics of apple varieties on the formation of consumer properties of desserts. 2019(150):113-120. (In Russ.).
6. Shelkovskaya, N.K., Kalinina, I.P., Kots'yba, V.P. & Kamaeva, S.I. (2013). Research of apple varieties of Altai selection for the production of high-quality sparkling wines. *Polzunovskiy Vestnik*, № 4-4., p. 146-150. (In Russ.).
7. Prichko, T.G., Kazakhmedov, R.E. & Droficheva, N.V. (2020). Development of a recipe for polyfunctional jelly from fruit and vegetable raw materials. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Pishchevaya tekhnologiya*, 1(373): 52-56. (In Russ.). doi: 10.26297/0579-3009.2020.1.14.
8. Skorospelova, E.V., Mihailova, M.A. & Shelkovskaya, N.K. (2022). Technological aspects of production of pureed masses without sugar on the basis of fruit and berry raw materials of Altai variety. *Polzunovskiy Vestnik*, № 4-1. P. 100-105. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.012.
9. Calvete-Torre, I., Muñoz-Almagro, N., Pacheco, M.T., Antón M.J., Dapena E., Ruiz L., Margolles A., Villamiel, M. & Moreno, F.J. (2021). Apple pomaces derived from monovarietal Asturian ciders production are potential source of pectins with appealing functional properties. *Carbohydrate Polymers*, (264): 117980. doi: 10.1016/j.carbpol.2021.117980.
10. Ilyina, I.A., Machneva, I.A. & Bakun, E.S. (2019). Technological aspects of obtaining high-quality raw materials for the production of pectin. *Vestnik of the Russian agricultural sciences*, (6): 47-50. (In Russ.). doi: 10.30850/vrsn/2019/6/47-50.
11. Morales-Contreras, B.E., Wicker, L., Rosas-Flores, W., Contreras-Esquivel, J.C., Gallegos-Infante, J.A., Reyes-Jaquez, D. & Morales-Castro, J. Apple pomace from variety "Blanca de Asturias" as sustainable source of pectin: Composition, rheological, and thermal properties. *LWT*, (117): 108641. doi: 10.1016/j.lwt.2019.108641.
12. Makarkina, M.A., Yanchuk, T.V., Pavel, A.R. & Sokolova, S.E. [Biochemical assessment of promising forms of apple and currant]. *Vestnik OrelGAU*. 2015; 6(57): 71-78. Russian. doi: 10.15217/issn1990-3618.2015.6.71.
13. Demina, T.G. & Fazliakhmetov, Kh.N. [Apple breeding in the Republic of Bashkortostan]. *Selekciya i sortorazvedenie sadovyh kul'tur*. 2016: 3(1):32-34. (In Russ.).
14. Methods of biochemical research of plants. (1987). edited by A.I. Ermakov. 3rd ed. : Agropromizdat. Leningrad branch. 430 p. (In Russ.).
15. Program and methodology of variety study of fruit, berry and nut crops (1999). edited by. E.N. Sedova, T.P. Ogoltsova. Orel. VNIISPK. 608 p. Russian.
16. Sedov, E.N. & Makarkina, M.A. (2008). Biochemical composition and mass of fruits in different zones of apple cultivation. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 5(47): 22-25. (In Russ.).
17. Alexandra Buergy, Agnès Rolland-Sabaté, Alexandre Leca & Catherine M.G.C. Renard. Pectin modifications in raw fruits alter texture of plant cell dispersions. (2020). *Food Hydrocolloids*. V. 107. P. 105962. doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105962.
18. Weijie Lan, Catherine M.G.C. Renard, Benoit Jaillais, Alexandre Leca & Sylvie Bureau. (2020). Fresh, freeze-dried or cell wall samples: Which is the most appropriate to determine chemical, structural and rheological variations during apple processing using ATR-FTIR spectroscopy. *Food Chemistry*, V. 330. P. 127357. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127357.
19. Ines Calvete-Torre, Carlos Sabater, María José Antón, F. Javier Moreno, Sabino Riestra, Abelardo Margolles & Lorena Ruiz. (2022). Prebiotic potential of apple pomace and pectins from different apple varieties: Modulatory effects on key target commensal microbial populations. *Food Hydrocolloid*, V. 133. P. 107958. doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.1079.

Information about the authors

L.I. Pusenkova - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Public Nutrition and Processing of Vegetable Raw Materials of the Bashkir State Agrarian University.

A.D. Zarozhnaya - postgraduate student of the Bashkir State Agrarian University.

O.Y. Kaluzhina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology of Public Catering and Vegetable Processing of the Bashkir State Agrarian University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРЯНИКОВ, ОБОГАЩЕННЫХ НЕТРАДИЦИОННЫМ СЫРЬЕМ СЕВЕРНОГО ПРИАЗОВЬЯ

Валентина Федоровна Жукова ¹, Татьяна Викторовна Карман ²,
Марина Николаевна Адонина ³

^{1, 2, 3} 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 marinaadonina558@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-1878-1996>

Аннотация. Разработана инновационная технология производства пряников, обогащенных нетрадиционным сырьем Северного Приазовья. Показано, что реализация этой технологии будет способствовать удовлетворению спроса на мучную кондитерскую продукцию из категории правильного питания. Это особенно важно для укрепления адаптационно-приспособительных резервов организма населения, проживающего на новых территориях в прифронтовой зоне. В результате научно-исследовательской работы обоснован выбор рецептурных компонентов с высоким биопотенциалом, составлена рецептура. Описаны технологические операции и параметры при производстве пряников. Проведен дегустационный анализ качества готовых пряников, который показал гармоничное сочетание органолептических показателей благодаря использованию зернобобового, плодового, пряно-ароматического сырья в составе рецептуры. У контрольных вариантов пряников цвет был кремовый, а у обогащенных образцов он имел привлекательный желто-кремовый оттенок. Предложено для повышения экономической эффективности выбрать замену пшеничной муки нутовой на уровне 25 %. Полученные данные свидетельствуют о том, что внесение нутовой муки придает пряникам особый ореховый привкус. Однако замена пшеничной муки нутовой на 50 % приводит к тому, что ореховый привкус становится более навязчивым. Добавление в рецептуру муки из виноградных косточек (2 %), пюре из калины (5 %), сухих духов и черешневого джема благоприятно отражается на органолептических свойствах готовых изделий. Калиновое пюре украшает вкус и запах пряников ягодным ароматом, это выгодно отличает экспериментальные образцы от традиционного варианта. Введение в рецептуру данного растительного сырья способствует повышению в пряниках содержания биологически активных веществ: витамина С в 2,1 раза, каротиноидов – в 1,25 раза.

Ключевые слова: пряники, технология, нутовая мука, мука из виноградных косточек, калина, сухие духи, черешневый джем.

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., Адонина М. В. Технология производства пряников, обогащенных нетрадиционным сырьем Северного Приазовья // Ползуновский вестник. 2025. № 1. С. 84–91. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.009. EDN: <https://elibrary.ru/UCCBOB>.

Original article

TECHNOLOGY OF PRODUCING GINGERBREAD ENRICHED WITH NON-TRADITIONAL RAW MATERIALS OF THE NORTHERN AZOV REGION

Valentina F. Zhukova ¹, Tatiana V. Karman ², Marina N. Adonina ³

^{1, 2, 3} Melitopol State University, Zaporizhia region, Russia

¹ zhuzhuvf@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1963-659X>

© Жукова В. Ф., Карман Т. В., Адонина М. Н., 2025

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРЯНИКОВ, ОБОГАЩЕННЫХ НЕТРАДИЦИОННЫМ СЫРЬЕМ СЕВЕРНОГО ПРИАЗОВЬЯ

² t.karman@mgu-mlt.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9313-554X>

³ marinaadonina558@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-1878-1996>

Abstract. An innovative technology for the production of gingerbread enriched with non-traditional raw materials of the Northern Azov region has been developed. It is shown that the implementation of this technology will contribute to meeting the demand for flour confectionery products from the category of healthy nutrition. This is especially important for strengthening the adaptive reserves of the body of the population living in new territories in the frontline zone. As a result of the research work, the choice of prescription components with high biopotential was justified, and a formulation was compiled. Technological operations and parameters in the production of gingerbread are described. A tasting analysis of the quality of ready-made gingerbread was carried out, which showed a harmonious combination of organoleptic indicators due to the use of leguminous, fruit, spicy-aromatic raw materials in the formulation. The control variants of gingerbread had a cream color, and in the enriched samples it had an attractive yellow-cream shade. It is proposed to choose a replacement of wheat flour with chickpea flour at the level of 25% to increase economic efficiency. The data obtained indicate that the addition of chickpea flour gives gingerbread a special nutty taste. However, replacing wheat flour with chickpea flour by 50% leads to the fact that the nutty taste becomes more intrusive. The addition of grape seed flour (2%), mashed potatoes (5%), a dry perfume and sweet cherry jam to the recipe has a beneficial effect on the organoleptic properties of finished products. Viburnum puree decorates the taste and smell of gingerbread with a berry aroma, which distinguishes experimental samples from the traditional version. The introduction of this vegetable raw material into the formulation helps to increase the content of biologically active substances in gingerbread: vitamin C by 2.1 times, carotenoids by 1.25 times.

Keywords: gingerbread, technology, chickpea flour, grape seed flour, viburnum, dry perfume, biologically active substances, sweet cherry jam.

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. & Adonina, M. N. (2025). Technology of producing gingerbread enriched with non-traditional raw materials of the Northern Azov Region. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 84-91. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.009. EDN: <https://elibrary.ru/UCCBOB>.

ВВЕДЕНИЕ

Рынок продуктов питания является важным звеном экономической отрасли РФ и для своего устойчивого развития в условиях изменчивости внутренней и внешней среды требует разработки и внедрения инновационных технологий производства [1]. В обстановке импортозамещения возрастает актуальность региональной самообеспеченности как основы продовольственной безопасности и улучшения качества жизни населения [2].

Расширение ассортимента пищевой продукции для выполнения задач Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года должно производиться с учетом принципов здорового питания. Это особенно актуально для категории мучных кондитерских изделий, которые отличаются высокой калорийностью и избытком легкоусвояемых углеводов. Проблемой является то, что современному обществу характерно частое потребление рафинированных продуктов с высокой энергетической ценностью, это нарушает законы рационального питания. Гиподинамия и расстройство пищевого поведения усугубляют данный эффект и повышают риск развития ожирения и других алиментарно-зависимых заболеваний [3, 4].

Кроме того, необходимо учитывать, что мирное население Северного Приазовья проживает в прифронтовой зоне и в результате украинской военной агрессии испытывает на

себе стресс военного времени [5]. Вызванные этим психотравмирующие переживания несут угрозу здоровью и могут стать причиной развития донозологического состояния и патологий. Во избежание истощения адаптационно-приспособительных резервов организма целесообразно насыщать рацион продуктами функционального действия. Эта задача обозначена в Стратегии Правительства Российской Федерации, где приоритетным направлением выбрано обеспечение рационального питания для населения, формирование культуры здорового питания, профилактика неинфекционных болезней.

В отечественной практике данная проблема решается путем разработки технологий производства кондитерских изделий с повышенной пищевой ценностью и улучшенными потребительскими качествами, что отражено в трудах российских ученых: Пономаревой Е.И., Попова В.И., Макаровой Н.В., Потороко И.Ю., Лаптевой Н.К., Гарькиной П.К. [6–10].

Актуальность этого направления обусловлена тем, что набор нутриентов в суточном рационе должен удовлетворять потребностям организма по широкому спектру критериев. При этом должна быть обеспечена экономическая доступность таких продуктов, что на сегодня не всегда выполняется. Себестоимость продукции из категории «правильного питания» выше в сравнении с товарами массового потребления [11]. Это приводит к тому, что среди потреби-

бителей данных продуктов – преимущественно граждане с высоким доходом. Кроме того, большая часть населения страны имеет значительную степень закредитованности, низкие заработок и покупательскую способность, что обуславливает внутреннюю угрозу для выполнения гарантированных стандартов жизнеобеспечения и осуществления продовольственной безопасности РФ [12]. Важно учитывать интересы всех слоев населения, обеспечить соблюдение прав потребителей на покупку необходимых продуктов питания, усилить конкурентные преимущества отечественной пищевой продукции путем увеличения инноваций, что позитивно отразится на росте экономики как на региональном, так и федеральном уровнях.

Географический регион Северное Приазовье располагается на юге Восточно-Европейской равнины и включает в себя часть территории Новороссии: преимущественно Запорожскую область, Херсонскую, а также Донецкую народную республику [13, 14]. Кроме того, к нему относится юго-запад Ростовской области.

Регион расположен в благоприятной для аграрной отрасли природно-климатической зоне, имеет высокий ресурсный потенциал для развития пищевой промышленности. Использование региональными перерабатывающими предприятиями местного сырья для производства инновационных продуктов питания позволит более эффективно выполнять задачи озвученной ранее Стратегии, активнее насыщать отечественными товарами рынок, освободившийся в результате санкций и требующий развития.

Цель научной работы – создать современную технологию производства мучных изделий с улучшенным составом за счет местного нетрадиционного сырья, чтобы удовлетворить спрос на кондитерские изделия из категории правильного питания. Из многообразия ингредиентов для мучных кондитерских изделий предпочтение отдавали зернобобовому, плодовому, пряно-ароматическому сырью Северного Приазовья с высоким биотехнологическим потенциалом [15]. Основной задачей при разработке рецептуры было сохранить привычный вкус традиционных пряничных изделий и при этом обогатить их белком, биологически активными и минеральными соединениями, клетчаткой, поэтому стандартные сырьевые компоненты частично заменили на функциональные альтернативы с биопротекторными свойствами.

Среди поставленных задач для выполнения цели основными были: обосновать выбор продовольственного сырья; составить технологию производства пряников повышенной пищевой ценности; осуществить органолептический анализ качественных показателей пряников.

МЕТОДЫ

Исследования проведены на базе кафедры «Пищевые технологии и сфера услуг» в

ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет» с 2022 по 2024 гг.

Объект исследований – заварной медовый печатный пряник повышенной пищевой ценности. В качестве контроля взяли рецептуру пряника «Вяземский». В исследуемых вариантах проводили замену пшеничной муки на муку из нута 25 % (образец 1), 50 % (образец 2), при этом дополнительно вводили в их состав муку из виноградных косточек в количестве 2 % и пюре из калины 5 % (с массовой долей сухих веществ 12 %).

Для исследований применяли сырье, соответствующее по качественным показателям требованиям действующей нормативной документации: муку пшеничную хлебопекарную (ГОСТ 26574-2017), муку нутовую (ТУ 9293-081-10514645-03), муку из виноградных косточек (ТУ 9146-472-37676459-2016), ягоды калины (ГОСТ 33823-2016), маргарин с пониженной массовой долей жира 60 % (ГОСТ 32189-2013), мед натуральный (ГОСТ 19792-2017), сахар (ГОСТ 33222-2015), меланж (ГОСТ 30363-2013), пряности (ГОСТ 33271-2015, ГОСТ 32883-2014), натрий двууглекислый (ГОСТ 2156-76), соль пищевую (ГОСТ Р 51574-2018), джем черешневый (ГОСТ 31712-2012).

Анализ органолептических показателей качества выполняли по ГОСТ 15810-2014. Пробы отбирали по ГОСТ 5904-2019. Массовую долю влаги определяли по ГОСТ 5900-2014, массовую долю сахара – по ГОСТ 5903-89, уровень витамина С – по ГОСТ 24556-89, концентрацию пигментов – на спектрофотометре с применением для экстрагирования ацетона и измерением оптической плотности в максимумах поглощения каротиноидов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Недостаток рецептурного состава традиционного заварного медового пряника – низкая биологическая и пищевая ценность. Для разработки пряников функциональной направленности значительный интерес представляло местное растительное сырье, содержащее природные физиологически и биологически активные соединения, оказывающие оздоровительный эффект для организма, повышающие его адаптивные способности и стойкость к негативному воздействию внешней среды.

Одной из главных задач кондитерского производства является повышение белковой ценности мучной продукции, решения которой удалось достичь введением в рецептуру высокобелковой добавки – нутовой муки. Уровень белка в ней составляет 20–32 %, это преимущественно глобулины (до 90 %). Высокая биологическая ценность нута обусловлена его аминокислотным составом: лизином, метионином, треонином и триптофаном [16].

Семена винограда являются ценным источником природных антиоксидантов, клетчатки,

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРЯНИКОВ, ОБОГАЩЕННЫХ НЕТРАДИЦИОННЫМ СЫРЬЕМ СЕВЕРНОГО ПРИАЗОВЬЯ

фосфолипидов и минеральных элементов [17], что послужило выбором его в качестве функциональной добавки в составе мучных кондитерских изделий. Во избежание появления в пряниках характерного хруста из-за прочной структуры косточки особенностью технологического процесса было использование порошка мелкого помола с размером частиц не более 50 мкм. Концентрацию муки из виноградной косточки в рецептуре ограничивали 2 % из соображений сохранения привлекательного цвета и структуры пряников.

Калина, произрастающая на Юге РФ, обладает значительным антиоксидантным потенциалом из-за содержащихся в ней полифенолов, токоферолов, аскорбиновой кислоты. Входящие в ее состав пектины имеют лечебно-профилактические, детоксикационные, радиопротекторные, десенсибилизирующие и антимикробные свойства [18]. В связи с наличием в плодах калины специфического навязчивого привкуса, который ей придает гликозид вибурнин, валериановая кислота и ее эфиры, концентрацию калинового пюре в пряничном тесте ограничивали 5 %.

В качестве сухих духов для пряничного теста использовали молотые пряности и травы: имбирь, мускатный орех, кардамон, ванилин, корицу, куркуму, черный перец, мяту. Данное сырье – натуральный комплекс эфирных масел с антиокислительным, антимикробным действием и противо-

воспалительной активностью [19]. Использование пряностей придает кондитерским изделиям специфический вкус и аромат. Во избежание их избыточного действия целесообразно составлять пряные композиции в границах органолептически приемлемых концентраций, что соблюдалось авторами при разработке рецептуры.

На первой стадии научно-исследовательской работы определились с массовыми долями ингредиентов в рецептуре, сбалансировали их соотношение (табл. 1).

Технологическая схема производства пряников состояла из следующих операций. Первоначально сырье проходило стадию подготовки (рис. 1). Затем готовили медово-сахарный сироп, который нагревали до 60–70 °C и соединяли с пшеничной мукой (контрольный вариант) или тремя видами муки (образцы 1, 2). На этой стадии осуществлялась заварка муки в сиропе, в результате чего крахмал клейстеризовался и тесто приобретало необходимую консистенцию. Потом тесто охлаждали и вводили оставшиеся компоненты согласно рецептуре: маргарин, меланж, разрыхлитель и сухие духи. Замес теста выполняли на протяжении 10–12 мин до получения теста с однородной рыхлой структурой и влажностью 20–22 %. При снижении влажности теста готовые изделия отличались слабым подъемом и плотной структурой. При повышенном значении данного показателя изделия расплывались и плохо сохраняли форму.

Таблица 1 – Рецептура опытных образцов пряников

Table 1 – Formulation of experimental gingerbread samples

Наименование сырья	Массовая доля сухих веществ, %	Расход сырья на 1 т готовой продукции, кг					
		Контроль		Образец 1		Образец 2	
		в натуре	в сухих веществах	в натуре	в сухих веществах	в натуре	в сухих веществах
Пшеничная мука высшего сорта	85,5	397,3	339,7	292,1	249,8	194,8	166,5
Мука нутовая	85,5	0,0	0,0	97,4	83,3	194,8	166,5
Мука из виноградных косточек	89,6	0,0	0,0	7,8	6,9	7,8	6,9
Пюре из калины	12,0	0,0	0,0	19,5	2,3	19,5	2,3
Маргарин сливочный с массовой долей жира 60 %	60,0	119,2	71,5	116,8	70,1	116,8	70,1
Сахар-песок	99,8	198,6	198,2	194,7	194,4	194,7	194,4
Мед натуральный	78,5	119,2	93,6	116,8	91,7	116,8	91,7
Меланж	27,0	63,6	17,2	62,3	16,8	62,3	16,8
Соль пищевая	99,8	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1
Натрий двууглекислый	50,0	6,3	3,2	6,2	3,1	6,2	3,1
Ванилин	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
Сухие духи	91,3	0,0	0,0	8,6	7,6	8,6	7,6
Начинка черешневая	68,0	198,6	135,1	194,7	132,4	194,7	132,4
Итого		1129,9	861,5	1143,7	861,5	1143,6	861,5
Выход	84,0	1000,0	840,0	1000,0	840,0	1000,0	840,0

Следующей технологической операцией было формование теста, ее цель – придать прянику необходимую форму и рисунок на поверхности.

При производстве пряничных изделий с начинкой типа «Вяземские» использовали технологию формования деревянными формами с выгравированным рисунком. Такие пряники относятся к категории печатных.

Для этого тесто раскатывали до толщины $5,5 \pm 0,5$ мм в соответствии с диаметром трафарета. Далее пласт плотно вкладывали на гравированную часть формы, равномерно по поверхности наносили начинку из густого черешневого джема, отступая от краев. Потом накрывали другой половиной пластика, склеивали края изделия, прокатывая скалкой для уплотнения.

Далее отштампованные заготовки извлекали из трафарета, размещали на листах и выпекали в конвекционном духовом шкафу. Корректировка технологического процесса заключалась в применении двухэтапного температурного режима, обусловленного необходимостью закрепления рисунка на поверхности. С этой целью выпечку проводили в 2 этапа: при 250°C в течение 3 мин, затем при $170-180^{\circ}\text{C}$ в течение 18–22 мин.

Затем пряники охлаждали до $40-45^{\circ}\text{C}$ и выполняли их отделку тиражированием сахарным сиропом (содержание сухих веществ $77,5 \pm 0,5\%$) вручную. При этом изделия приобретали привлекательный глянцевый вид с мраморным слоем выкристаллизовавшегося сахара, который улучшал их вкус, предотвращал чрезмерную усушку и способствовал со-

хранению свежести. После этого пряникам требовалась подсушка и выстойка 2–4 часа. Хранили пряники в сухом помещении при 18°C и относительной влажности воздуха 72–74 % на протяжении 30 суток.

Результаты органолептической оценки готовых пряников представлены в таблице 2. Все экспериментальные варианты демонстрируют соответствие качества требованиям ГОСТ 15810-2014. Все изделия имеют вкус и запах, присущий рецептурным компонентам. Однако для образцов 1 и 2 характерен более выраженный вкус и запах за счет введенных функциональных добавок.

Так, внесение нутовой муки в обоих вариантах придало пряникам приятный ореховый вкус. Но при замене пшеничной муки нутовой на 50 % ореховый привкус был более навязчивым, что некоторыми дегустаторами, которые привыкли к традиционному вкусу пряников, воспринималось приторным.

К тому же добавление в рецептуру нутовой муки в соотношении с пшеничной 1:1 приводило к удорожанию продукта, что для большей части потребителей станет ограничением при выборе мучных кондитерских изделий.

Добавление в экспериментальные образцы 1 и 2 муки из виноградных косточек в количестве 2 % с тонкодисперсным помолом не более 50 мкм позволило обеспечить однородность цвета и не получить темного оттенка готовых изделий. При этом в процессе дегустации не ощущалось своеобразного хруста, характерного для порошка из косточки при более крупном помоле.

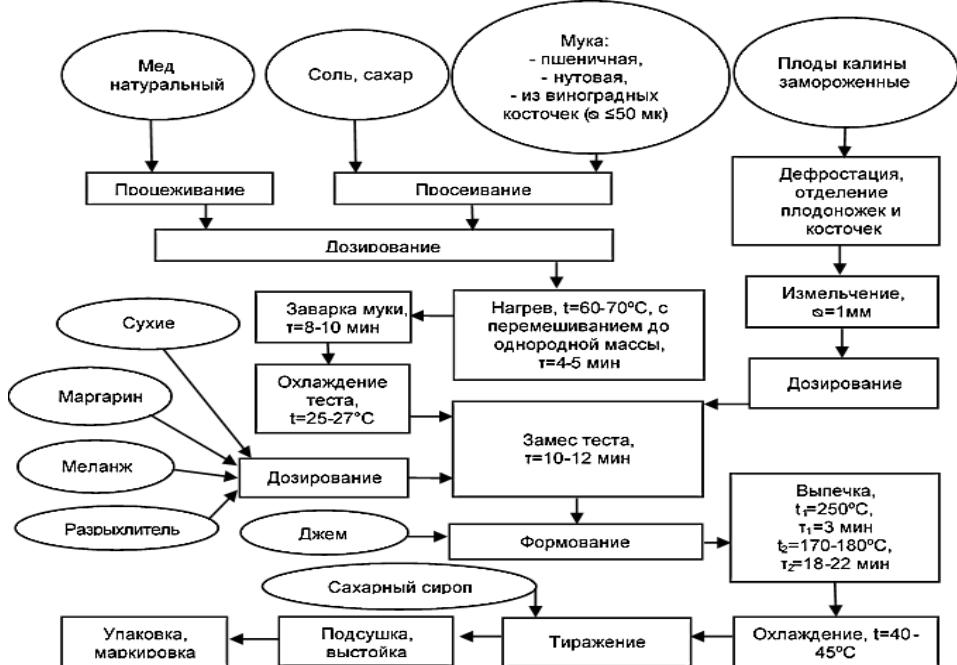


Рисунок 1 – Технологическая схема производства пряников

Figure 1 – Technological scheme of gingerbread production

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРЯНИКОВ, ОБОГАЩЕННЫХ НЕТРАДИЦИОННЫМ СЫРЬЕМ СЕВЕРНОГО ПРИАЗОВЬЯ

Таблица 2 – Органолептические и физико-химические показатели пряников

Table 2 – Organoleptic and physico-chemical parameters of gingerbread

Показатели	Характеристика/значение показателя		
	Контроль	Образец 1	Образец 2
Вкус и запах	Выраженные, характерные рецептурным ингредиентам, без посторонних оттенков	Приятно выраженные, характерные рецептурным ингредиентам. Легкий привкус пряностей, калины и жареных орехов от нута, без посторонних оттенков	Ярко выраженные, характерные рецептурным ингредиентам. Приятно выраженный привкус жареных орехов от нута, легкий привкус калины, пряностей, без посторонних оттенков
Структура	Мягкая, связанная, не рассыпается		
Цвет	Кремовый	Желто-кремовый	
Вид в изломе	Пропеченный, с равномерной достаточной пористостью, без пустот, закала		
Поверхность	Без крупных трещин, вздутий, впадин, наплыков. После тиражирования – гладкая, глянцево-мраморная, сухая. Отиск печатного изображения – четкий		
Форма	Правильная, нерасплывчатая		
Массовая доля влаги, %	15,7	15,8	15,9
Массовая доля общего сахара (по сахарое), %	40,2	38,5	37,4
Витамин С, мг/100 г	3,65	7,81	7,80
Каротиноиды, мг/100 г	0,08	0,10	0,10

Внешний вид пряничных изделий показан на рис. 2. Фотографии изделий сделаны сразу после стадии выпечки, поскольку после этапа

тиражирования различия внешнего вида и цвета каждого варианта будут менее заметны.



Рисунок 2 – Внешний вид пряников после стадии выпечки:
а – контроль; б – образец 1; в – образец 2; г – в разрезе

Figure 2 – Appearance of gingerbread after the baking stage: a – control, b – sample 1, c – sample 2, d – in section

Внесение калинового пюре позволило обогатить вкус и запах пряников ягодным ароматом, что выгодно отличало экспериментальные образцы от традиционных вариантов пряничных изделий.

Наибольшее влияние на вкусоароматику готовых пряничных изделий оказало обогащение состава экспериментальных образцов 1 и 2 сухими духами. Аналитическая оценка вкусовой сочетаемости пряно-ароматических добавок показала их благоприятное воздействие на потребительские свойства пряников в целом.

Массовая доля влаги в опытных вариантах увеличивалась с добавлением нутовой муки и муки из виноградных косточек на 0,06–0,16 %, что обусловлено повышенной влагоудерживающей способностью этих компонентов. Массовая доля

сахара снижалась на 2,8–1,7 %. Введение в состав пряников калины, муки из виноградных косточек и сухих духов способствовало повышению уровня витамина С в 2,1 раза в сравнении с контролем, а содержание каротиноидов выросло в 1,25 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование нетрадиционного растительного сырья Северного Приазовья в составе рецептуры пряников позволяет улучшить их органолептические свойства. В результате исследований обоснован выбор рецептурных ингредиентов, разработана технология производства пряников с функциональными ингредиентами. Проведен дегустационный анализ качества готовых пряников, который показал благоприятное сочетание орга-

нолептических показателей. Для обеспечения экономической эффективности использования местного сырья целесообразно проводить замену пшеничной муки на нутовую в количестве 25 %. Добавление в рецептуру муки из виноградных косточек (2 %), пюре из калины (5 %), сухих духов и черешневого джема благоприятно отражается на органолептических свойствах готовых изделий и способствует повышению содержания в них биологически активных веществ: витамина С – в 2,1 раза, каротиноидов – в 1,25 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев А.А. Состояние и перспективы инновационного развития пищевой промышленности России // Вестник Академии знаний. 2022. № 6 (53). С. 194–198.
2. Митрофанова И.В., Антамошкина Е.Н., Луценко Я.В. Экономические индикаторы обеспеченности продовольствием в Южном макрорегионе // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2017. Т. 7. № 5. С. 325–339.
3. Ожирение в России: современный взгляд под углом социальных проблем / Лескова И.В. [и др.] // Ожирение и метаболизм. 2019. № 16(1). С. 20–26. <https://doi.org/10.14341/omet9988>.
4. Мастерова С.Н. Экономический аспект важности сбалансированного питания: снижение нагрузки на здравоохранение // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2024. Т. 14. № 2. С. 275–286. <https://doi.org/10.21869/2223-1552-2024-14-2-275-286>.
5. Анализ и систематизация процесса социальной адаптации людей, пострадавших от хронического стресса военного времени / Сальников И.С. [и др.] // Телескоп: журнал социологических и маркетинговых исследований. 2024. № 2. С. 6–12. DOI: 10.24412/1994-3776-2024-2-6-12 УДК: 616.8-008.615.89.
6. Пряничные изделия повышенной пищевой ценности с нетрадиционными видами сырья / Пономарева Е.И. [и др.] // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 5. С. 75–81. DOI:10.24411/0042-8833-2017-00079.
7. Гуляева А.Н., Воронина М.С., Макарова Н.В. Разработка методологии повышения пищевой ценности полуфабрикатов для мучных кондитерских изделий // Инновации и продовольственная безопасность. 2020. № 3(29). С. 7–13. DOI: 10.31677/2311-0651-2020-29-3-7-13.
8. Потороко И.Ю., Паймулина А.В., Ускова Д.Г. Разработка технологии хлеба с лечебно-профилактическими свойствами на основе применения комплексной растительной добавки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия : Пищевые и биотехнологии. 2016. Т. 4. № 3. С. 39–46.
9. Лаптева Н.К., Митъкиных Л.В. Мучные кондитерские изделия повышенной пищевой ценности // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017. № 5 (60). С. 16–20.
10. Гарькина П.К., Горбачева О.Н. Тенденции в снижении энергетической ценности мучных кондитерских изделий // Инновационная техника и технология. 2020. № 2 (23). С. 5–10.
11. Казанцева С.Ю. Особенности торговли продуктами для здорового питания // Российское предпринимательство. 2018. Т. 19. № 11. С. 3371–3380. doi: 10.18334/gr.19.11.39622.
12. Шушарин В.Ф., Вышенский М.Ю. Продовольственная безопасность России: направления обеспечения // Вестник Прикамского социального института. 2020. № 1 (85). С. 115–122.
13. Сущий С.Я. Северное Причерноморье – Приазовье: демографо-экономический потенциал и перспективы хозяйственного развития новых регионов России // Регионология. 2024. Т. 32, № 2. С. 345–367. <https://doi.org/10.15507/2413-1407.127.032.202402.345-367>.
14. Конищев А.Н., Жукова В.Ф. Анализ особенностей административно-правового регулирования индустрии гостеприимства на новых территориях РФ // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Экономика и управление. 2023. Т. 9 (75). № 4. С. 61–68.
15. Карман Т.В. Плодово-ягодное сырье Приазовского региона как ценный источник ингредиентов функциональной направленности // Технологии техно-, биосферной и пищевой безопасности: материалы VI Международной научно-практической конференции. Ижевск : Удмуртский государственный университет. 2023. С. 37–40.
16. Павленко В.Н. К вопросу о переработке нута в муку // Научно-агрономический журнал. 2014. № 2(95). С. 12–13.
17. Смольянова А.П., Волошина М.О. Совершенствование технологии булочных изделий с использованием муки виноградной косточки // Инновационная техника и технология. 2019. № 4 (21). С. 12–17.
18. Причко Т.Г., Дрофичева Н.В. Плоды редких культур как источники антиоксидантов для разработки функциональных продуктов питания [Электронный ресурс] // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2023. № 83(5). С. 151–163. DOI: 10.30679/2219-5335-2023-5-83-151-163.
19. Базарнова Ю.Г. Фитоэкстракти – природные ингибиторы порчи пищевых продуктов (обзор) // Процессы и аппараты пищевых производств. 2010. № 2. С. 32–42.

Информация об авторах

В. Ф. Жукова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Пищевые технологии и сфера услуг» Мелитопольского государственного университета.

Т. В. Карман – кандидат экономических наук, доцент, заведующая кафедрой «Пищевые технологии и сфера услуг» Мелитопольского государственного университета.

М. Н. Адонина – ассистент кафедры «Пищевые технологии и сфера услуг» Мелитопольского государственного университета.

REFERENCES

1. Nikolaev, A.A. (2022). The state and prospects of innovative development of the Russian food industry. *Bulletin of the Academy of Knowledge*, (6 (53)), 194-198. (In Russ.).
2. Mitrofanova, I.V., Antamoshkina, E.N., Lucenko, Ja.V. (2017). Economic indicators of food provision in the Southern macro-region. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*, (7(5)), 325-339. (In Russ.).
3. Leskova, I.V., Ershova, E.V., Nikitina, E.A., Krasnikovskij, V.Ja., Ershova, Ju.A., Adamskaja, L.V. (2019). Obesity in Russia: modern view in the light of a social problems. *Obesity and metabolism*, (16(1)), 20-26. (In Russ.). doi: 10.14341/omet9988.
4. Masterova, S.N. (2024). The Economic Aspect of the Importance of a Balanced Diet: Reducing the Burden On Healthcare. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics, Sociology and Management*, ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2025

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРЯНИКОВ, ОБОГАЩЕННЫХ НЕТРАДИЦИОННЫМ СЫРЬЕМ СЕВЕРНОГО ПРИАЗОВЬЯ

- (14(2)), 275–286. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1552-2024-14-2-275-286>.
5. Sal'nikov, I.S., Izosimova, S.A., Piguz, V.N., Ivashko, K.S. (2024). Analysis and systematization of the process of social adaptation of people affected by chronic wartime stress. *Telescope: Journal of sociological and marketing research*, (2), 6-12. (In Russ.). DOI: 10.24412/1994-3776-2024-2-6-12.
6. Ponomareva, E.I., Popov, V.I., Esaulenko, I.Je., Lukina, S.I. & Alehina, N.N. (2017). Gingerbreads of enhanced nutritional value with the non-traditional raw materials. *Problems of Nutrition*, (86(5)), 75-81. (in Russ.). DOI: 10.24411/0042-8833-2017-00079.
7. Guljaeva, A.N., Voronina, M.S. & Makarova, N.V. (2020). Development of a methodology for increasing the nutritional value of semi-finished products for flour confectionery products. *Innovations and food safety*, (3(29)), 7-13. (in Russ.). DOI: 10.31677/2311-0651-2020-29-3-7-13.
8. Potoroko, I.Ju., Pajmulina, A.V. & Uskova, D.G. (2016). Development of bread technology with therapeutic and prophylactic properties based on the use of a complex herbal supplement // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, (4(3)), 39-46. (in Russ.).
9. Lapteva, N.K. & Mit'kinyh, L.V. (2017). Flour confectionery products of increased nutritional value. *Agricultural science of the Euro-North-East*, (5(60)), 16-20. (In Russ.).
10. Gar'kina, P.K. & Gorbacheva, O.N. (2020). Tendencies to reduce the energy value of flour confectionery goods. *Innovative Machinery and Technology*, (2(23)), 5-10. (In Russ.).
11. Kazanceva, S.Ju. (2018). Features of healthy food products trade. *Russian entrepreneurship*, (19(11)), 3371-3380. (In Russ.). doi: 10.18334/rp.19.11.39622.
12. Shusharin, V.F. & Vyshenskij, M.Ju. (2020). Food security of Russia: Directions of provision. *Bulletin of Prikamsky Social Institute*, (1(85)), 115-122. (In Russ.).
13. Sushhij, S.Ja. (2024). Northern Black - Azov Sea Region: Demographic and Economic Potential and Prospects of Economic Development of New Regions of Russia. *Russian Journal of Regional Studies*, (32(2)), 345-367. (In Russ.). <https://doi.org/10.15507/2413-1407.127.032.202402.345-367>.
14. Konishhev, A.N. & Zhukova, V.F. (2023). Analysis of the features of administrative and legal regulation of the hospitality industry in the new territories of the Russian Federation. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Economics and management*. (9(4)). 61-68. (In Russ.).
15. Karman, T.V. (2023). Fruit and vegetable raw materials of the Azov region as a valuable source of functional ingredients. *Technologies of techno-, biosphere and food safety: materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. Izhevsk : Udmurt State University, 37-40. (In Russ.).
16. Pavlenko, V.N. (2014). On the issue of processing chickpeas into flour. *Scientific and agronomic Journal*, (2(95)), 12-13. (In Russ.).
17. Smol'janova, A.P. & Voloshina, M.O. (2019). Improving the technology of bakery products using grape seed flour. *Innovative Machinery and Technology*, (4(21)), 12-17. (In Russ.).
18. Prichko, T.G. & Droficheva, N.V. (2023). Fruits of rare crops as a source of antioxidants for the development of functional foods. *Fruit growing and viticulture in the South of Russia*. (83(5)), 151-163. DOI: 10.30679/2219-5335-2023-5-83-151-163.
19. Bazarnova, Ju.G. (2010). Phytoextracts - natural inhibitors of food spoilage (review). *Processes and apparatuses of food production*, (2), 32-42.

Information about the authors

V.F. Zhukova - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technologies and Services of Melitopol State University.

T.V. Karman - Candidate of Economics, Associate Professor, Head of the Department of Food Technologies and Services of Melitopol State University.

M.N. Adonina - Assistant of the Department of Food Technologies and Services of Melitopol State University university.

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

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



ПРИМЕНЕНИЕ ПРОПИОНОВОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОБЛЕПИХОВОГО НАПИТКА

**Кристина Евгеньевна Шевченко¹, Роман Викторович Дорофеев²,
Юлия Михайловна Трубицына³, Екатерина Антоновна Кашлакова⁴**

^{1, 2, 3, 4} ФГБНУ «Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий», Барнаул, Россия

¹ kristina.shevchenko.95@list.ru, <https://orcid.org/0009-0002-5963-7447>

² romandorof@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1627-0454>

³ juliayatrubicina76@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4723-7711>

⁴ kashlakovay@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7007-3133>

Аннотация. Объектом исследования являются пробиотические микроорганизмы из «Сибирской коллекции микроорганизмов»: пропионовокислые бактерии, молочная сыворотка, сироп из облепихи. Цель работы – разработка облепихового напитка с пробиотиками. В работе использованы общепринятые методы микробиологического и биохимического анализа. При разработке облепихового напитка использовали многоштаммовую культуру пропионовокислых бактерий *Propionibacterium freudenreichii* spp (три штамма), молочную сыворотку, сироп из облепихи с концентрацией сахара 20 %. Для накопления биомассы пропионовокислых бактерий использовали питательную среду, содержащую подсырную сыворотку после культивирования молочнокислых бактерий. Для приготовления напитка была использована отфильтрованная от белка подсырная сыворотка. Подобран компонентный состав облепихового напитка: подсырная сыворотка – 73 %, сироп из облепихи – 17 % и культура пропионовокислых бактерий – 10 %.

Исследована выживаемость пропионовокислых бактерий в процессе хранения в облепиховом напитке. Пропионовокислые бактерии показали хорошие результаты по выживаемости в течение 30 суток хранения облепихового напитка при температуре 8–10 °C. Численность пропионовокислых бактерий в конце хранения находилась на уровне – $2,8 \times 10^8$ КОЕ/см³.

Была разработана технология получения облепихового напитка с пробиотической микрофлорой *Propionibacterium freudenreichii* spp (три штамма).

Ключевые слова: Молочная сыворотка, облепиховый сироп, пропионовокислые бактерии, физиолого-биохимические свойства, витамин В₁₂, органолептические показатели.

Для цитирования: Шевченко К. Е., Дорофеев Р. В., Трубицына Ю. М., Кашлакова Е. А. Применение пропионовокислых бактерий при разработке облепихового напитка // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 92–96. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.010. EDN: <https://elibrary.ru/UHXTRX>.

Original article

USE OF PROPIONIC ACID BACTERIA IN DEVELOPMENT OF SEA BUCKTHORN DRINK

**Kristina E. Shevchenko¹, Roman V. Doroфеев², Julia M. Trubitsyna³,
Ekaterina A. Kashlakova⁴**

^{1, 2, 3, 4} Federal State Budgetary Budgetary Institution "Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnology", Barnaul, Russia

¹ kristina.shevchenko.95@list.ru, <https://orcid.org/0009-0002-5963-7447>

² romandorof@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1627-0454>

³ juliayatrubicina76@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4723-7711>

⁴ kashlakovay@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7007-3133>

Abstract. The object of the study is probiotic microorganisms from the "Siberian collection of microorganisms": propionic acid bacteria, whey, sea buckthorn syrup. The purpose of the work is to develop a sea buck-

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОПИОНОВОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОБЛЕПИХОВОГО НАПИТКА

*thorn drink with probiotics. The work uses generally accepted methods of microbiological and biochemical analysis. In the development of sea buckthorn drink, a multistain culture of propionic acid bacteria *Propionibacterium freudenreichii* spp (three strains), whey, sea buckthorn syrup with a sugar concentration of 20 % was used. To accumulate the biomass of propionic acid bacteria, a nutrient medium containing subsurface serum was used after cultivation of lactic acid bacteria. For the preparation of the drink, a whey powder filtered from the protein was used. The component composition of the sea buckthorn drink was selected: powdered whey - 73 %, sea buckthorn syrup - 17 % and culture of propionic acid bacteria - 10 %. The survival rate of propionic acid bacteria during storage in sea buckthorn drink has been studied. Propionic acid bacteria showed good survival results during 30 days of storage of sea buckthorn drink at a temperature of 8-10 °C. The number of propionic acid bacteria at the end of storage was at the level of $2,8 \times 10^8$ CFU/cm³.*

*A technology for producing sea buckthorn drink with probiotic microflora *Propionibacterium freudenreichii* spp (three strains) has been developed.*

Keywords: Whey, sea buckthorn syrup, propionic acid bacteria, physiological and biochemical properties, vitamin B12, organoleptic parameters.

For citation: Shevchenko, K. E., Dorofeev, R. V., Trubitsyna, J. M. & Kashlakova, E. A. (2025). The use of propionic acid bacteria in the development of sea buckthorn drink. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 92-96. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.010. EDN: <https://elibrary.ru/UHXTPX>.

ВВЕДЕНИЕ

Здоровье человека в значительной степени зависит от питания, которое должно быть биологически полноценным и сбалансированным. Продукты питания – важный источник поступления в организм человека белков, жиров, углеводов, макро- и микроэлементов, витаминов и других биологически активных веществ [1].

Важное место в питании человека занимают функциональные молочные продукты: сыры твердые, полутвердые, сыры мягкие, творог, сметана, кисломолочные напитки, а также продукты, включающие пробиотические микроорганизмы, употребление которых оказывает позитивное влияние на организм человека и улучшает его физическое и физиологическое состояние.

В России большое внимание уделяется исследованиям, направленным на расширение ассортимента новых функциональных продуктов, одним из которых является разработка технологии напитков на основе молочной сыворотки. Сыворотка – это побочный продукт производства сыра, творога и казеина. Молочная сыворотка является источником многих ценных веществ: белков, углеводов, жиров. Белки, содержащиеся в молочной сыворотке, по своему составу относятся к наиболее ценным белкам животного происхождения, являясь источником многих незаменимых аминокислот: аргинина, гистидина, метионина, лизина, треонина, триптофана и лейцина. Сывороточные белки принимают участие в структурном обмене человеческого организма для регенерации белков печени, образования гемоглобина и плазмы крови [2, 3].

Состав углеводов молочной сыворотки аналогичен углеводному составу молока. Основное количество сухих веществ молочной сыворотки составляет лактоза (около 70 %). На долю других компонентов (несахаров) приходится 30 %. Лактоза представляет собой уникальный вид сахара, который в природе больше нигде не встречается. Сыворотка содержит более 30 макро- и микроэлементов [4].

В молочной сыворотке содержится 0,05–0,5 % жира. Молочный жир в сыворотке диспергирован больше, чем в цельном молоке, что положительно влияет на его усвоемость организмом человека. Сыворотка содержит практически все соли и микроэлементы молока, в целом она является продуктом с естественным набором жизненно важных минеральных соединений [3].

Сыворотка нашла свое место в биотехнологии производства сывороточных напитков, при употреблении которых она положительно повлияет на функции человеческого организма. Для расширения ассортимента продуктов питания функциональной направленности для широкого круга населения в состав сывороточных напитков включают пробиотические микроорганизмы. Введение пробиотической микрофлоры в состав напитка делает его ещё более ценным продуктом питания. Пропионовокислые бактерии (ПКБ) занимают одно из ведущих мест среди полезных микроорганизмов, они широко используются при производстве ферментированных молочных продуктов [5].

Согласно «Определителя Берджи», пропионовокислые бактерии объединены в род *Propionibacterium*, который входит в состав семейства *Propionibacteriaceae*. Пропионовокислые бактерии можно отнести к уникальным микроорганизмам, заключается в особенностях их метаболической активности и биохимических свойствах. ПКБ сохраняют свою жизнеспособность в аэробных условиях, благодаря образованию ими супероксиддисмутазы (СОД) и каталазы. Данные ферменты необходимы для детоксикации кислорода воздуха.

В соответствии с ГОСТ 32923-2014 «Продукты кисломолочные, обогащенные пробиотическими микроорганизмами», пропионовокислые бактерии относятся к пробиотическим микроорганизмам. Продукты ферментации пропионовокислых бактерий содержат в больших количествах пропионовую, уксусную кислоту и

углекислый газ. Кроме того, пропионовокислые бактерии являются продуцентом витамина B_{12} , который играет важную роль в организме человека, укрепляет иммунитет. Коллекционные штаммы пропионовокислых бактерий продуцируют витамин B_{12} в количестве 1,0–2,4 мкг/см³. Из литературных источников известно, что выход витамина B_{12} у пропионовокислых бактерий можно увеличить за счет оптимизации питательных сред до 20,0 мкг/см³ [6, 7].

По литературным данным, пропионовокислые бактерии обладают антимутагенным действием. Поэтому пропионовокислые бактерии противостоят действию кислорода воздуха, поступающего в бактериальную клетку, а антимутагены повышают активность ферментных систем, которые принимают участие в детоксикации, поступающих в клетку веществ, и эти процессы приводят к снижению мутаций [8].

Таким образом, в молочной промышленности использование пробиотической культуры пропионовокислых бактерий проводится с целью обогащения кисломолочных продуктов метаболитами пропионовокислых бактерий и повышения биологической ценности продукта. Поэтому введение пропионовокислых бактерий в сывороточный напиток будет благотворно влиять на качественные показатели продукта.

Для расширения линейки функциональных продуктов и улучшения вкусовых характеристик вводят ягодные наполнители. Одним из таких наполнителей является сок облепихи. Ягоды облепихи по своим биологическим свойствам уникальны, в них содержатся почти две сотни биологически активных компонентов, мононенасыщенные жирные кислоты, витамины группы В, РР, Е, Н, С. Помимо витаминов, облепиха богата микроэлементами: натрием, калием, кальцием, магнием и фосфором, они необходимы для создания новых клеток и поддержания организма человека в здоровом состоянии. Сок и ягоды облепихи – лучшее средство от многих болезней, особенно инфекционных. Помимо минеральных веществ, в плодах облепихи содержатся пектины, дубильные и белковые вещества, фитонциды, органические кислоты и т.д. Фитонциды, в свою очередь, являются природными антибиотиками, которые способны повысить ослабленный иммунитет [9, 10]. В настоящее время пищевая и лечебно-профилактическая ценность этой культуры неоспоримы. Она занимает важное место в системе сохранения и улучшения здоровья населения в стрессовых условиях природной среды.

В связи с вышеизложенным, разработка напитка на основе молочной сыворотки с включением культуры пропионовокислых бактерий и облепихового сиропа даёт возможность расширить ассортимент продуктов функциональной направленности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Место проведения исследований – лаборатория микробиологии молока и молочных продуктов, отдела СибНИИС ФГБНУ ФАНЦА

При разработке облепихового напитка использовали многоштаммовую культуру пропионовокислых бактерий *Propionibacterium freudenreichii* spp (три штамма) из Сибирской коллекции микроорганизмов (СКМ), молочную (подсырную) сыворотку, сироп из облепихи с концентрацией сахара 20 %.

Получение многоштаммовой культуры пропионовокислых бактерий

Для накопления биомассы пропионовокислых бактерий использовали питательную среду, содержащую подсырную сыворотку после культивирования молочнокислых бактерий, продукты метаболизма которых являются хорошим ростовым фактором для развития пропионовокислых бактерий. Пропионовокислые бактерии культивировали при температуре 30 °С в течение 3 суток.

Приготовление молочной (подсырной) сыворотки

Для приготовления напитка была использована отфильтрованная от белка сладкая подсырная сыворотка с кислотностью 13–14 °Т. Сыворотку пастеризовали при температуре (95±2) °С, охлаждали до температуры (30±2) °С.

Приготовление облепихового сиропа

Облепиховый сок получили из ягод облепихи, собранной на территории Алтайского края, к соку добавили 20 % сахара и пастеризовали при температуре (95±2) °С в течение 10 минут, охлаждали до температуры (30±2) °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования была проведена работа по изучению влияния посевной дозы ПКБ от 0,1 до 2,5 % в питательную среду для накопления биомассы пропионовокислых бактерий.

Пропионовокислые бактерии на питательной среде в дозе инокуляма 0,1 и 0,5 % через трое суток дали урожай бактериальных клеток $1,9 \times 10^9$ и $2,2 \times 10^9$ КОЕ/см³ соответственно. Увеличение дозы внесения пропионовокислых бактерий до 1,0 %, 1,5 %, 2,0 % и 2,5 % позволило получить через двое суток количество бактериальных клеток от $2,3 \times 10^9$ до $3,0 \times 10^9$ КОЕ/см³. Через трое суток культивирования наибольшая численность пропионовокислых бактерий $3,2 \times 10^9$ КОЕ/см³ отмечена при дозе инокуляма 2 %, которая и была определена оптимальной дозой при культивировании в течение 72-х часов для накопления биомассы ПКБ на питательной среде. При повышении дозы внесения ПКБ до 2,5 % не отмечено повышения урожая бактериальных клеток через трое суток по сравнению с 2 % инокулям, количество бактерий составило $2,4 \times 10^9$ КОЕ/см³. Количество

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОПИОНОВОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОБЛЕПИХОВОГО НАПИТКА

бактериальных клеток на четвертые сутки при различных дозах внесения инокулюма составило от $2,2 \times 10^9$ до $3,1 \times 10^9$ КОЕ/см³, на пятые сутки – от $2,0 \times 10^9$ до $2,7 \times 10^9$ КОЕ/см³.

При различных дозах внесения инокулюма ПКБ лучший показатель по накоплению биомассы бактериальных клеток достигнут через трое суток культивирования при посевной дозе 2 %, количество бактериальных клеток ПКБ – $3,2 \times 10^9$ КОЕ/см³.

Таблица 1 – Количество пропионовокислых бактерий и активная кислотность в напитке в процессе хранения

Table 1 – The amount of propionic acid bacteria and active acidity in the drink during storage

Готовый облепиховый напиток	Время хранения, сутки							
	1		10		20		30	
	Количество ПКБ КОЕ/см ³	Активная кислотность, ед.рН	Количество ПКБ, КОЕ/см ³	Активная кислотность, ед.рН	Количество ПКБ, КОЕ/см ³	Активная кислотность, ед.рН	Количество ПКБ, КОЕ/см ³	Активная кислотность, ед.рН
	$4,0 \times 10^8$	3,92	$3,3 \times 10^8$	3,94	$3,0 \times 10^8$	3,96	$2,8 \times 10^8$	3,97

Количество пропионовокислых бактерий в облепиховом напитке после 1, 10, 20 и 30 суток хранения представлены в таблице 1.

Исследования показали, что облепиховый напиток является благоприятной средой для сохранения жизнедеятельности пропионовокислых бактерий. Это было установлено в процессе хранения напитка в течение 30 суток. Через 10, 20 и 30 суток хранения облепихового напитка численность бактериальных клеток пропионовокислых бактерий составила на уровне $3,3 \times 10^8$ КОЕ/см³, $3,0 \times 10^8$ КОЕ/см³ и $2,8 \times 10^8$ КОЕ/см³ соответственно.

На выживаемость пропионовокислых бактерий в процессе хранения не повлияла кислотность напитка, которая была в пределах 3,92–3,97 ед. рН. Вероятно, что пропионовокислые бактерии хорошо себя чувствуют в облепиховом напитке за счет того, что в нем содержится много биологически активных веществ, которые положительно повлияли на данную группу микроорганизмов. Можно сказать, что сами пропионовокислые бактерии продуцируют антиокислительную защиту: супероксиддисмутазу (СОД), каталазу и другие метаболиты.

Проведена дегустация облепихового напитка. В результате было установлено, что напиток имел приятный вкус и запах облепихи и сыворотки. В этом напитке чувствовалась пряность за счет присутствия пропионовокислых бактерий. Присутствие этих компонентов не повлияло на органолептические показатели напитка по истечении 30 суток хранения.

ВЫВОДЫ

1. Разработан облепиховый напиток, включающий пробиотическую микрофлору пропионовокислые бактерии.

2. По результатам исследований установ-

По результатам проведенных исследований в состав облепихового напитка вошли подсырная сыворотка – 73 %, сироп из облепихи – 17 % и многоштаммовая культура пропионовокислых бактерий – 10 %.

В облепиховом напитке в процессе хранения в течение 30 суток при температуре (8±2) °C определяли выживаемость бактериальных клеток пропионовокислых бактерий, а также изменение активной кислотности (ед.рН) продукта.

Table 1 – The amount of propionic acid bacteria and active acidity in the drink during storage

лено, что при различных дозах внесения инокулюма ПКБ лучший показатель по накоплению биомассы бактериальных клеток ($3,2 \times 10^9$ КОЕ/см³) достигнут через трое суток культивирования при посевной дозе 2 %.

3. Установлено, что пропионовокислые бактерии в облепиховом напитке сохраняют жизнеспособность по истечении 30 суток хранения. Вероятно, это связано с тем, что облепиха содержит биологически активные вещества, которые оказывают положительное влияние на сохранность этих бактерий.

4. Исследование по использованию пропионовокислых бактерий проводилось с целью обогащения кисломолочных продуктов метаболитами пробиотической культуры (пропионовая, уксусная кислота, витамин В₁₂) и повышение биологической ценности продукта.

5. Проведенные исследования дают возможность расширить ассортимент функциональных продуктов питания с включением таких полезных пробиотических микроорганизмов, как пропионовокислые бактерии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев О., Медведева З. Здоровое питание современные научные рекомендации по здоровому питанию и их влияние на пищевую промышленность. СФЕРА: Масложировая индустрия. Масла и жиры. 2017. № 2 (3). С. 38–41.

2. Мусина О.Н. Новые молочные продукты для здорового питания // Переработка молока. 2015. № 12 (194). С. 36–41.

3. Храмцов А.Г. Феномен молочной сыворотки, СПб. : Профессия, 2012. 804 с.

4. Лисицын В.А., Пономаренко О.В. Функциональные продукты питания на основе молочной сыворотки, перспективы переработки молочной сыворотки. В книге: Пищевые инновации и биотехнологии. Сборник тезисов X Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.

Под общей редакцией А.Ю. Просекова. Кемерово, 2022. С. 268–270.

5. Инновационные технологии обогащения молочной продукции (теория и практика): монография, М.: Изд-во «Франтера». 2016. 374 с.

6. Воробьева Л.И. Пропионовокислые бактерии. М.: Изд-во МГУ, 1995. 288 с.

7. 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.). 57 с.

8. Воробьёва Л.И. Антимутагенность пропионовокислых бактерий // Микробиология. 1991. Т. 60. № 6. С. 83–89.

9. Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Ферментированные продукты питания с использованием плодов облепихи. Обзор. Chronos: естественные и технические науки. 2021. Т. 6. № 4 (37). С. 32–46. DOI: 10.52013/2712-9691-37-4-5.

10. Воронцова А.В., Чеченешкина О.Ю. Продукты из плодов облепихи – источник антиоксидантов. В книге: Студенческая наука – первый шаг к цифровизации сельского хозяйства. Материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ. В 3-х частях. Чебоксары, 2021. С. 229–230.

Информация об авторах

К. Е. Шевченко – младший научный сотрудник лаборатории микробиологии молока и молочных продуктов отдела СибНИИС ФГБНУ ФАНЦА.

Р. В. Дорофеев – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории микробиологии молока и молочных продуктов отдела СибНИИС ФГБНУ ФАНЦА.

Ю. М. Трубицына – младший научный сотрудник лаборатории микробиологии молока и молочных продуктов отдела СибНИИС ФГБНУ ФАНЦА.

Е. А. Кашлакова – инженер лаборатории микробиологии молока и молочных продуктов отдела СибНИИС ФГБНУ ФАНЦА.

REFERENCES

1. Medvedev, O., Medvedeva, Z. Healthy eating modern scientific recommendations on healthy nutrition and their impact on the food industry. FIELD: Fat and oil industry. Oils and fats. 2017. No. 2 (3). pp. 38-41. (In Russ.).

2. Musina, O.N. New dairy products for healthy nutrition // Milk processing. 2015. No. 12 (194). pp. 36-41. (In Russ.).

3. Khramtsov, A.G. The phenomenon of whey St. Petersburg: Profession, 2012. 804 p. (In Russ.).

4. Lisitsyn, V.A., Ponomarenko, O.V. Functional whey-based food products, prospects of whey processing. In the book: Food innovations and biotechnologies. Collection

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

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

of abstracts of the X International Scientific Conference of students, postgraduates and Young Scientists. Under the general editorship of A.Y. Prosekov. Kemerovo, 2022. pp. 268-270. (In Russ.).

5. Innovative technologies for the enrichment of dairy products (theory and practice): monograph. M.: Publishing house "Frantera". 2016. 374 p. (In Russ.).

6. Vorobyeva, L.I. Propionic acid bacteria. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1995. 288 p. (In Russ.).

7. Methodological recommendations MP 2.3.1.0253-21 "Norms of physiological energy and nutritional requirements for various groups of the Russian Federation" (approved by the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-being on July 22, 2021). 57 p. Vorobyova, L.I. Antimutagenicity of propionic acid bacteria / L.I. Vorobyova [et al.] // Microbiology. 1991. Vol. 60. No. 6. pp. 83-89. (In Russ.).

8. Vorobyeva, L.I. Antimutagenicity of propionic acid bacteria // Microbiology. 1991. Vol. 60. No. 6. pp. 83-89. (In Russ.).

9. Burak, L.Ch., Sapach, A.N. Fermented food products using sea buckthorn fruits. Review. Chronos: Natural and technical sciences. 2021. Vol. 6. No. 4 (37). pp. 32-46. (In Russ.). DOI: 10.52013/2712-9691-37-4-5.

10. Vorontsova, A.V., Checheneshkina, O.Y. Sea buckthorn fruit products are a source of antioxidants. In the book: Student science is the first step towards digitalization of agriculture. Materials of the All-Russian Student Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the Chuvash State Agrarian University. In 3 parts. Cheboksary, 2021. pp. 229-230. (In Russ.).

Information about the authors

K.E. Shevchenko - junior research assistant at the Laboratory of Microbiology of Milk and Dairy Products of the Siberian Scientific Research Institute of Cheese-Making of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies.

R.V. Dorofeev - candidate of agricultural sciences, Senior researcher at the Laboratory of Microbiology of Milk and Dairy Products of the Siberian Scientific Research Institute of Cheese-Making of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies.

J.M. Trubitsyna - junior research assistant at the Laboratory of Microbiology of Milk and Dairy Products of the Siberian Scientific Research Institute of Cheese-Making of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies.

E.A. Kashlakova - engineer at the Laboratory of Microbiology of Milk and Dairy Products of the Siberian Scientific Research Institute of Cheese-Making of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.143
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.011

EDN: UMXATY

ГОМОГЕННАЯ ЯБЛОЧНАЯ ПАСТА ИЗ ПЛОДОВ МЕЛКОПЛОДНЫХ ЯБЛОНОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЙНОГО МАРМЕЛАДА

Денис Александрович Кох ¹, Жанна Александровна Кох ²

^{1, 2} ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», г. Красноярск, Россия

¹ dekoch@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3047-1386>

² jannetta-83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4016-7596>

Аннотация. Кондитерские изделия обладают значительными преимуществами, в частности, оригинальным вкусом, привлекательным внешним видом, ароматом, что в целом способствует внедрению этих продуктов в ежедневный рацион различных групп потребителей во многих странах. Учитывая положительное влияние на здоровье и работоспособность человеческого организма, целесообразным продуктом для потребления являются сахаристые кондитерские изделия, в частности мармеладная группа изделий. Корректировка химического состава продуктов в сторону увеличения количества биологически активных веществ оказывает благотворное влияние на все системы человеческого организма. В производстве мармелада наиболее активно используются пищевые добавки, желирующие вещества, стабилизаторы и т.д. В последнее время исследователи уделяют большое внимание поиску и разработке новых желатинирующих и стабилизирующих компонентов, обладающих необходимыми функциональными и технологическими свойствами и способных модифицировать содержание традиционных желирующих веществ (агар, пектин, желатин). К таким новым компонентам относятся побочные продукты консервной, свеклосахарной переработки, виноделия и т.д. Применение этих ингредиентов улучшает механоструктурные характеристики гелей. Мармеладно-желейные продукты, обогащенные дикорастущим сырьем, обладают улучшенными влагоудерживающими способностями, реологическими характеристиками гелей и повышенной пищевой ценностью готовых продуктов. Целью данного исследования является совершенствование технологии производства желейного мармелада с использованием гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь. Объектом исследования является гомогенная яблочная паста из плодов мелкоплодных яблонь и экспериментальные образцы мармелада с гомогенной яблочной пастой. В результате проведенных экспериментальных исследований было изучено влияние гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь на технологические процессы, происходящие в производстве желейного мармелада. Проведено совершенствование технологической схемы производства мармелада с использованием гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь и установлены показатели качества желейного мармелада.

Ключевые слова: пищевая промышленность, кондитерские изделия, желейный мармелад, гомогенная яблочная паста из плодов мелкоплодных яблонь, структурно-механические свойства, биологически активные вещества, способ производства.

Для цитирования: Кох Д. А., Кох Ж. А. Гомогенная яблочная паста из плодов мелкоплодных яблонь в производстве желейного мармелада // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 97–102. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.011. EDN: <https://elibrary.ru/UHXTPX>.

Original article

HOMOGENEOUS APPLE PASTE FROM SMALL-FRUITED APPLE TREES IN THE PRODUCTION OF JELLY MARMALADE

Denis A. Koch ¹, Zhanna A. Koch ²

^{1, 2} Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

¹ dekoch@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3047-1386>

² jannetta-83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4016-7596>

Abstract. Confectionery products have significant advantages, in particular, the original taste, attractive appearance, aroma, which generally contributes to the introduction of these products in the daily diet of different groups of consumers in many countries. Taking into account the positive effect on health and performance of the human body, a reasonable product for consumption are sugary confectionery products, in particular marmalade

© Кох Д. А., Кох Ж. А., 2025

group of products. Adjustment of the chemical composition of the products in the direction of increasing the amount of biologically active substances has a beneficial effect on all systems of the human body. In the production of marmalade most actively used food additives, gelling agents, stabilizers, etc. Recently, researchers have paid much attention to the search and development of new gelatinizing and stabilizing components with the necessary functional and technological properties and capable of modifying the content of traditional gelling agents (agar, pectin, gelatin). Such new components include by-products of canning, sugar beet processing, winemaking, etc. The use of these ingredients improves the mechanostructural characteristics of gels. Marmalade-jelly products enriched with wild raw materials contribute to the improvement of moisture-holding capacity, rheological characteristics of gels and increase the nutritional and biological value of finished products. The purpose of this study is to improve the technology of jelly marmalade production using homogeneous apple paste from small-fruited apple trees. The object of the study is homogeneous apple paste from fruits of small-fruited apple trees and experimental samples of marmalade with homogeneous apple paste. As a result of experimental research the influence of homogeneous apple paste from fruits of small-fruited apple trees on technological processes occurring in the production of jelly marmalade was studied. Improvement of technological scheme of marmalade production with the use of homogeneous apple paste from fruits of small-fruited apple trees was carried out and quality indicators of jelly marmalade were established.

Keywords: food industry, confectionery products, jelly marmalade, homogeneous apple paste from small fruit apple trees, structural and mechanical properties, biologically active substances, production method.

For citation: Kokh, D. A., Kokh, Zh. A. (2025). Homogeneous apple paste from fruits of small-fruited apple trees in production of jelly marmalade. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 97-102. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.011. EDN: <https://elibrary.ru/UMXATY>.

ВВЕДЕНИЕ

Ежедневное употребление фруктов и ягод в рационе является эффективным способом улучшения пищевого статуса человека, поскольку организм обеспечивается пищевыми волокнами, витаминами, минеральными компонентами, полифенолами и другими необходимыми компонентами. Кондитерские изделия обладают значительными преимуществами, имеют оригинальный вкус, привлекательный внешний вид, аромат, что в целом способствует внедрению этих продуктов в ежедневный рацион различных групп потребителей во многих странах. Учитывая положительное влияние на здоровье и работоспособность человеческого организма, целесообразным продуктом для потребления являются сахаристые кондитерские изделия, а именно мармеладная группа изделий. Химический состав предлагаемых продуктов характеризуется сочетанием моно- и дисахаридов с другими компонентами, в частности с несбалансированным содержанием веществ, дефицитом пищевых волокон, витаминов, микро- и макроэлементов. Мармеладная группа сахаристых кондитерских изделий включает в состав пектин, яблочное пюре, и другое плодово-ягодное сырье. Эти виды сырья выступают не только как технологически необходимые компоненты, но и как полезные функциональные ингредиенты [3, 5, 6].

Корректировка химического состава продуктов в сторону увеличения количества биологически активных веществ оказывает благотворное влияние на все системы человеческого организма. Благотворное влияние натуральных добавок на здоровье человека обусловлено наличием природных фенолов и полифенолов. Фенольные соединения объединяют несколько классов химических соединений, среди которых

особое место занимают флавоноиды – важнейшие природные антиоксиданты. Антоцианы, которые являются природными цветовыми пигментами, а также их способность окрашивать продукты питания, обладают антиоксидантными и биоактивными свойствами, которые связаны с определенными преимуществами для здоровья, такими как антидиабетический, противовоспалительный эффекты. Антоцианы, ответственные за красный цвет плодов мелкоплодных яблонь, являются наиболее распространенными флавоноидными соединениями. Синтез этих структур в живых организмах невозможен. В связи с этим создание функциональных продуктов питания с различными растительными добавками в качестве профилактического средства в программах антиоксидантной защиты населения является актуальной задачей [7, 8, 12].

В производстве мармелада наиболее активно используются пищевые добавки, желирующие вещества, стабилизаторы и т.д. В последнее время исследователи уделяют большое внимание поиску и разработке новых желирующих и стабилизирующих компонентов, обладающих необходимыми функциональными и технологическими свойствами и способных модифицировать содержание традиционных желирующих веществ (агар, пектин, желатин). К таким новым компонентам относятся побочные продукты консервной, свеклосахарной переработки, виноделия и т.д. [7]. Применение этих ингредиентов улучшает механоструктурные характеристики гелей. Мармеладно-желейные продукты, обогащенные дикорастущим сырьем, обладают улучшенной влагоудерживающей способностью, реологическими характеристиками гелей и повышенной пищевой ценностью. Для повышения пищевой ценности мармеладной продукции используется фруктовое и ягодное сырье, которое добавляют в ре-

ГОМОГЕННАЯ ЯБЛОЧНАЯ ПАСТА ИЗ ПЛОДОВ МЕЛКОПЛОДНЫХ ЯБЛОНЬ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЙНОГО МАРМЕЛАДА

цептуру, однако недостатком является использование длительной тепловой обработки при высоких температурах, что также способствует потере биологически активных веществ [9, 13].

Значительный интерес представляет использование растительного сырья при разработке технологии мармелада [3, 6, 9, 13]. Для увеличения содержания физиологически функциональных ингредиентов и обеспечения высоких сенсорных характеристик мармелада используются различные виды местного растительного сырья [3, 4, 15].

Высокое качество гомогенной яблочной пасты на основе плодов мелкоплодных яблонь позволило предложить способы приготовления желейного мармелада без добавления структурообразователей. Можно ожидать, что наличие в мармеладе пектиновых веществ, пищевых волокон, которые входят в состав гомогенной яблочной пасты, приведет к увеличению влагоудерживающей способности желейного мармелада [11, 2, 7, 10].

Целью данного исследования является совершенствование технологии производства желейного мармелада с использованием гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить влияние гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь на технологические процессы в производстве желейного мармелада.

2. Провести совершенствование технологической схемы производства мармелада с использованием гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является гомогенная яблочная паста из плодов мелкоплодных яблонь и экспериментальные образцы мармелада с гомогенной яблочной пастой.

Изучение химического состава (сухое вещество, титруемая кислотность, полифенольные вещества, содержание сахара) сырья, полуфабрикатов и готовой продукции проводилось по ГОСТ 6441-2014 и Руководству по современным методам исследования материалов и продуктов. Отбор проб для испытаний проводили в соответствии с ГОСТ 5904-2019. Органолептические показатели определяли по ГОСТ 5904-2019 и по балльной шкале, основанной на установлении параметров комплексных показателей качества. Массовую долю сухих веществ в гомогенной яблочной пасте определяли рефрактометрическим методом, активную кислотность – электрометрическим методом, содержание пектина – кальций-пектатным методом, содержание полифенольных соединений опре-

деляли колориметрическим методом в соответствии с ГОСТ. Массовую долю влаги в мармеладе определяли рефрактометрическим методом, кислотность – титриметрическим методом, массовую долю влаги в мармеладе – титриметрическим методом, содержание редуцирующих веществ – феррицианидным методом, напряжение сдвига – с помощью пенетрометра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для приготовления гомогенной яблочной пасты использовали плоды мелкоплодных яблонь в разных количествах. Выбор такого сырья обоснован при наличии в нем пектиновых веществ, которые создают желеобразующий эффект и значительное содержание важных физиологически функциональных ингредиентов. Для получения гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь применяли способ производства гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь [7, 10]. Результаты, полученные при анализе гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Органолептические и физико-химические показатели гомогенной яблочной пасты, полученной из плодов мелкоплодных яблонь с использованием СВЧ-обработки

Table 1 – Organoleptic and physico-chemical parameters of homogeneous apple paste obtained from the fruits of small-fruited apple trees using microwave treatment

Наименование показателей	Содержание
Органолептические	
Внешний вид	Однородная, равномерно протертая масса, без плодоножек и семян
Вкус и запах	Свойственный исходным плодам, посторонние привкус и запах не ощущаются
Цвет	Свойственный плодам (от малинового до пурпурного), из которого изготовлена гомогенная яблочная паста
Физико-химические	
Содержание сухих веществ, %	20,6–25,4
Содержание пектиновых веществ, %	2,25–5,35
pH	3,1–3,3

Проведенный анализ таблицы 1 позволяет сделать вывод о том, что гомогенная яблочная паста из плодов мелкоплодных яблонь содержит значительное количество сухих веществ – 20,6–25,4 %, пектиновых веществ – 2,25–5,35, это объясняется концентрацией биологически активных соединений за счет использования в

технологии получения гомогенной яблочной пасты СВЧ-обработки.

Преимуществом использования гомогенной яблочной пасты является исключение из классической рецептуры ароматизаторов и красителей за счет натурального красителя, который содержит гомогенная паста. Способ производства желейного мармелада с использованием гомогенной яблочной пасты осуществляли согласно разработанной технологии по патенту РФ № 2811929 [11].

Для дальнейшего изучения был произведен расчет производственных рецептур на основе гомогенной яблочной пасты, компонентный состав рецептуры желейного мармелада при соотношении рецептурных компонентов, кг на 1000 кг готовой продукции приведен в таблице 2. В таблице 3 представлен анализ органолептических и физико-химических показателей желейного мармелада.

Таблица 2 – Компонентный состав рецептур желейного мармелада

Table 2 – Component composition of jelly marmalade formulations

Наименование сырья	Расход сырья кг на 1000 кг готовой продукции			
	Контр.	1	2	3
Агар-агар	18,7	7,3	7,1	7,0
Сахар белый	580,3	436,9	429,1	421,6
Патока	181,9	186,6	183,3	180,0
Гомогенная яблочная паста	–	366,1	377,4	388,4
Кислота молочная	21,0	–	–	–
Лактат натрия	10,5	–	–	–
Краситель	0,5	–	–	–

Анализ таблицы 3 показывает, что образцы желейного мармелада с использованием гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь обладают улучшенными органолептическими свойствами и высоким содержанием биологически активных веществ. При увеличении массовой доли гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь в рецептуре происходит изменение физико-химических показателей. При уменьшении массовой доли гомогенной яблочной пасты в рецептуре желейного мармелада снижается его пищевая ценность. Эксперименты по использованию гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь в производстве желейных продуктов показали перспективность применения.

Таблица 3 – Анализ органолептических и физико-химических показателей желейного мармелада

Table 3 – Analysis of organoleptic and physico-chemical parameters of jelly marmalade

Наименование показателя	Требования по ГОСТ	Результаты анализа по вариантам		
		1	2	3
Органолептические показатели				
Вкус, запах, цвет	Характерные для данного наименования мармелада, без постороннего привкуса и запаха	Вкус и запах яблочный, цвет темно-красный, без постороннего привкуса и запаха		
Консистенция	Студнеобразная	Студнеобразная		
Поверхность	Глянцеванная или обсыпанная сахаром или другой обсыпкой в соответствии с рецептурой	Обсыпанная сахаром		
Форма	Без деформаций	Правильная, без деформации		
Физико-химические показатели				
Массовая доля влаги, %	15–24	22,0	21,5	20,5
Кислотность, град	–	18,3	18,8	18,1
Массовая доля фруктового сырья, %, не менее	15	50	52,5	55
Полифенольные вещества, %	–	39,1	40,5	41,4
Пищевые волокна, %	–	2,34	2,57	2,65

Желе, изготовленное с использованием гомогенной яблочной пасты, содержало ингредиенты, значительно отличающиеся от контрольных образцов по органолептическим и физико-химическим показателям, так как они содержат в своем составе сложные пектиновые комплексы и повышенное количество полифенольных веществ и пищевых волокон.

Желейный мармелад с гомогенной яблочной пастой имеет кисло-сладкий, насыщенный

ГОМОГЕННАЯ ЯБЛОЧНАЯ ПАСТА ИЗ ПЛОДОВ МЕЛКОПЛОДНЫХ ЯБЛОНОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЙНОГО МАРМЕЛАДА

темно-красный цвет, с приятным послевкусием и запахом яблок, студнеобразную консистенцию и правильную форму с четким контуром. Зависимость прочности от предельного напряжения сдвига (τ) образцов желейного мармелада представлено на рисунке 1.

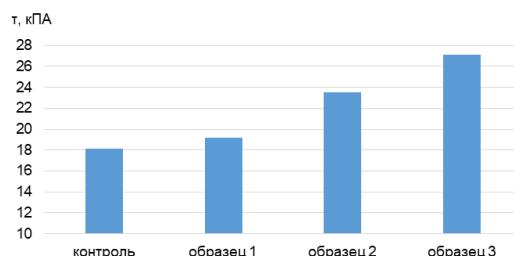


Рисунок 1 – Изменение предельного напряжения сдвига (τ) образцов желейного мармелада

Figure 1 – Change in the limiting shear stress (τ) of jelly jelly samples

На рисунке 1 показано, что образец 3 желейного мармелада с добавлением гомогенной яблочной пасты имеет наибольшее значение предельного напряжения на сдвиг. Показатель предельного напряжения сдвига данного образца составляет 27,2 кПа, что превышает предельное напряжение сдвига контрольного образца (18,1 кПа) почти на 30 %. Поэтому было целесообразным уменьшить рецептурное количество агар-агара в образцах.

Предложенный способ усовершенствования технологии производства желейного мармелада с использованием гомогенной яблочной пасты позволяет получить желейный мармелад с высоким содержанием биологически активных веществ, расширение ассортимента сахаристых кондитерских изделий, улучшить органолептические и физико-химические показатели.

В дальнейших исследованиях планируется уделить внимание определению химического состава и показателей качества мармеладных изделий в процессе хранения, так как гомогенная яблочная паста, используемая в рецептуре желейного мармелада, имеет технологию изготовления более энергоэффективную, чем традиционная, за счет использования СВЧ энергии.

Полученные нами результаты эксперимента о прочности желейного мармелада при применении гомогенной яблочной пасты создают предпосылки для разработки диетических кондитерских изделий, что определяет дальнейшее направление исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований было изучено влияние гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь на технологические процессы, происходящие в производстве желейного мармелада.

Проведено совершенствование технологической схемы производства мармелада с использованием гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь и установлены показатели качества желейного мармелада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Application of microwave heating in the production of homogeneous paste from the fruits of small-fruited apple trees / N. N. Tipsina, D. A. Koch, S. V. Khizhnyak [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials (P2ARM 2021), Воронеж, 21–24 сентября 2021 года. Vol. 1052. Воронеж: IOP Publishing Ltd, 2022. Р. 012008. DOI 10.1088/1755-1315/1052/1/012008.
2. Kokh D. A. Concentrated juice from fruits of small-fruited apple trees - As a semi-finished product for the food industry / D. A. Kokh, Z. A. Kokh // AIP Conference Proceedings, Ekaterinburg, 20 апреля 2021 года. Ekaterinburg, 2021. Р. 020008. DOI 10.1063/5.0068564.
3. Аверьянова Е. В. Разработка и оценка качества мармелада с экстрактами растительного сырья / Е. В. Аверьянова, М. Н. Школьникова, Е. Д. Рожнов // Индустрия питания. 2024. Т. 9, № 2. С. 30–39. DOI 10.29141/2500-1922-2024-9-2-4. EDN IJEJUP.
4. Винницкая В. Ф., Акишин Д. В., Перфилова О. В. Разработка и создание функциональных продуктов из растительного сырья в Мичуринском государственном аграрном университете // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2013. № 6. С. 83–86.
5. Горячева Г. Н., Савенкова Т. В., Тарасенко Ю. А. Особенности использования фруктово-ягодных полуфабрикатов // Кондитерское производство. 2006. № 1. С. 13.
6. К вопросу влияния химического состава пектина на массовую долю фруктового сырья в мармеладе / И. А. Белова, М. А. Лаврухин, О. С. Руденко [и др.] // Пищевая промышленность. 2020. № 4. С. 8–11. DOI 10.24411/0235-2486-2020-10037. EDN UXBLIG.
7. Кох Д. А. Совершенствование способа производства гомогенной яблочной пасты из плодов мелкоплодных яблонь / Д. А. Кох, Ж. А. Кох // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2024. № 1(395). 34–37. DOI 10.26297/0579-3009.2024.1.6.
8. Кох Д. А. Способы переработки мелкоплодных яблок в пюре / Д. А. Кох, Н. Н. Типсина, Ж. А. Кох // Вестник КрасГАУ. 2016. № 3(114). С. 67–73.
9. Кузнецова О. Ю. Разработка кондитерских мармеладных изделий функционального назначения / О. Ю. Кузнецова // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 20. С. 206–210. EDN RFUUBL.
10. Пат. № 2797450 РФ. Способ получения гомогенной яблочной пасты / Д. А. Кох, Ж. А. Кох: № 2021132724 : заявл. 08.11.2021 : опубл. 06.06.2023, Бюл. № 16. 15 с. Заявитель: ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет».
11. Пат. № 2811929 РФ. Способ производства желейного мармелада с использованием гомогенной яблочной пасты / Д. А. Кох, Ж. А. Кох: № 2023121282 : заявл. 14.08.2023 : опубл. 18.01.2024, Бюл. № 2. 15 с. Заявитель: ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет».
12. Перфилова О. В., Бабушкин В. А., Ананских В. В. Ресурсосберегающая технология переработки яблок // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2017. № 6(20). С. 21–28.
13. Присухина Н. В. Моделирование рецептурного состава фруктово-желейного мармелада / Н. В. Присухина, Л. Г. Ермош, Е. Н. Непомнящих // Наука и образование

ние: опыт, проблемы, перспективы развития : Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ, Красноярск, 19–21 апреля 2022 года. Том Часть 2. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2022. С. 250–253.

14. Типсина Н. Н., Кох Д. А., Туманова А. Е. Использование растительного сырья в производстве кондитерских и хлебобулочных изделий // Кондитерское и хлебопекарное производство. 2014. № 3–4(148). С. 42–43.

Информация об авторах

Д. А. Кох – к.т.н., доцент кафедры технологии хлебопекарного, кондитерских и макаронных производств ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет».

Ж. А. Кох – к.т.н., доцент кафедры технологии, оборудования бродильных и пищевых производств ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет».

REFERENCES

1. Application of microwave heating in the production of homogeneous paste from the fruits of small-fruited apple trees / N. N. Tipsina, D. A. Koch, S. V. Khizhnyak [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials (P2ARM 2021), Voronezh, September 21–24, 2021. Vol. 1052. Voronezh: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 012008. DOI 10.1088/1755-1315/1052/1/012008.
2. Kokh, D.A. Concentrated juice from fruits of small-fruited apple trees - As a semi-finished product for the food industry / D.A. Kokh, Z.A. Kokh // AIP Conference Proceedings, Ekaterinburg, April 20, 2021. Ekaterinburg, 2021. P. 020008. DOI 10.1063/5.0068564.
3. Averyanova, E.V. Development and quality assessment of marmalade with extracts of vegetable raw materials / E.V. Averyanova, M.N. Shkolnikova, E.D. Rozhnov // Food Industry. 2024. T. 9, № 2. С. 30-39. DOI 10.29141/2500-1922-2024-9-2-4. EDN IJEJUP.
4. Vinnitskaya, V.F., Akishin, D.V., Perfilova, O.V. Development and creation of functional products from vegetable raw materials at Michurinsk State Agrarian University // Vestnik Michurinsk State Agrarian University. 2013. № 6. С. 83-86.
5. Goryacheva, G.N., Savenkova, T.V., Tarasenko, Yu.A. Features of the use of fruit and berry semi-finished products // Confectionery production. 2006. № 1. С. 13.
6. To the question of the influence of the chemical composition of pectin on the mass fraction of fruit raw materials in marmalade / I. A. Belova, M. A. Lavrukhan, O. S. Rudenko [et al.] // Food industry. 2020. № 4. С. 8-11. DOI 10.24411/0235-2486-2020-10037. EDN UXBLIG.
7. Koch, D.A. Improvement of the method of production of homogeneous apple paste from the fruits of small-fruited apple trees / D.A. Koch, J.A. Koch // Izvestiya vysokikh uchebno-vaniya. Food technology. 2024. № 1(395). С. 34-37. DOI 10.26297/0579-3009.2024.1.6.
8. Kokh, D.A. Methods of processing small-fruited apples into puree / D.A. Kokh, N.N. Tipsina, J.A. Kokh // Vestnik KrasGAU. 2016. № 3(114). С. 67-73.
9. Kuznetsova, O.Yu. Development of confectionery marmalade products of functional purpose / O.Yu. Kuznetsova // Bulletin of Kazan Technological University. 2013. T. 16, № 20. С. 206-210. EDN RFUUBL.
10. Pat. № 2797450 RF. Method of homogeneous apple paste / D.A. Kokh, J.A. Kokh: № 2021132724: avv. 08.11.2021: published 06.06.2023, Bul. № 16. 15 c. Applicant: FGBOU VO "Krasnoyarsk State Agrarian University".
11. Pat. № 2811929 RF. Method of production of jelly marmalade with the use of homogeneous apple paste / D.A. Kokh, J.A. Kokh: № 2023121282: avv. 14.08.2023: publ. 18.01.2024, Bul. № 2. 15 c. Applicant: FGBOU VO "Krasnoyarsk State Agrarian University".
12. Perfilova, O.V., Babushkin, V.A., Ananskikh, V.V. Resource-saving technology of apple processing // Technologies of food and food-processing industry APK - pro-products of healthy food. 2017. № 6(20). С. 21-28.
13. Prisukhina, N.V. Modeling of the recipe composition of fruit-jelly marmalade / N.V. Prisukhina, L.G. Ermosh, E.N. Nepomnyashchikh // Science and education: experience, problems, prospects for development: Proceedings of the international scientific-practical conference dedicated to the 70th anniversary of FGBOU VO Krasnoyarsk GAU, Krasnoyarsk, April 19-21, 2022. Volume Part 2. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2022. С. 250-253.
14. Tipsina, N.N., Kokh, D.A., Tumanova, A.E. Use of vegetable raw materials in the production of confectionery and bakery products // Confectionery and bakery production. 2014. № 3-4(148). С. 42-43.

Information about the authors

D.A. Koch - Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of technology of bakery, confectionery and pasta production FSBEI HE Krasnoyarsk State Agrarian University.

Zh.A. Kokh - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology, equipment of fermentation and food production of FSBEI VO "Krasnoyarsk State Agrarian University".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 663.123.4
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.012

EDN: USIKBN

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФЕРМЕНТОЛИЗА ПОДСОЛНЕЧНОЙ ЛУЗГИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Виктория Петровна Вистовская ¹, Денис Сергеевич Кожемякин ²,
Елена Петровна Каменская ³

^{1, 2, 3} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ vpvist@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0606-4599>

² denkzm1998@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4051-569X>

³ ekam2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3760-6914>

Аннотация. Исследование посвящено оптимизации параметров процесса ферментативного гидролиза с применением методов математического моделирования. Объектом исследования являлась лузга, полученная в процессе обрушивания семян подсолнечника. При проведении ферментолиза использовали ферментные препараты производства ООО ПО «Сиббиофарм» (г. Бердск) и ОАО ТД «Биопрепарат» (г. Москва), обладающие целлюлополитическим, β -глюканазным, ксиланазным и глюкоамилазным действиями: «ЦеллоЛюкс А», « β -глюканаза-ЦП», «Целллюлаза», «Ксиланаза». В эксперименте подсолнечную лузгу подвергали предварительной щелочной делигнификации, после чего смешивали с водой в соотношении 1:5. Полученную суспензию после внесения ферментных препаратов термостатировали при температуре 50 °C в течение 20 ч с отбором проб каждые 4 ч. После центрифугирования супернатант фильтровали и использовали для определения содержания редуцирующих веществ. При постановке четырехфакторного эксперимента (ПФЭ 2⁴) выбраны следующие критерии оптимизации: продолжительность гидролиза и активность ферментных препаратов. На основании результатов серии экспериментов составлено линейное уравнение регрессии, описывающее процесс накопления редуцирующих веществ при совместном действии вышеупомянутых факторов. Полученная математическая модель соответствует условиям адекватности по критерию Фишера и апробирована в экспериментальных условиях. В результате решения уравнения регрессии определена продолжительность гидролиза, составившая 20 ч, с использованием ферментных препаратов активностью 75 ед/г. При таком соотношении факторов прогнозируемое значение редуцирующих веществ составило 28,19 г/л, а фактическое – 28,01 г/л.

Ключевые слова: подсолнечная лузга, ферментные препараты, математическое моделирование, вторичные сырьевые ресурсы, ферментативный гидролиз, редуцирующие вещества.

Для цитирования: Вистовская В. П., Кожемякин Д. С., Каменская Е. П. Оптимизация параметров ферментолиза подсолнечной лузги с использованием методов математического моделирования // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 103–109. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.012. EDN: <https://elibrary.ru/USIKBN>.

Original article

OPTIMIZATION OF SUNFLOWER HUSK ENZYMOLOGY PARAMETERS THROUGH USE OF MATHEMATICAL MODELING METHODS

Victoria P. Vistovskaya ¹, Denis S. Kozhemyakin ², Elena P. Kamenskaya ³

^{1, 2, 3} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ vpvist@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0606-4599>

² denkzm1998@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4051-569X>

³ ekam2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3760-6914>

© Вистовская В. П., Кожемякин Д. С., Каменская Е. П., 2025

Abstract. The study is focused on optimizing the parameters of the process of enzymatic hydrolysis through the use of mathematical modeling methods. The subject of the study was the husks obtained as a result of sunflower seed hulling. Cellulolytic, β -glucanasic, xylanasic and glucoamylasic enzyme preparations produced by Sibbiopharm Production Association, OOO [Limited Liability Company] (city of Berdsk) and Biopreparat Trading House, OAO [Open Joint-Stock Company] (city of Moscow) were used in the process of enzymolysis, namely Cellolux-A, β -glucanase-CL, Cellulase, and Xylanase. During the experiment, the sunflower husks were subjected to alkaline delignification in advance, then mixed with water at a 1:5 ratio. Upon introducing the enzyme preparations, the resulting suspension was maintained at the temperature of 50 °C for 20 hours, with samples drawn every 4 hours. After centrifugation the supernatant fluid was filtered and used to determine the concentration of reducing agents. When setting up the four-factor experiment (2⁴ full factorial experiment), the following optimization criteria were selected: hydrolysis duration and enzymatic preparation activity. Based on the results of a series of experiments, a linear regression equation which described the processes of reducing agent accumulation, with both factors mentioned above in co-operation, was deduced. The resulting mathematical model was shown to be adequate by passing the F-test and was tested experimentally. Solving the regression equation allowed us to determine the duration of hydrolysis, amounting to 20 hours, and the level of enzymatic preparation activity was found to be 75 u/g. Given the factor ratios, the amount of reducing agents was expected to reach 28.19 g/l, actually amounting to 28.01 g/l.

Key words: sunflower husks, enzymatic preparations, mathematical modeling, recyclable raw materials, enzymatic hydrolysis, reducing agents.

For citation: Vistovskaya, V. P., Kozhemyakin, D. S., Kamenskaya, E. P. (2025). Optimization of sunflower husk enzymolysis parameters through use of mathematical modeling methods. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 103-109. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.012. EDN: <https://elibrary.ru/USIKBN>.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с увеличением производства растительных масел как в нашей стране, так и в мире, остро встает проблема конверсии и комплексного использования побочных продуктов производства – жмыхов, шротов, фосфатидных концентратов, а также шелухи и лузги. Главной масличной культурой в нашей стране является подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus* L.) – травянистое растение рода *Helianthus* L. семейства *Asteraceae*, на него приходится свыше 80 % посевных площадей всех масличных культур, что составляет около 20,3 % от мировых посевов подсолнечника. Ядра семян *Helianthus annuus* L. имеют высокую биологическую ценность, они содержат 25–30 % белка, в составе которого 1/3 – незаменимые аминокислоты; до 64 % липидов, богатых полиненасыщенными жирами; около 7 % углеводов, из которых более половины – пищевые волокна, оказывающие положительное влияние на работу кишечника. Также ядра семян богаты витаминами (A, С, Е, PP, группы В), макро- и микроэлементами, такими как кальций, калий, железо, магний, марганец, фосфор, натрий, цинк и др. [1, 2].

На маслодобывающих заводах существует проблема накопления большого количества отходов подсолнечного производства из-за отсутствия эффективных технологий переработки и утилизации. Лузга подсолнечника, являясь крупнотоннажным источником вторичного сырья, в зависимости от сорта культуры в среднем составляет 30–50 % от веса семян. В последние годы в новых сортах подсолнечника в связи с ростом масличности доля лузги снизи-

лась почти в два раза с 30 % до 17 %. Лузга разных гибридов и сортов подсолнечника содержит в среднем: жира 3,0 %, белка 3,4 %, безазотистых экстрактивных веществ 29,7 %, клетчатки 61,1 %, золы 2,83 %. В настоящее время перерабатывается 40 % образующейся лузги (в строительстве; при выращивании грибов; в качестве удобрения и улучшителя свойств почвы; для получения биогаза; в качестве сырья в гидролизной промышленности; в качестве кормовой добавки в животноводстве и птицеводстве), остальные 60 % захоранивают или утилизируют путем сжигания [3, 4]. При этом использование лузги может сопровождаться и некоторыми трудностями. Так, применение лузги в качестве мелиоранта почв или утилизация путем вывоза на мусорные полигоны может способствовать благоприятному развитию плесеней, что объясняется наличием в ней частиц оболочек ядра подсолнечника, не отделившихся во время обрушивания, которые содержат белки, жиры, углеводы. Использование лузги в качестве топлива может оказывать негативный эффект на местную экосистему, а повышенное содержание клетчатки делает ее, без предварительной обработки, практически не усвояемой для желудка животных [5–7].

Поскольку подсолнечная лузга содержит значительное количество пентозанов (23,6–28,0 %), клетчатки (52,0–66,0 %), лигнина (24,8–29,6 %), целлюлозы (31,0–42,4 %), она после предварительной делигнификации и гидролиза является ценным субстратом для культивирования мицелиальных грибов, дрожжей или бактерий – продуцентов микробного белка, сбалансированного по аминокислотному составу. Так, использование подсолнечной лузги для выращи-

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФЕРМЕНТОЛИЗА ПОДСОЛНЕЧНОЙ ЛУЗГИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

вания кормовых дрожжей позволяет увеличить суммарное содержание протеина в 8–9 раз [8].

В связи с этим, одним из перспективных путей рационального использования вторичного растительного сырья, в том числе подсолнечной лузги является её применение в качестве ферментированного субстрата для биосинтеза микробного белка, что позволит не только получить дополнительно белок, но и одновременно решить проблемы утилизации отходов, загрязняющих окружающую среду [9].

С целью повышения эффективности биоконверсии подсолнечной лузги необходим поиск как новых отдельных ферментных препаратов (ФП), так и составление мультиэнзимных композиций (МЭК), которые обеспечат максимальную биодеградацию основных компонентов лузги. Для установления рациональных параметров ферментативного гидролиза подсолнечной лузги и разработки мультиэнзимных композиций целесообразно использовать математические методы планирования экспериментов, а именно план полного факторного эксперимента.

Цель данной работы – оптимизация параметров ферментативного гидролиза подсолнечной лузги на основе математических методов планирования эксперимента.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служила лузга, полученная в результате обрушивания целых семян подсолнечника в рушально-веечном отделении при производстве растительного масла на Барнаульском маслозаводоэкстракционном заводе (БМЭЗ, г. Барнаул). Лузга подсолнечника имела влажность 9,87 %; массовую долю сырого жира – 4,5 % (абс. сухое вещество); массовую долю сырой клетчатки – 52,1 %, (абс. сухое вещество); массовую долю сырого протеина – 1,4 % (абс. сухое вещество); массовую долю лигнина – 28,9 % (абс. сухое вещество).

Подсолнечную лузгу расфасовывали в полиэтиленовые пакеты и хранили в сухом проветриваемом помещении при комнатной температуре.

Механическая обработка лузги заключалась в измельчении на лабораторной мельнице ЛМЦ-1М с образованием частиц размерами от 125 до 560 мкм. Подсолнечная лузга характеризуется высоким содержанием лигнина, что может негативно сказаться в дальнейшем на активности и работе ферментных препаратов. В связи с этим проводилась предварительная термохимическая обработка сырья – щелочная делигнификация. Подсолнечную лузгу смешивали с 1 %-ым раствором NaOH в соотношении 1:9, т.е. к 100 г исходной лузги добавляли 900 г щелочного раствора. Полученную суспензию настаивали на водяной бане в течение 1 ч при температуре 80 °C, после чего осуществляли ее фильтрование.

Выбор щелочной делигнификации обоснован высокой эффективностью метода, дешевиз-

ной реагентов, а также данный способ не приводит к разрушению целлюлозы и гемицеллюлозы в отличие от обработки кислотами или паром [10].

В процессе ферментативного гидролиза подсолнечной лузги применялись следующие отечественные ферментные препараты: «Целлюлюкс А» (ООО ПО «Сиббиофарм, г. Бердск), «β-глюканаза-ЦП», «Целлюлаза» и «Ксиланаза» (ООО ТД «Биопрепарат», г. Москва).

Для осуществления процесса ферментолиза делигнифицированную подсолнечную лузгу смешивали с дистиллированной водой, нагретой до 50 °C в соотношении 1:5. Далее pH суспензии доводили до оптимальных значений pH, характерных для используемых ФП. После внесения ферментных препаратов, суспензию помещали в термостат с температурой 50±1 °C.

С целью предварительной оценки эффективности действия каждого ФП проводили эксперимент в течение 12 ч с отбором проб каждые 2 ч. Отобранные пробы центрифугировали на лабораторной центрифуге ОПН-16 в течение 10 мин при 3 500 об/мин. Надосадочную жидкость фильтровали через складчатый фильтр и в дальнейшем использовали для определения содержания редуцирующих веществ.

Для выполнения задач исследования определялись следующие физико-химические показатели:

- содержание редуцирующих веществ перманганатным методом Бертрана;
- массовая доля влаги методом высушивания;
- содержание сырой клетчатки гравиметрическим методом;
- массовая доля сырого жира методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР);
- массовая доля сырого протеина методом Кельльдаля;
- массовая доля лигнина сернокислым методом.

Математическую модель исследуемого процесса ферментативного гидролиза подсолнечной лузги разрабатывали на основе полного факторного эксперимента ПФЭ 2⁴.

Для наиболее полного описания процесса ферментолиза, а также его оптимизации был выбран следующий критерий: накопление редуцирующих веществ – У.

В работе были использованы следующие факторы: продолжительность процесса ферментолиза, ч – X₁; активность препарата «Целлюлюкс А» – X₂; дозировка препарата «β-глюканаза-ЦП» – X₃, дозировка препарата «Целлюлаза» – X₄.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для осуществления ферментативного гидролиза подсолнечной лузги применялись отечественные ферментные препараты, основная характеристика которых представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Основная характеристика ферментных препаратов

Table 1 – The main characteristics of enzyme preparations

Наименование препаратов	Ферменты	Активность основного фермента	Параметры	Оптимальные условия действия
ЦеллоЛюкс А	Целлюлаза, ксиланаза, β -глюканаза, глюкоамилаза	Целлюлополитическая активность – 2000 ± 200 ед/г	Температура, °C	45–60
			pH, ед.	3,5–6,0
β -глюканаза-ЦЛ	β -глюканаза, целлюлаза, ксиланаза	β -глюканазная активность – 10000 ед/мл	Температура, °C	65–70
			pH, ед.	4,0–5,0
Целлюлаза	Целлюлаза	Целлюлополитическая активность – 5000 ед/г	Температура, °C	50–60
			pH, ед.	4,0–5,5
Ксиланаза	Ксиланаза	Ксиланазная активность – 10000 ед/г	Температура, °C	50–60
			pH, ед.	4,0–7,5

Используемые ФП обладали целлюлополитическим, ксиланазным, β -глюканазным и глюкоамилазным действиями.

На первом этапе было изучено влияние ферментных препаратов на показатели содержания редуцирующих веществ. Заявленные ФП

вносили в суспензию с таким расчетом, чтобы активность каждого из них составляла 25 ед/г исходной лузги.

Динамика накопления РВ в зависимости от типа используемого ФП представлена на рисунке 1.

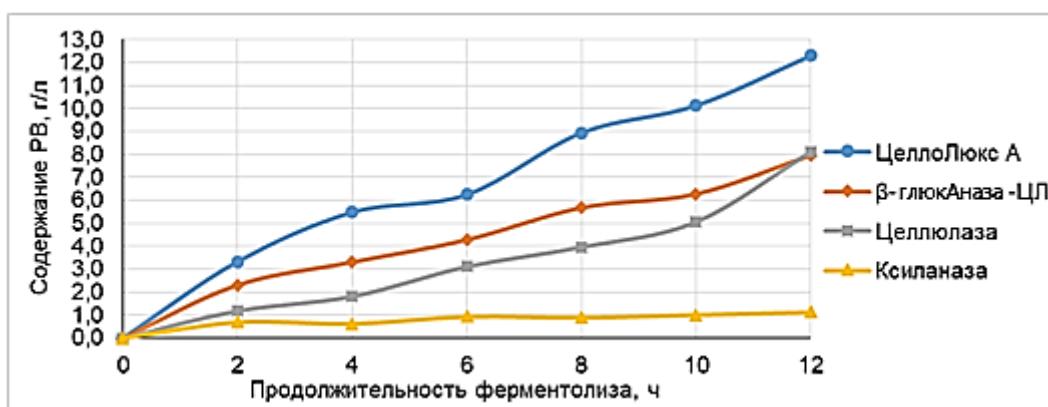


Рисунок 1 – Динамика накопления редуцирующих веществ

Figure 1 – Reducing agent accumulation dynamics

Согласно данным, представленным на рисунке 1, наибольший прирост РВ за 12 ч ферментолиза дает применение комплексного ФП «ЦеллоЛюкс А» – 12,3 г/л. Препараты « β -глюканаза-ЦЛ» и «Целлюлаза» также показывали хорошие результаты – 7,96 г/л и 8,11 г/л соответственно. За исследуемый период ФП «Ксиланаза» не проявил высокой эффективности – 1,12 г/л.

Таблица 2 – Кодирование факторов

Table 2 – Factoren coding

Факторы	X ₁	X ₁	X ₂	X ₂	X ₃	X ₃	X ₄	X ₄
Интервал варьирования	8	1	0,25	1	0,25	1	0,25	1
Верхний уровень	20	+1	0,75	+1	0,75	+1	0,75	+1
Нижний уровень	4	-1	0,25	-1	0,25	-1	0,25	-1
Основной уровень	12	0	0,50	0	0,50	0	0,50	0

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФЕРМЕНТОЛИЗА ПОДСОЛНЕЧНОЙ ЛУЗГИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При постановке четырехфакторного эксперимента были определены следующие сочетания факторов первого, второго и третьего порядков:

$$C_4^2 = \frac{4!}{2! 2!} = 6;$$

$$C_4^3 = \frac{4!}{3! 1!} = 4;$$

$$C_4^4 = \frac{4!}{4! 0!} = 1.$$

Суммарное количество взаимодействий факторов в эксперименте – 11. На основании этих данных была построена матрица планирования с учетом взаимодействия факторов.

Таблица 3 – Расчетные данные проверки дисперсии параллельных опытов и воспроизводимости экспериментов
Table 3 – Predicted replica test dispersion and reproducibility check data

№	y_1	y_2	\tilde{y}	S_i^2	G	G_T	$S_{(y)}^2$	$S_{(y)}$
1	14,00	13,94	13,97	0,002	0,2772	0,4517	0,4555	0,6749
2	18,83	18,47	18,65	0,065				
3	16,02	15,06	15,54	0,461				
4	19,85	20,39	20,12	0,146				
5	12,30	12,01	12,16	0,042				
6	14,50	15,19	14,85	0,238				
7	18,58	18,44	18,51	0,010				
8	17,80	15,99	16,90	1,638				
9	17,89	18,15	18,02	0,034				
10	23,05	21,44	22,25	1,296				
11	12,83	12,56	12,70	0,036				
12	24,11	23,05	23,58	0,562				
13	14,85	15,17	15,01	0,051				
14	19,02	20,13	19,58	0,616				
15	18,18	17,80	17,99	0,071				
16	29,02	27,01	28,02	2,020				

На основании расчетных данных было сделано заключение об однородности дисперсии, поскольку расчетное значение критерия Кохрена оказалось ниже табличного.

Определенное в ходе расчетов стандартное отклонение в дальнейшем использовалось при сравнении экспериментальных и спрогнозированных данных.

При определении коэффициентов регрессии b_u и их значимости при помощи критерия Стьюдента (t_T) удалось установить, что все коэффициенты, за исключением b_3 , b_{24} , b_{1234} – значимы. Данные коэффициенты были включены в итоговое уравнение регрессии.

Уравнение регрессии, описывающее процесс накопления редуцирующих веществ, имело следующий вид:

$$Y = 17,99 + 2,50X_1 + 1,18X_2 + 1,65X_4 + 0,48X_1X_2 - 0,54X_1X_3 + 0,21X_1X_4 + 1,30X_2X_3 + 0,62X_3X_4 - 0,34X_1X_2X_3 + 1,03X_1X_2X_4 + 0,48X_1X_3X_4 + 0,63X_2X_3X_4.$$

На следующем этапе была проведена серия опытов из 16 экспериментов в течение 20 ч по определению содержания редуцирующих веществ в гидролизатах подсолнечной лузги при различных уровнях факторов. Для снижения влияния систематических погрешностей была проведена предварительная рандомизация опытов, т.е. они выполнялись в случайном порядке. На основании экспериментальных данных была определена дисперсия для каждого параллельного опыта S_i^2 , значение критерия Кохрена G , а также дисперсия воспроизводимости $S_{(y)}^2$ и стандартное отклонение $S_{(y)}$. Для того, чтобы удостовериться в однородности дисперсии воспроизводимости, полученное значение G сравнивали с табличным G_T . Все вышеперечисленные показатели приведены в таблице 3.

Для того, чтобы удостовериться, что полученное уравнение регрессии пригодно для описания процесса накопления РВ, была проведена оценка его адекватности по критерию Фишера. Расчетные данные критерия (1,30) были ниже табличных (3,24), что подтверждает адекватность данной математической модели.

При решении данного уравнения удалось установить, что наилучшее накопление редуцирующих веществ достигается при продолжительности ферментолиза 20 ч и активности каждого вносимого ферментного препарата на уровне 75 ед/г – 28,19 г/л.

Для наглядной визуализации процесса накопления редуцирующих веществ была построена поверхность отклика, отображающая зависимость накопления редуцирующих веществ от продолжительности процесса ферментолиза и активности ферментных препаратов, представленная на рисунке 2.

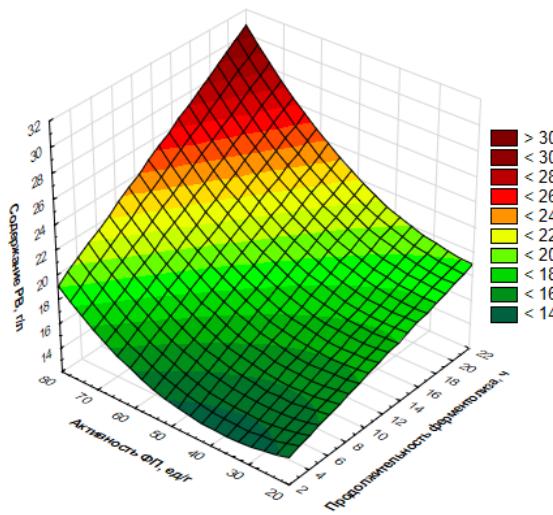


Рисунок 2 – Поверхность отклика накопления редуцирующих веществ

Figure 2 – Reducing agent accumulation response surface

Данные рисунка 2 свидетельствуют о том, что при увеличении активности ФП и продолжительности ферментативного гидролиза увеличивается содержание РВ в супензии.

Для подтверждения корректности математической модели был проведен сравнительный анализ экспериментальных и прогнозируемых данных (рисунок 3).

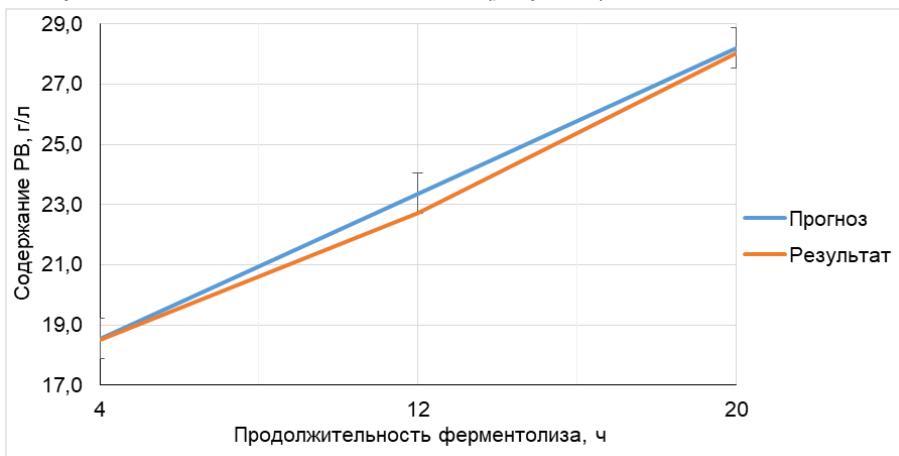


Рисунок 3 – Сравнительный анализ накопления редуцирующих веществ

Figure 3 – Comparative analysis of reducing agent accumulation

Согласно результатам, представленным на рисунке 3, содержание редуцирующих веществ было несколько ниже спрогнозированных данных или находилось на приблизительно том же уровне. Следует отметить, что все значения находились в пределах стандартных отклонений – 0,67, из чего следует, что математическая модель накопления редуцирующих веществ была построена верно.

ВЫВОДЫ

После решения уравнения регрессии и изучения зависимости накопления РВ от продолжительности процесса и активности ферментных препаратов были определены соотно-

шения факторов, обеспечивающие максимальное их накопление. Продолжительность гидролиза (X_1) – 20 ч, активность ФП «ЦеллоЛюкс А» (X_2) – 75 ед/г (3,75 г/100 г), « β -глюканаза-ЦП» (X_3) – 75 ед/г (0,75 мл/100 г), «Целлюлаза» (X_4) – 75 ед/г (1,5 г/100 г). При таком соотношении факторов прогнозируемое значение редуцирующих веществ составляет 28,19 г/л, а фактическое – 28,01 г/л.

Полученная в ходе полнофакторного эксперимента математическая модель может быть использована в дальнейших исследованиях, направленных на получение субстратов для микробного биосинтеза различных метаболитов.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФЕРМЕНТОЛИЗА ПОДСОЛНЕЧНОЙ ЛУЗГИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муха Д.В., Картамышева И.Н. Технология производства, хранения и переработки продукции растениеводства и основы земледелия. М., 2007. 580 с.
2. Arshad M., Amjad M. Medicinal use of sunflower oil and present status of sunflower in Pakistan: A review study // Sci. Tech. Dev. 2012. Vol. 3. Pp. 99–106.
3. Харьков В.В., Тунцев Д.В., Кузнецов М.Г. Термохимическая переработка лузги подсолнечника // Вестник Казанского ГАУ. 2018. №4(51). С. 130–134.
4. Тунцев Д.В., Харьков В.В., Кузнецов М.Г. Переработка лузги подсолнечника в угольные брикеты высокой прочности // Вестник Казанского ГАУ. 2019. №4(56). С. 86–90.
5. Ваншин В.В. Производство растительных масел : учеб. пособие. Оренбург: ОГУ, 2015. 243 с.
6. Технологические приемы биоконверсии лузги подсолнечника / С.А. Сашенкова, Г.В. Ильина, Д.Ю. Ильин, А.Р. Дашина // Нива Поволжья. 2020. №2. С. 52–57.
7. Кормление бройлеров при использовании комбикормов, содержащих соевый и подсолнечный шроты / И.Н. Никонов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2017. № 5. С. 34–38.
8. Хусид, С.Б. Подсолнечная лузга как источник получения функциональных кормовых добавок / С.Б. Хусид, А.Н. Гнеуш, Е.Е. Нестеренко // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 107. С. 142–155.
9. Разработка мультиэнзимной композиции для гидролиза пивной дробины с использованием методов математического моделирования / В.П. Вистовская [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 3. С. 134–141.
10. Фоменко И.А. Делигнификация подсолнечной лузги как исходная стадия ферментативного гидролиза / И.А. Фоменко, Л.А. Иванова, А.А. Мижева // Проблемы развития АПК региона. 2021. № 3. С. 170–175.

Информация об авторах

В. П. Вистовская – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бродильных производств и виноделия.

Д. С. Кожемякин – аспирант кафедры технологии бродильных производств и виноделия.

Е. П. Каменская – кандидат биологических наук, доцент кафедры технологии бродильных производств и виноделия.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

REFERENCES

1. Mukha, D.V., Kartamysheva, I.N. Technology of crop production, storage and processing and fundamentals of agriculture. Moscow, 2007. 580 pp. (in Russ.).
2. Arshad, M., Amjad, M. Medicinal use of Sunflower oil and present status of Sunflower in Pakistan: A review study. *Sci Tech Dev.* 2012;31(2):99-106. (in PK).
3. Kharkov, V.V., Tuntsev, D.V., Kuznetsov, M.G. Thermochemical processing of sunflower husks. *Vestnik of Kazan State Agrarian University.* 2018. (4(51)). 130-134. (in Russ.). DOI: 10.12737/article_5c3de39d111083.70940804.
4. Tuntsev, D.V., Kharkov, V.V., Kuznetsov, M.G. Processing sunflower husk into high strength coal briquettes. *Vestnik of Kazan State Agrarian University.* 2019. (4(56)). 86-90. (in Russ.).
5. Vanshin, V.V. Oil manufacturing: learning guide. Orenburg: OSU, 2015. 243 pp. (in Russ.).
6. Sashenкова, S.A., Ilyina, G.V., Ilyin, D.Yu., Dashkina, A.R. Technological methods of bioconversion of sunflower husk. *Niva Povolzhya.* 2020. (2). 52-57. (in Russ.).
7. Nikonov, I.N. Feeding of broilers when using the compound feeds containing soy and sunflower cakes. *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex - healthy food products.* 2017. (5). 34-38. (in Russ.).
8. Khusid, S.B., Gneush, A.N., Nesterenko, E.E. Sunflower husks as a source of functional feed additives. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University.* 2015. (107). 142-155. (in Russ.).
9. Vistovskaya, V.P., Kamenskaya, E.P., Kozhemyakin, D.S., Dikalova, E.S. Development of a multienzymatic composition for brewer's spent grain hydrolysis through the use of mathematical modeling methods. *Polzunovskiy vestnik.* 2023. (3). 134-141. (in Russ.). DOI: 10.25712/ASTU.2 072-8921.2023.03.018.
10. Fomenko, I.A., Ivanova, L.A. Sunflower husk delignification as the initial stage of enzymatic hydrolysis. *Problems of development of agro-industrial complex of the region.* 2021. (3). 170-175. (in Russ.).

Information about the authors

V.P. Vistovskaya - candidate of technical sciences, associate professor at the Department of Technology of Fermentation and Winemaking.

D.S. Kozhemyakin - postgraduate student at the Department of Technology of Fermentation and Winemaking.

E.P. Kamenskaya - candidate of biological sciences, associate professor at the Department of Technology of Fermentation and Winemaking.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК005.6:664
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.013

EDN: VQOOZB

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ SMED

Евгения Олеговна Ермолаева ¹, Елена Юрьевна Титоренко ²

¹ Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

¹ eeo38191@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2312-7955>

² Кемеровский государственный медицинский университет, Кемерово, Россия

² lok-13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5635-2054>

Аннотация. Актуальность совершенствования методов обеспечения безопасности с помощью инструментов бережливого производства обусловлена тем, что в современных условиях жёсткой конкуренции повышение эффективности деятельности предприятия возможно только при внедрении новых методов организации производства. Возможность сократить ресурсы дает бережливое производство, которое используется в целях экономического развития, которое оказывает положительное влияние на организацию производства, а также позволяет сократить ряд проблем и сокращения затрат производства. Целью исследования стала актуализация направления практического применения существующей системы SMED на предприятиях пищевой промышленности, в том числе АПК. Объектом представленного исследования послужили линия по фасовке и упаковке молока, сотрудники предприятия молочной промышленности. В рамках данной статьи был применен один из инструментов бережливого производства – система SMED, которая предполагает быструю переналадку оборудования. В результате проведенных исследований на предприятии молочной промышленности на участке фасовки и упаковки молока внедрена система SMED, направленная на сокращение времени настройки или переналадки оборудования. Данная система позволила по-новому посмотреть на процесс переналадки оборудования. Благодаря внедрению данной системы сократилось время простоев линии фасовки и упаковки, что сделало работу более равномерной. За счет упрощения процесса наладки повысилась безопасность производства, т.е. сократилось количество несчастных случаев и травм на производстве. Как результат – значительно увеличилась производительность, снизилась себестоимость изготавливаемой продукции, повысились эффективность производства и конкурентоспособность организации в целом.

Применение инструментов и методов бережливого производства в рамках производственных предприятий имеет ряд положительных моментов, одним из основных является повышение конкурентоспособности предприятия.

Ключевые слова: бережливое производство, производство молока, оптимизация потока, потери, быстрая переналадка оборудования, система SMED, обеспечение безопасности.

Для цитирования: Ермолаева Е. О., Титоренко Е. Ю. Совершенствование методов обеспечения безопасности при эксплуатации оборудования с применением SMED // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 110–119. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.013. EDN: <https://elibrary.ru/VQOOZB>.

Original article

IMPROVEMENT OF SAFETY METHODS IN THE OPERATION OF EQUIPMENT USING SMED

Evgeniya O. Ermolaeva ¹, Elena Yu. Titorenko ²

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

¹ eeo38191@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2312-7955>

² Kemerovo State Medical University, Russia

² lok-13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5635-2054>

© Ермолаева Е. О., Титоренко Е. Ю., 2025

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ SMED

Abstract. The relevance of improving safety methods using lean manufacturing tools is due to the fact that in modern conditions of fierce competition, increasing the efficiency of an enterprise is possible only with the introduction of new methods of production organization. The opportunity to reduce resources is provided by lean manufacturing, which is used for economic development, which has a positive impact on the organization of production, as well as reduces a number of problems and reduces production costs. The purpose of the study was to update the direction of practical application of the existing SMED system in the food industry, including the agro-industrial complex. The object of the presented research was the line for packaging and packaging of milk, employees of the dairy industry enterprise. Within the framework of this article, one of the lean manufacturing tools was used - the SMED system, which provides rapid equipment changeover. As a result of the research conducted at the dairy industry enterprise, the SMED system was introduced at the milk packing and packaging site, aimed at reducing the time of setting up or reconfiguring equipment. This system allowed us to take a fresh look at the process of equipment changeover. Thanks to the introduction of this system, the downtime of the packing and packaging line has been reduced, which has made the work more uniform. Due to the simplification of the setup process, production safety has increased, i.e. the number of accidents and injuries at work has decreased. As a result, productivity has significantly increased, the cost of manufactured products has decreased, production efficiency and competitiveness of the organization as a whole have increased. The use of lean production tools and methods within production enterprises has a number of positive aspects, one of the main ones is to increase the competitiveness of the enterprise.

Keywords: lean manufacturing, milk production, flow optimization, losses, rapid equipment changeover, SMED system, safety assurance.

For citation: Ermolaeva, E. O. & Titorenko, E. Yu. (2025). Improvement of safety methods in the operation of equipment using SMED. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 110-119. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.013. EDN: <https://elibrary.ru/VQOOZB>.

ВВЕДЕНИЕ

Кризисные явления в экономике и, как следствие, замедление темпов экономического роста требуют от руководства предприятий пищевой промышленности поиска способов оптимизации всех процессов. Бережливое производство (lean production) как концепция повышения эффективности компании в кризисных условиях зарекомендовала себя давно. Также данная модель lean production не является первопричиной эффективной работы компаний, она лишь дает инструменты, которые помогают компаниям быть еще эффективнее [1].

В соответствии с данными статистики, ежегодно в Российской практике увеличивается число компаний, совершенствующих системы менеджмента качества на основании концепции бережливого производства [2]. Подтверждением может служить множество исследований по внедрению принципов бережливого производства в различных отраслях промышленности и сферы услуг, например, в медицинских организациях [3, 4, 5, 6], на предприятиях угольной промышленности [7, 8], как в промышленных компаниях, так и в сфере государственного управления и бюджетных учреждений [9, 10, 11], транспортных компаниях [12, 13, 14, 15], строительстве [16, 17], образовании [18], в сфере бизнеса [19, 20] и др. Значительное количество предприятий различных сфер деятельности внедряет концепцию бережливого производства в работу, что нельзя сказать о пищевой промышленности [21, 22]. Таким образом, адаптация lean-инструментов на предприятиях, произ-

водящих пищевую продукцию, является актуальной темой для исследования.

Также стоит отметить, что органы государственной власти оказывают поддержку компаниям, стремящимся к внедрению бережливого производства на своем производстве, доказательством чего является Федеральный проект «Системные меры по повышению производительности труда», направленный на создание условий для повышения производительности труда, которая ставит одной из своих задач обучение компаний снижению рисков и издержек.

Бережливое производство применяется на предприятиях пищевой и перерабатывающей промышленности для достижения постоянного улучшения и стремления к устранению различного рода потерь производства. Согласно концепции «Lean», или бережливого производства, к таким потерям относятся восемь видов потерь:

- перепроизводство – продукт/услуга производится в большем объеме, чем требуется потребителю;
- избыток запасов – хранение любых запасов в количестве, существенно превышающем минимально необходимое;
- транспортировку – лишнее движение материалов, продукции, информации;
- задержки – большие простои между этапами производства продукта/выполнения услуги;
- дополнительную обработку – лишняя обработка/действия из-за несоответствующих инструментов или плохой конструкции продукта (из-за несоответствующего планирования и проектирования услуги);

- перемещения – лишние движения человека, потери при подборе материалов, поиске компонентов, инструментов, информации, документов;

- дефекты – доработка и отбраковка несоответствующей продукции/ненадлежащее выполнение услуги [23, 24].

Потери из-за переналадок и регулировок оборудования относятся к задержкам, потерям времени с момента окончания производства предыдущей партии до момента получения первого годного изделия следующей партии. Переналадка состоит не только из операций по демонтажу/монтажу оснастки, но и из подготовительных работ. В процесс подготовки входят очистка станков, подгонка и проверка функционирования, кроме того, много времени уходит на поиск нужных инструментов и приспособлений, отвинчивание и завинчивание болтов и гаек и т.д.

Главной задачей исследования потерь данного вида является поиск наилучшего способа переналадки и замены режущего инструмента и сведение потерь от регулировок до нуля. Для решения этой задачи используют методику быстрой переналадки (SMED – Single minute exchange of dies), которая позволяет сократить время переналадки [25].

Условия эффективного осуществления SMED:

- оборудование должно быть подготовлено, а участники процесса обучены;
- каждый работник осведомлен о своей задаче и последовательности действий для ее выполнения;
- в работе используется механизированный инструмент и быстросъемные соединения в целях замены деталей или при переналадке [26].

Таблица 1 – Методы выявления проблем, влияющие на время выполнения операции

Table 1 – Methods for identifying problems affecting the operation execution time

Метод выявления проблемы	Описание метода
1	2
1. Разделение операции переналадки на внутренние и внешние	Необходимо выяснить, какие операции требуется выполнять исключительно при отключенном оборудовании, а какие допустимо выполнить, не прерывая работу оборудования. Оформить перечень технологического оснащения, которое требуется для осуществления переналадки оборудования. Банальной дифференциацией и координацией внешних и внутренних операций время внутренней переналадки возможно снизить на 30–50 %
2. Преобразование внутренних операций во внешние	Рассмотреть все внутренние операции на предмет проверки внутренних действий переналадки, которые по сути являются внешними. Для этого требуется проанализировать собранные данные и рассмотреть перспективу реализации элементов внутренней переналадки без остановки оборудования
3. Стандартизация функций	Стандартизация формы и размеров оснастки способна существенно уменьшить время наладки. Наряду с этим стандартизация формы предполагает существенные расходы, так как все штампы должны подходить для наибольшего применяемого размера. Стандартизация функции детали, чаще всего, не предполагает существенных расходов
4. Применение функциональных зажимов или полное устранение крепежа	Всевозможные методы закрепления в одно касание, с применением клиньев, пальцев и защелок или пружин как захватных приспособлений, соединяющие две детали, сокращают время установки до минимума

Итогом работ по внедрению SMED в процесс предполагается следующее:

- стандартизованный оптимальный порядок действий при выполнении переналадки, в том числе работ на подготовительном этапе, а также собственно смены инструмента или оснастки;
- стандартизованная продолжительность выполнения переналадки;
- стандартизованные места оснастки и выполнения внешних операций;
- стандартизированные способы подвоза оснастки для переналадки оборудования;
- стандартизация и сокращение объема партии и количества запасов изделий благодаря увеличению числа переналадок [27].

МЕТОДЫ

В основу написания исследовательской статьи легли современные работы российских и зарубежных ученых в области бережливого производства (Radu Godina, Andrei Bonamigo, Antonella Meneghetti, Векшина А.А., Дадонов, М.В., Ащеулов, А.С., Курмангулов, А.А., Маркова Н.А., Мирончук В.А., Федоськина Л.А. и др.). Необходимое обоснование теоретических выводов осуществляется путем применения общенаучных методов анализа и синтеза, вывода и индукции, научного абстрагирования и конкретизации.

Основные методы, которыми можно воспользоваться в рамках SMED с целью сокращения времени переналадки – это методы выявления проблем, влияющие на время выполнения операций по переналадке оборудования, которые представлены в таблице 1.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ SMED

Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

1	2
5. Использование дополнительных приспособлений	При обработке заготовки, закрепленной в стандартное приспособление, следующая заготовка устанавливается в такое же приспособление. По окончании обработки первой заготовки, второе приспособление без труда устанавливается на станок для обработки
6. Применение параллельных операций	В случае, если сокращение времени переналадки критичнее некоторого увеличения трудозатрат, существенный эффект даёт применение параллельных операций
7. Устранение регулировок	Установка и регулировка – две различные отдельные функции. Ненужные и излишние регулировки приводят к необоснованному увеличению времени внутренней наладки и предполагают большой опыт и высокопрофессиональные навыки оператора
8. Механизация	Механизация нередко способна разрешить большинство проблем эффективного использования крупных штампов, литейных и прессовых форм и т.п., например, при использовании давления воздуха и масла.

Стоит отметить, что оператор должен иметь среднее профессиональное образование и 5-й разряд, так как данный специалист производит настройку оборудования со сложными деталями, обработка которых предусматривает применение различного типа инструментов. В то же время стоит учесть, что в большинстве случаев у оператора-наладчика есть и основная выполняемая работа, а частичный перевод работ из внутренней переналадки во внешнюю не сократит его объем работ, так как теперь он будет выполнять те же действия, но при работающем оборудовании и в другом порядке [28]. Тем не менее, в случае резкого снижения времени переналадок частота их проведения существенно была увеличена (для обеспечения сокращения запасов заготовок), загруженность оператора может серьезно увеличиться и превзойти 100 %, что повлечет за собой нежелательные последствия, а именно – невыполнение плана. Таким образом, прежде всего при снижении времени переналадки путем разделения работ на внутреннюю и внешнюю переналадку и, как следствие, при нарастании общего количества переналадок требуется пересматривать объем работ оператора-наладчика. После целесообразно сокращать время действий по внутренней переналадке путем использования различных устройств и приспособлений [29].

В рамках данного исследования рассмотрено применение SMED как инструмента бережливого производства, объектом которого стал процесс замены фасовочной пленки на линии по разливу молока в пакеты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На подготовительном этапе было изучено текущее состояние процесса, на момент исследования на участке работало 4 оператора в 4 смены.

Выполнен хронометраж процесса перена-

ладки (с момента завершения производства изделия «А» до начала изготовления изделия «В»), детально зафиксированы все шаги (взял, закрепил, перешёл и т.п.). Процесс переналадки зарегистрирован на видео в целях создания необходимых условий для проведения дальнейшего анализа. На карте стандартизированной работы рисуется диаграмма спагетти и показываются все действия и перемещения оператора-наладчика по участку (рисунок 1). Для наглядности необходимо использовать разные цвета линий.

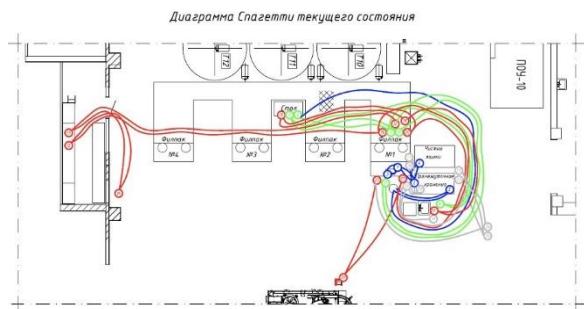


Рисунок 1 – Карта стандартизированной работы выполнения переналадки на участке «Фасовки и упаковки» предприятия молочной промышленности

Figure 1 – A map of the standardized work of performing changeover at the site of "Packing and packaging" of the dairy industry enterprise

На рисунке 1 синим цветом показаны действия оператора, связанные с выполнением циклической работы, зеленым цветом показаны действия, связанные с заменой даты при фасовке молочной продукции, красным цветом показаны действия, связанные с заменой пленки при смене продукта, серым цветом показаны действия, связанные с подвозом пустого поддона.

Далее требуется заполнить лист наблюдений всех работ по переналадке (таблица 2).

Таблица 2 – Лист наблюдений всех работ по переналадке

Table 2 – A list of observations of all changeover work

Обозначение на рис. 1	Действие оператора	Время операции, сек	Пройденное расстояние, м
1	Берет продукт с фасовочного стола	–	–
2	Кладет пакет в ящик	–	–
3	Взвешивает пакет	–	–
4	Берет пустые ящики	–	–
5	Переставляет стопку с фасованной продукцией	7	2
Процесс замены даты			
6	Идет за пассатижами	9	15
7	Достает матрицу	3	5
8	Охлаждение матрицы	16	6
9	Замена даты	585	9
10	Устанавливает матрицу	52	5
11	Возвращается на фасовку	–	–
Процесс замены пленки			
12	Снимает остаток пленки	18	5
13	Несет остаток пленки	6	15
14	Выбрасывает с новой бухты пленку	–	13
15	Берет новую бухту	–	–
16	Устанавливает бухту	58	15
17	Смачивает руки для пленки	12	6
18	Возвращается, смазывает пленку	–	–
19	Идет за скотчем	–	5
20	Склейивает пленку	8	5
21	Возвращается, промывает пленку	114	7
22	Выбрасывает промотанную пленку	68	10
23	Возвращается и приступает к работе	9	10
Процесс подвоза поддона			
24	Берет пластиковый поддон	4	5
25	Ставит	4	5
26	Берет деревянный поддон	8	10
27	Ставит	8	10
28	Берет молоток	–	–
29	Забивает гвозди	–	–
30	Кладет молоток	–	–
31	Моет руки	–	–
32	Начинает фасовку	–	–
		Итого	989
		163	

При заполнении листа переналадки необходимо отметить:

- линию, с которой и на которую производится переналадка, оборудование, наименования изделий, дату и время хронометража, ФИО наблюдателя/ей;
- действия операторов оборудования и их продолжительность;
- действия специализированного персонала (ремонтников, наладчиков и пр.), привлекаемого к процессу переналадки и их продолжительность;
- инструменты и материалы (наименование, количество), используемые для каждой операции при переналадке;
- при необходимости параметры технических условий переналадки (давление, температура и прочее).

Далее заполняется объединенная таблица

стандартизированной работы (рисунок 2). Для заполнения объединенной таблицы стандартизированной работы необходимо:

- расположить все действия по переналадке в хронологическом порядке;
- нанести продолжительность всех действий на шкалу времени;
- указать полное фактическое время переналадки и время фактическогоостояния оборудования.

На первом этапе проводится разделение внутренних и внешних работ. Все зафиксированные действия классифицируются на внутренние и внешние, а также на те, которые нужно обязательно сделать до остановки оборудования, во время остановки и после неё [30].

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ SMED

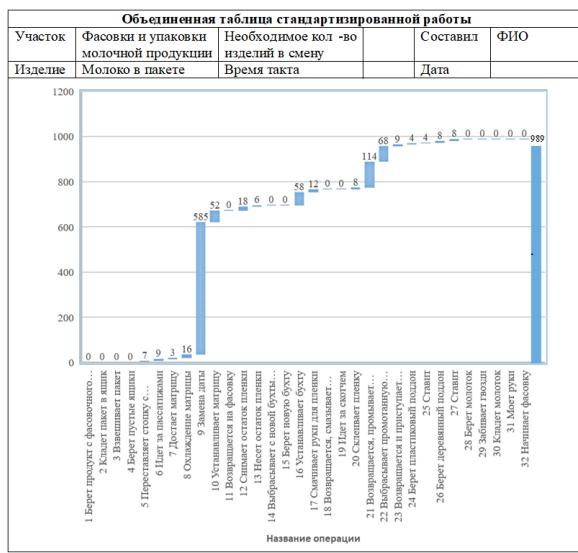


Рисунок 2 – Объединенная таблица стандартизированной работы

Figure 2 – Unified table of standardized work

С помощью контрольных листов, оптимизации транспортировки и функциональных проверок нужно провести разделение операционных задач на внутренние и внешние (рисунок 3).

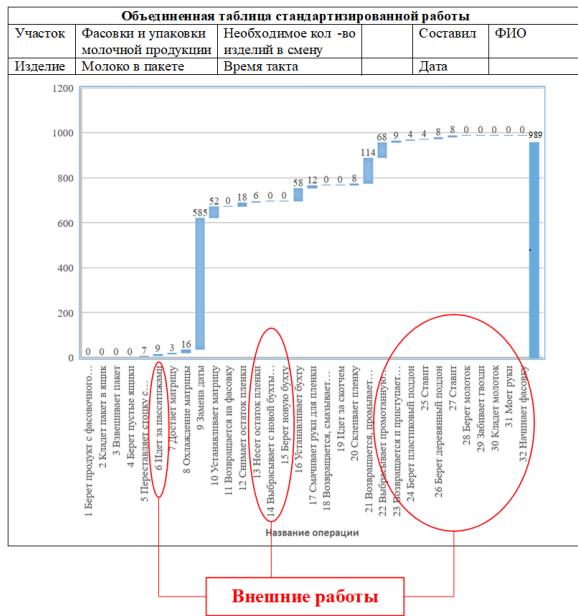


Рисунок 3 – Пример выделения внешних работ на объединенной таблице стандартизированной работы

Figure 3 – An example of highlighting external work on a combined standardized work table

На третьем этапе необходимо осуществить перевод внутренних работ во внешние, то есть выделить те действия, которые можно выполнить без остановки оборудования.

Во внутренней переналадке выделить работы, которые можно перевести во внешнюю

переналадку за счет реализации организационных или технических мероприятий:

- подготовку необходимых устройств эксплуатации заранее;
 - использование специализированных промежуточных приспособлений и вспомогательной оснастки, на которых предварительно центрируются, базируются и фиксируются детали оснастки, а затем производится замена всего комплекса приспособлений (инструментов);
 - подготовку материалов, инструмента до остановки оборудования;
 - уборку использованных штампов, оснастки, инструментов после окончания переналадки.

В рамках предприятия молочной промышленности на примере процесса фасовки молока в пакет были проведены следующие работы по переналадке:

1. Организация склада с адресным хранением пленки для фасовки молочной продукции в непосредственной близости от участка «Фасовки» позволяет снизить время на поиск нужной бухты с пленкой (рисунок 4).

Визуальный стандарт размещения упаковочной пленки на стеллажах по торговым маркам



Рисунок 4 – Пример расположения материалов на складе предприятия молочной промышленности

Figure 4 – An example of the location of materials in a warehouse of a dairy industry enterprise

2. Передача функции доставки пленки для фасования в службу логистики и подача необходимой модели пленки на стеллаж рядом с оборудованием, согласно текущему плану производства (количество бухт пленки соответствует заявки на смену) позволяет исключить потери времени оператора на переход на склад, а затем обратно.

3. Изготовление дополнительных комплектов шпилей позволяет работнику логистики установить их в бухты заранее, не отвлекая оператора от процесса переналадки.

4. Размещение в оборудование элемента быстрой склейки пленки (скотча), позволяет уменьшить время оператора на его поиск.

5. На случай неожиданной смены плана производства оператор с помощью сигнальной системы «Андон» может информировать работников службы логистики о необходимости до-

ставки бухты с пленкой. На рисунке 5 указаны примеры обозначения цветов системы визуального оповещения о возникающих проблемах.

6. Размещение ящиков с отходами рядом с участком позволяет снизить время на утилизацию отходов.

7. Передача всех операций, связанных с транспортировкой (утилизация пленки, подготовка тары, замена поддона полного на пустой) в службу логистики, позволяет сократить время общей переналадки за счет вывода ее во внешнюю.

В рамках проделанной работы время наладки снизилось, что отображено на рисунке 6.

Визуальное оповещение системы «Андон»

№ п/п	Цвет оповещения	Информационное сообщение
1	Красный	Отсутствие материала (поддона или пленки)
2	Желтый	Ожидание материала 60 сек (поддона или пленки)
3	Зеленый	Режим работы

Рисунок 5 – Пример обозначения сигнальных ламп «Андон»

Figure 5 – An example of the designation of signal lamps «Andon»

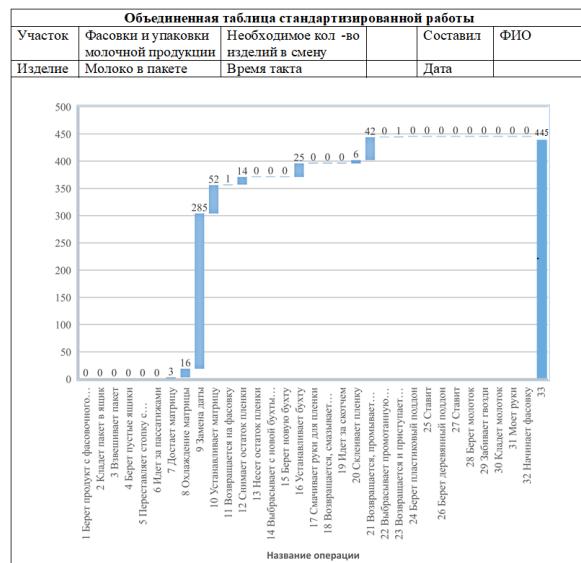


Рисунок 6 – Результаты снижения времени наладки после внедренных улучшений

Figure 6 – Results of reduced setup time after implemented improvements

После проведения работ по переводу внутренней переналадки во внешнюю на третьем этапе проведена стандартизация функции, а именно: работы, переведенные во внешние, зафиксированы в стандарте проведения переналадки. Для упорядочения данной работы со-

ставлены полные списки деталей и оснастки инструментов, необходимых для всех видов переналадок.

В стандарте прописана последовательность шагов, выполняемых наладчиком, время, затрачиваемое на это, и способ подачи сигналов другим участникам переналадки (при необходимости).

Разработка регламента взаимодействия по системе «Андон» и стандартов операционных процедур для всех участников позволяет закрепить наилучший опыт выполнения работ и укладываться в норматив времени переналадки оборудования.

После, на четвертом этапе, приступили к сокращению внутренних работ. Выработали решения, позволяющие ликвидировать корректировки, настройки, выполнение упрощенных фиксаций, организация параллельного выполнения работ и т.п. Проведен анализ работ, составляющих внутреннюю переналадку:

- сложные работы разбиты на элементарные (зажим, центровку, разметку, выброс, захват, удержание и т.п.);

- проведен анализ возможности унификации элементарных работ и соответствующих им приспособлений, используемых в разных переналадках (что позволяет минимизировать количество заменяемых деталей при переналадках или отказаться от переналадки как таковой).

Оптимизировали движения и перемещения персонала во время переналадки, привлекли дополнительный персонал для переналадки, а также минимизировали ожидания работниками друг друга.

Следующей задачей стало сокращение времени на настройку. Необходимо было сократить простой оборудования за счет минимизации времени (в идеале – до нуля), необходимого на настройку точности оборудования после завершения внутренней переналадки. При настройке операции повторяются несколько раз до тех пор, пока не будет получено годное изделие, что приводит к появлению «наладочного брака» и увеличению времени переналадки.

Была рассмотрена возможность минимизации настройки (в идеале – полный отказ от регулировок) за счет качественного выставления установочных параметров оборудования до его запуска. Для этого проведено следующее:

- откалиброваны (градуированы) приспособления и места их установки;
- использованы циферблочные мерительные инструменты;
- применены шаблоны;
- стандартизированы положения приспособлений и деталей.

В рамках сокращения внешних работ проведена выработка решений по улучшению логистики (подвоза оснастки, приспособлений, инструмента и т.п.), улучшению обслуживания, сокращению передвижений и т.п.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ SMED

Нельзя допустить ситуации, когда время внешней переналадки становится больше времени производства партии, и производственная линия вынуждена ждать окончания подготовительных операций.

Рассмотрены возможности сокращения времени и трудоёмкости внешних переналадок, а именно:

- организовано хранение необходимых материалов в непосредственной близости от оборудования;
- маркированы места хранения и объекты, которые там размещаются, цветными кодами или номерами.
- размещена оснастка согласно частоте её использования;
- упрощены операции внешней переналадки аналогично внутренней;
- изменены способы и маршруты транспортировки оснастки от места хранения до оборудования.

Последним этапом применения системы SMED стала стандартизация переналадки. В рамках данного этапа выполнено закрепление разработанных решений по ускорению переналадки и установление их как единственного правильного варианта выполнения данной работы. Стандарт представлен на рисунке 7. Стандарты запаяны ламинированной пленкой и размещены на рабочих местах, что позволяет исключить повреждения документа от внешних факторов и соблюдения санитарных норм.

Стандарт переналадки				
Цех	Цех производство молока			УТВЕРЖДАЮ
Участок	Автомат разливки продукции в полиглавую пленку			Начальник цеха
Операция	Замена даты		ФИО Средства индивидуальной защиты	
Исполнитель	Разработал	Согласовано		
	Начальник цеха	ФИО	Механик	ФИО
№ п/п	Действие	Исполнитель	Инструмент	Время, сек
1	Вынуть из автомата	Рукой нажать кнопку выключения автомата	Оператор фасовочного автомата	Пульт автомата
				3
2	Извлечь матрицу	Открыть дверцу отделения внесения даты. Пассатижами извлечь матрицу из автомата	Оператор фасовочного автомата	Пассатижи
				10
3	Заменить дату	В это же время нажать и вытащить винты винты зажимного болта, против часовой стрелки с помощью пинцета пропустив замену цифр в матрице, зажать цифры вправляем болт по часовой стрелке	Оператор фасовочного автомата	Отвертка
				220
4	Установить матрицу	С помощью пассатиж установить матрицу в датер	Оператор фасовочного автомата	Пассатижи
				150
				Дождаться нагрева матрицы

Рисунок 7 – Стандарт по замене даты на упаковке

Figure 7 – Standard for replacing the date on the package

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования на примере предприятия молочной отрасли на участке фасовки и упаковки молока в пакетах внедрен инструмент бережливого производства, а именно система SMED. Настоящая система дала возможность увидеть под другим углом и переосмыслить процесс переналадки оборудования. Благодаря применению данного инструмента

бережливого производства время простоев изучаемой линии сократилось, что сделало работу цеха более равномерной. До внедрения системы стандарт работы составлял 989 сек., после применения SMED он составил 445 сек., то есть сократился на 45 %. Благодаря упрощению процесса наладки повысились показатели безопасности производства (зафиксировано меньшее количество несчастных случаев и травм на производстве). В конечном счете, благодаря внедрению SMED увеличилась производительность, снизилась себестоимость изготавливаемой продукции на 12 %, повысилась эффективности производства и конкурентоспособность организации в целом.

Практическое значение заключается в том, что представленный опыт может быть использован на предприятиях пищевой промышленности, в том числе АПК, в целях сокращения потерь и повышения производительности и эффективности производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маюрикова Л.А., Алисова О.А., Крапива Т.В., Новоселов С.В. Формирование системы товародвижения на предприятиях общественного питания / Ползуновский вестник. 2019. № 1. С. 28–33.
2. Умалатов Р.С. Концептуальная модель измерений бережливого производства // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. № 12(1A). С. 267–278. doi: 10.34670/AR.2022.25.81.032.
3. Курмангулов А.А., Егоров В.А., Крошак Д.В. Совершенствование системы визуализации в ПМСП // Профилактическая медицина. 2024. № 27(1). С. 25–29. doi: 10.17116/profmed20242701125.
4. Patient Flow Optimization: SMED adoption in Emergency Care Units / A. Bonamigo [и др.] // IFAC-Papers OnLin. 2022. № 55(10). С. 204–209. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.09.391.
5. Система менеджмента качества в медицинской организации: от основ до процессной модели / И.В. Виноградова [и др.] // Вестник Авиценны. 2022. № 24(4). С. 479–490. doi: 10.25005/2074-0581-2022-24-4-479-490.
6. Федосыкина А.К., Федосыкина Л.А. Реализация бережливого подхода в контексте новой модели медицинской организации: итоги и перспективы // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. 2022. № 30(1). С. 39–50. doi: 10.17816/PAVLOVJ70181.
7. К вопросу применения принципов бережливого производства в процессе эксплуатации карьерных автосамосвалов на угольных разрезах / А.В. Кудреватых [и др.] // Уголь. 2024. № 1(1176). С. 64–69. doi: 10.18796/0041-5790-2024-1-64-69.
8. Возможности применения концепции бережливого производства в компаниях угольной промышленности / И.С. Брикошина [и др.] // Уголь. 2021. № 4(1141). С. 28–31. doi: 10.18796/0041-5790-2021-4-28-31.
9. Single Minute Exchange Die (SMED): A sustainable and well-timed approach for Bangladeshi garments industry / G.F.I. Toki [и др.] // Cleaner Engineering and Technology. 2023. № 12. С. 100592. doi: 10.1016/j.clet.2022.100592.
10. Воронова Е.Ю., Векшина А.А. Синергетический подход применения методологии бережливого производства в минимизации непроизводственных затрат // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 1(403). С. 22–32. doi: 10.47367/0021-3497_2023_1_22.
11. Маркова Н.А., Марков Д.А. Проблемы внедре-

ния концепции бережливого производства на предприятиях // Управлениец. 2018. № 9(6). С. 40–48. doi: 10.29141/2218-5003-2018-9-6-4.

12. Гагаринская Г.П., Ераносян Э.А., Курочкин Н.О. Специфика развития трудовых ресурсов транспортной компании в условиях цифровой трансформации общества и проекта «Бережливое производство» // Экономика и предпринимательство. 2024. № 1(162). С. 968–973. doi: 10.34925/EIP.2024.162.1.187.

13. Шишова Л.С., Пророков А.Н. Практика использования инструментов бережливого производства в транспортном строительстве // Транспортное дело России. 2023. № 1. С. 187–189. doi: 10.52375/20728689_2023_1_187.

14. Afonso M., Gabriel A.T., Godina R. Proposal of an innovative ergonomic SMED model in an automotive steel springs industrial unit // Advances in Industrial and Manufacturing Engineering. 2022. № 4. С. 100075. doi: 10.1016/j.aimse.2022.100075.

15. Applying the SMED Methodology to Tire Calibration Procedures / V. Santos [и др.] // Systems. 2022. № 10(6). С. 239. doi: 10.3390/systems10060239.

16. Беженцева Т.В. Применение элементов «Бережливого производства» как фактора повышения производительности труда в строительной организации // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2022. № 1. С. 17–22.

17. Афанасьев В.Я., Михалев Г.А. Интеграция механизмов бережливого производства при строительстве нефтегазовых скважин // Нефтяное хозяйство. 2021. № 11, С. 136–139. doi: 10.24887/0028-2448-2021-11-136-139.

18. «Фабрика процессов» – новый формат организации образовательного процесса в высшем учебном заведении / А.А. Курмангулов [и др.] // Высшее образование в России. 2018. № 27(5). С. 37–41.

19. Гайворонский Е.Р. Теоретические и методические основы управления бизнес-процессами современного предприятия на основе подхода «Управление бережливым производством» // Ученые записки Российской Академии предпринимательства. 2023. № 22(3). С. 57–64. doi: 10.24182/2073-6258-2023-22-3-57-64.

20. Шадрина А.В. Бережливое производство и мотивация персонала: ключевые факторы устойчивого развития организации // Финансовый бизнес. 2023. № 3(237). С. 138–140.

21. Разработка системы менеджмента безопасности пищевых продуктов при производстве функционального напитка / Е.Ю. Титоренко [и др.] // Пиво и напитки. 2021. № 3. С. 7–11. doi: 10.52653/PIN.2021.3.3.003.

22. Мирончук В.А., Шолин Ю.А., Сычанина С.Н. Бережливое производство как инструмент повышения производительности труда на предприятиях АПК России // Обзор практик. Экономика и предпринимательство. 2020. № 5 (118). С. 913–916. doi: 10.34925/EIP.2020.118.5.187.

23. Packaging and storage of products: opportunities and technologies / E.O. Ermolaeva [и др.] // Webology. 2021. № 18. (Special Issue). С. 207–221. doi: 10.14704/WEB/V18SI05/WEB18224.

24. Qiao X., Mazurchuk T.M. Improving the efficiency of the company based on the principles of lean manufacturing // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. № 13(2-1). С. 304–313. doi: 10.34670/AR.2023.40.30.027.

25. Тюлькина К.Л., Шеин А.В., Данилова С.Ю. Методика SMED (быстрая переналадка оборудования) // Молодежь и наука: шаг к успеху : Сборник научных статей 5-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск : Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 228–231.

26. Писаева А.А., Санникова Е.А. Быстрая переналадка SMED // Цифровая экономика: перспективы развития и совершенствования : сборник научных статей Международной научно-практической конференции.

Курск : Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 178–182. doi: 0.47581/2020/10.23.PS85/044.

27. Полякова С.В. Бережливое производство. Система SMED // Настоящее и будущее современных научных направлений : сборник материалов Международной научно-практической конференции. Кемерово : ООО «Западно-Сибирский научный центр», 2021. С. 68–72.

28. Designing the technology and composition of plant extracts using reduced atmospheric pressure / E. Titorenko [и др.] // Nexo Revista Científica. 2023. Т. 36. № 02. С. 139–147. doi: 10.5377/nexo.v36i02.16021.

29. Fonda E., Meneghetti A. The Human-Centric SMED // Sustainability. 2022. № 14(1). С. 514. doi: 10.3390/su14010514.

30. Бережливое производство как фактор повышения эффективности деятельности предприятия / Н.П. Агафонова [и др.] // Вестник академии знаний. 2022. № 50(3). С. 25–30.

Информация об авторах

Е. О. Ермоляева – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством» Кемеровского государственного университета.

Е. Ю. Титоренко – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Гигиена» Кемеровского государственного медицинского университета.

REFERENCES

1. Mayurnikova, L.A. (2019). Formation of a commodity distribution system at public catering enterprises / Polzunovsky Bulletin. 2019. No. 1. pp. 28–33. (In Russ.).
2. Umalatov, R.S. (2022). Conceptual model of lean manufacturing measurements. Economics: yesterday, today, tomorrow, 12(1A), 267–278. (In Russ.) doi: 10.34670/AR.2022.25.81.032.
3. Kurmangulov, A.A., Egorov, V.A., Krosheka, D.V. (2024). Improvement of the visualization system in PHC. Preventive medicine, 27(1), 25–29. (In Russ.). doi: 10.17116/profmed20242701125.
4. Bonamigo, A., Bernardes, P.M.M., Conrado, L.F., Torres, L.F., Calado R.D. (2022). Patient Flow Optimization: SMED adoption in Emergency Care Units. IFAC-Papers OnLine, 55(10), 204–209. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.09.391.
5. Vinogradova, I.V., Petrov, I.V., Almukhametov, A.A., Petrova, F.S. (2022). Quality management system in a healthcare organisation: from basics to operating model. Avicenna's Bulletin, 24(4), 479–490. (In Russ.). doi: 10.25005/2074-0581-2022-24-4-479-490.
6. Fedos'kina, A.K. & Fedos'kina, L.A. (2022). Implementation of the lean approach in the context of the new model of medical organization: results and prospects. Russian Medical and Biological Bulletin named after academician I.P. Pavlov, 30(1), 39–50. (In Russ.) doi: 10.17816/PAVLOVJ70181.
7. Kudrevatykh, A.V., Dadonov, M.V., Ashcheulov, A.S., Kudrevatykh, N.V. (2024). The issue of applying the principles of lean manufacturing in the operation of dump trucks at coal mines. Coal, 1(1176), 64–69. (In Russ.). doi: 10.18796/0041-5790-2024-1-64-69.
8. Brikoshina, I.S., Geokchakyan, A.G., Guseva, M.N., Malyshkin, N.G., Sycheva, S.M. (2021). Opportunities for applying the concept of lean management in coal industry companies. Coal, 4(1141), 28–31. (In Russ.). doi: 10.18796/0041-5790-2021-4-28-31.
9. Toki, G.F.I., Ahmed, T., Hossain, M.D.E., Alave, R.K.K.H., Faruk, M.D.O., Mia, R., Islam, S.R. (2023). Single Minute Exchange Die (SMED): A sustainable and well-timed approach for Bangladeshi garments industry.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ SMED

- Cleaner Engineering and Technology, 12, 100592. doi: 10.1016/j.clet.2022.100592.
10. Voronova, E.YU. & Vekshina, A.A. (2023). Synergistic approach to the use of lean manufacturing technologies in minimizing non-production costs. News of higher educational institutions. Textile industry technology, 1(403), 22-32. (In Russ.). doi: 10.47367/0021-3497_2023_1_22.
11. Markova, N.A. & Markov, D.A. (2018). Problems in implementing lean production at enterprises. The manager, 9(6), 40-48. (In Russ.). doi:10.29141/2218-5003-2018-9-6-4.
12. Gagarinskaya, G.P., Yeranosyan, E.A., Kurochkin, N.O. (2024). The specifics of the development of the transport company's workforce in the context of the digital transformation of society and the lean manufacturing project. Economics and entrepreneurship, 1(162), 968-973. (In Russ.). doi: 10.34925/EIP.2024.162.1.187.
13. Shishova, L. & Prorokov, A. (2023). The practice of using lean manufacturing tools in transport construction. Transport business of Russia, 1, 187-189. (In Russ.). doi: 10.52375/20728689_2023_1_187.
14. Afonso, M., Gabriel, A.T., Godina, R. (2022). Proposal of an innovative ergonomic SMED model in an automotive steel springs industrial unit. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 4, 100075. doi: 10.1016/j.aimse.2022.100075.
15. Santos, V., Sousa, V.F.C., Silva, F.J.G., Matias, J.C.O., Costa, R.D., Pinto, A.G., Campilho, R.D.S.G. (2022). Applying the SMED Methodology to Tire Calibration Procedures. Systems, 10(6), 239. doi: 10.3390/systems10060239.
16. Bezhentseva, T.V. (2024). Application of elements of «lean production» as a factor of increasing labor productivity in a construction organization. Competitiveness in the global world: economics, science, technology, 1, 17-22. (In Russ.).
17. Afanasyev, V.YA. & Mikhalev, G.A. (2021). Integration of lean manufacturing mechanisms in the construction of oil and gas wells. Oil industry, 11, 136-139. (In Russ.). doi: 10.24887/0028-2448-2021-11-136-139.
18. Kurmangulov, A.A., Reshetnikova, Ju.S., Bagirov, R.N., Frolova, O.I., Brynza, N.S. (2018). «Factory of processes» - a new format of educational process organization at higher education institution. Higher education in Russia, 27(5), 37-41. (In Russ.).
19. Gayvoronsky, E.R. (2023). Theoretical and methodological foundations of business process management of a modern enterprise based on the «Lean production management» approach. Scientific notes of the Russian Academy of Entrepreneurship, 22(3), 57-64. (In Russ.). doi: 10.24182/2073-6258-2023-22-3-57-64.
20. Shadrina, A.V. (2023). Lean production and staff motivation: key factors for sustainable development of the organization. Financial business, 3(237), 138-140. (In Russ.).
21. Lozano, J., Martinez, E., Blanco, J., Saenz-Diez, J.C., Jimenez, E. (2017). Integration of the SMED for the improvement of the supply chain management of spare parts in the food sector. Agricultural Economics, 63(8), 370-379. doi: 10.17221/69/2016-AGRICECON.
22. Mironchuk, V.A., Sholin, YU.A., Sychanina, S.N. (2020). Lean production as a tool for increasing labor productivity in the Russian agricultural sector. Overview of practices. Economics and entrepreneurship, 5 (118), 913-916. (In Russ.). doi: 10.34925/EIP.2020.118.5.187.
23. Ermolaeva, E.O., Dymova, Y.I., Trofimova, N.B., Ustinova, Y.V., Kozyakova, K.Y. (2021). Packaging and storage of products: opportunities and technologies. Webology, 18. (Special Issue), 207-221. doi: 10.14704/WEB/V18SI05/WEB18224.
24. Qiao, X. & Mazurchuk, T.M. (2023). Improving the efficiency of the company based on the principles of lean manufacturing. Экономика: вчера, сегодня, завтра, 13(2-1), 304-313. doi: 10.34670/AR.2023.40.30.027.
25. Tyul'kina, K.L., Shein, A.V., Danilova, S.Yu. SMED technique (fast equipment changeover). Collection of scientific articles of the 5th All-Russian Scientific Conference of promising developments of young scientists. «Youth and science: a step towards success» M.S. Razumov (Ed.). Kursk: Southwestern State University (In Russ.).
26. Piksaeva, A.A. & Sannikova, E.A. Quick changeover SMED. Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference «Digital economy: prospects for development and improvement». Kursk: Southwestern State University (In Russ.) doi: 10.47581/2020/10.23.PS85/044.
27. Polyakova, S.V. Lean production. SMED system. Collection of materials of the International scientific and practical Conference «The present and the future of modern scientific directions». Kemerovo: West Siberian Scientific Center (In Russ.).
28. Titorenko, E., Ermolaeva, E., Ivanov, P., Ustinova, Yu. (2023). Designing the technology and composition of plant extracts using reduced atmospheric pressure. Nexo Revista Cientifica, T. 36, № 02, 139-147. doi: 10.5377/nexo.v36i02.16021.
29. Fonda, E. & Meneghetti, A. (2022). The Human-Centric SMED. Sustainability, 14(1), 514. doi: 10.3390/su14010514.
30. Agafonova, N.P., Moroz, N.YU., Juganova, M.N., Mirabyan, M.YU. (2022). Lean manufacturing as a factor of improvement the efficiency of the company's activities. Bulletin of the academy of knowledge, 50(3), 25-30. (In Russ.).

Information about the authors

E.O. Ermolaeva - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Quality management» of the Kemerovo State University.

E.Yu. Titorenko - Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer of the Department of «Hygiene» of the Kemerovo State Medical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.661.3
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.014

EDN: VUMAXG

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГАЛЕТ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Александра Сергеевна Захарова ¹, Светлана Ивановна Конева ²

^{1,2} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ zakharovatpz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7571-0950>

² skoneva22@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6727-5979>

Аннотация. Представлены результаты исследований органолептических и физико-химических характеристик пищевых систем для проектируемых галет функционального назначения. Доказано, что внесение в пищевые системы от 2 % до 8 % яблочной клетчатки в качестве источника пищевых волокон позволяет повысить содержание последних на 1,7–6,6 % соответственно. Использование яблочной клетчатки ухудшало органолептические характеристики пищевых систем, способствуя их затемнению, цвет систем менялся на коричневый, появлялся яблочный привкус и аромат. При внесении 2–8 % яблочной клетчатки в пищевые системы их белизна снижалась на 32,9–90 %, водопоглощительная способность возрастала на 6–12 % относительно контрольного образца. Отмечено укрепление белково-протеиназного комплекса пищевых систем: содержание сырой клейковины снижалось на 1–5 %, качество – с 80 ед. ИДК до 59,2 ед. ИДК. Кислотность пищевых систем при внесении указанных дозировок яблочной клетчатки возрастала в 2,6–3,2 раза. Зафиксировано выраженное влияние яблочной клетчатки на число падения пищевых систем, данный показатель качества снижался на 1–10 % в зависимости от дозировки обогащающей добавки. Выработка опытных образцов галет на основе разработанных пищевых систем позволила сделать вывод о негативном влиянии яблочной клетчатки на органолептические характеристики готовой продукции, несмотря на привлекательный внешний вид опытных образцов, галеты с яблочной клетчаткой имели кислый вкус, что ухудшало потребительские достоинства продукта. Изучение физико-химических характеристик галет показало повышенную кислотность опытных образцов: 8,8 град при норме не более 2,5 град. В результате проведения целого ряда исследований был сделан вывод о нецелесообразности использования яблочной клетчатки в качестве источника пищевых волокон для пищевых систем, предназначенных для производства галет функционального назначения.

Ключевые слова: пищевые системы, яблочная клетчатка, пищевые волокна, галеты, характеристики, белково-протеиназный комплекс, обогащение, функциональные продукты питания.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (№ 075-03-2024-105, номер темы FZMM-2024-0003, рег. № НИОКР 124013000666-5).

Для цитирования: Захарова А. С., Конева С. И. Исследование характеристик пищевых систем для галет функционального назначения // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 120–126. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.014. EDN: <https://elibrary.ru/VUMAXG>.

Original article

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF FOOD SYSTEMS FOR FUNCTIONAL BISCUITS

Alexandra S. Zakharova ¹, Svetlana I. Koneva ²

^{1,2} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ zakharovatpz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7571-0950>

² skoneva22@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6727-5979>

© Захарова А. С., Конева С. И., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГАЛЕТ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Abstract. The results of studies of organoleptic and physico-chemical characteristics of food systems for designed biscuits for functional purposes are presented. It has been proved that the introduction of 2% to 8% of apple fiber into food systems as a source of dietary fiber makes it possible to increase the content of the latter by 1.7-6.6%, respectively. The use of apple fiber worsened the organoleptic characteristics of food systems, contributing to their darkening, the color of the systems changed to brown, and an apple flavor and aroma appeared. When 2-8% of apple fiber was introduced into food systems, their whiteness decreased by 32.9-90%, and their water absorption capacity increased by 6-12% relative to the control sample. The strengthening of the protein-proteinase complex of food systems was noted: the content of crude gluten decreased by 1-5%, and the quality increased from 80 units. IDC up to 59.2 units. IDC. The acidity of food systems increased by 2.6-3.2 times when the indicated dosages of apple fiber were applied. A pronounced effect of apple fiber on the number of drops in food systems was recorded, this quality indicator decreased by 1-10%, depending on the dosage of the enriching additive. The development of prototypes of biscuits based on the developed food systems allowed us to conclude that apple fiber has a negative effect on the organoleptic characteristics of the finished product, despite the attractive appearance of the prototypes, biscuits with apple fiber had a sour taste, which worsened the consumer benefits of the product. The study of the physico-chemical characteristics of ha-years showed an overestimated acidity of the prototypes: 8.8 degrees with a norm of no more than 2.5 degrees. As a result of a number of studies, it was concluded that it is impractical to use apple fiber as a source of dietary fiber for food systems designed for the production of functional biscuits.

Keywords: food systems, apple fiber, dietary fiber, biscuits, characteristics, protein-proteinase complex, enrichment, functional foods.

Acknowledgements: This work was supported by the project № 075-03-2024-105, FZMM-2024-0003, 124013000666-5 from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Zakharova, A. S. & Koneva, S. I. (2025). Investigation of the characteristics of food systems for functional biscuits. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 120-126. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.014. EDN: <https://elibrary.ru/VUMAXG>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации проводится целый ряд государственных мероприятий, направленных на повышение эффективности освоения Арктики. Среди задач, стоящих перед специалистами пищевой промышленности, одной из важнейших является обеспечение населения Арктической зоны полноценным, доступным, специализированным питанием, с помощью которого можно повысить терморегулирующие, адаптационные возможности организма, сохранить и укрепить здоровье людей, проживающих и работающих под воздействием экстремальных факторов этого региона [1].

Сложные климатические условия, особая фотопериодичность, космические факторы, низкая минерализация воды, удаленность населенных пунктов друг от друга, сложность доставки продуктов питания и многие другие факторы приводят к дефициту в рационе минеральных веществ: селена, железа, кальция, магния, калия, йода; витаминов С, В1, В2, РР, D, E, фолиевой кислоты, а также фосфолипидов и пищевых волокон [2].

Среди функциональных пищевых ингредиентов большое внимание в последнее время уделяется именно пищевым волокнам, которые оказывают выраженное физиологическое влияние на человеческий организм в целом, и на работу желудочно-кишечного тракта в частности. Известно, что эти вещества способствуют

выведению из организма некоторых метаболитов пищи и загрязняющих ее веществ, участвуют в регуляции физиологических, биохимических процессов в органах пищеварения [3].

При проведении работ, направленных на создание новых функциональных продуктов питания, профилактирующих алиментарнозависимые заболевания, характерные для Арктической зоны РФ, в качестве одного из источников пищевых волокон нами рассматривалась яблочная клетчатка.

Получают яблочную клетчатку из яблочного жмыха, который остается после отжима яблок на предприятиях по производству соков. Это красновато-коричневый порошок, с выраженным яблочным вкусом и ароматом, которые делают яблочную клетчатку привлекательным сырьем для обогащения кондитерских изделий.

Яблочная клетчатка – ценный источник пищевых волокон, особая ее ценность заключается в том, что она содержит как растворимые, так и нерастворимые пищевые волокна.

Основной компонент яблочной клетчатки – пектин. Известно, что пектин способен в желудочно-кишечном тракте связывать тяжелые металлы и радионуклиды, продукты обмена микроорганизмов, желчные кислоты, образуя комплексы, которые впоследствии выводятся из человеческого организма естественным путем.

Гемицеллюлоза, второй по распространенному типу пищевых волокон в яблочной клетчатке, и целлюлоза, которая также присутствует в данной обогащающей добавке, способ-

ны впитывать достаточно большой объем воды, что способствует перистальтике желудочно-кишечного тракта, профилактируя запоры, дивертикулы, колиты и т.д. [3, 4].

Несмотря на безусловно полезные свойства яблочной клетчатки, внесение ее в состав пищевых систем для использования в качестве рецептурного ингредиента для производства функциональных галет требует всестороннего изучения, так как пищевые волокна обладают выраженным технологическим действием, которое необходимо учитывать. Известно, что внесение в тесто растворимых пищевых волокон (в составе яблочной клетчатки до 15 %), увеличивает влагоудерживающую способность полуфабрикатов, изменяет их реологические характеристики, способствует продлению свежести мучной продукции, а использование в качестве обогащающих добавок нерастворимых пищевых волокон снижает калорийность кондитерских изделий, может сделать изделие излишне твердым, хрупким [5]. Таким образом, целью представленного исследования являлось изучение качественных характеристик пищевых систем с 2–8 % яблочной клетчатки в качестве источника пищевых волокон при производстве галет функционального назначения.

МЕТОДЫ

Исследования проводились на базе Центра комплексных исследований и экспертной оценки пищевой продукции «АлтайБиоЛакт» Алтайского государственного технического университета имени И.И. Ползунова.

Объектами исследований, соответствующими требованиям действующей нормативной документации, являлись:

- пшеница (*Triticum aestivum* L.) в виде муки пшеничной хлебопекарной первого сорта под торговым наименованием «Алейка» по ГОСТ 26574-2017 (далее по тексту мука пшеничная);
- яблочная клетчатка под торговым наименованием «Vitafeelosofy» по ТУ 10.61.40.-001-52071908-2021 (далее по тексту яблочная клетчатка);
- пищевые системы (далее по тексту ПС) на основе муки пшеничной и яблочной клетчатки: ПС № 1 включала в состав 100 % муки пшеничной и 0 % яблочной клетчатки, ПС № 2–98 % муки пшеничной и 2 % яблочной клетчатки, ПС № 3 – 96 % муки пшеничной и 4 % яблочной клетчатки, ПС № 4–94 % муки пшеничной и 6 % яблочной клетчатки, ПС № 5–92 % муки пшеничной и 8 % яблочной клетчатки;
- галеты, полученные из ПС № 1 (контроль) и ПС № 4 (опытный образец).

Для изучения органолептических и физико-химических показателей качества ПС были использованы методики согласно следующей действующей документации: ГОСТ 9404-88 «Мука и отруби. Метод определения влажности», ГОСТ 26361-2013 «Мука. Метод определения белизны», ГОСТ 27493-87 «Мука и отру-

би. Метод определения кислотности по болтушке», ГОСТ 27558-87 «Мука и отруби. Методы определения цвета, запаха, вкуса и хруста», ГОСТ 27839-2013 «Мука пшеничная. Методы определения количества и качества клейковины», ГОСТ ISO 3093-2016 «Зерно и продукты его переработки. Определение числа падения методом Хагберга-Пертена» [6–11]. Водопоглощительная способность ПС определялась по общепринятой в отрасли методике путем измерения количества воды, пошедшей на замес теста заданной консистенции. Содержание пищевых волокон определяли расчетным путем [12].

Галеты выпекали в хлебопекарной печи конвекционного типа UNOX XB 693 по традиционной технологии, используя опарный способ тестоприготовления с добавлением яблочной клетчатки в количестве 6 % взамен части муки на этапе замеса теста (на основе ПС № 4). В качестве контрольного образца использовали галеты из муки пшеничной без обогащающих добавок (на основе ПС № 1). Для оценки качества галет использовали стандартные методики, согласно ГОСТ 5897-90 «Изделия кондитерские. Методы определения органолептических показателей качества, размеров, массы нетто и составных частей», ГОСТ 5898-2022 «Изделия кондитерские. Методы определения кислотности и щелочности», ГОСТ 5900-2014 «Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ», ГОСТ 10114-80 «Изделия кондитерские мучные. Метод определения намокаемости» [13–16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты изучения влияния яблочной клетчатки на содержание пищевых волокон в пищевых системах для проектируемых галет функционального назначения приведены на рисунке 1.

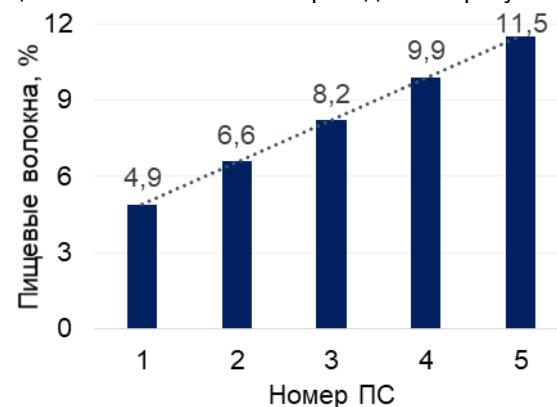


Рисунок 1 – Влияние яблочной клетчатки на содержание пищевых волокон в пищевых системах

Figure 1 – The effect of apple fiber on the content of dietary fiber in food systems

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГАЛЕТ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Как видно из представленных данных, яблочная клетчатка в количестве 2–8 % взамен части муки пшеничной в составе исследуемых пищевых систем способствовала увеличению содержания пищевых волокон на 1,7–6,6 %. Вероятно, это связано с высоким содержанием пищевых волокон в используемой обогащающей добавке по сравнению с заменяемой мукой пшеничной.

Органолептическая оценка качества пищевых систем позволила установить, что яблочная клетчатка способствовала их затемнению, что хорошо коррелирует с полученными данными по изучению влияния яблочной клетчатки на белизну пищевых систем, представленными на рисунке 2. Коричневые частицы яблочной клетчатки придавали пищевым системам соответствующий оттенок прямо пропорционально количеству вносимой обогащающей добавки. Использование яблочной клетчатки в количестве 4–8 % придавало исследуемым пищевым системам легкий яблочный аромат и послевкусие, которые также усиливались пропорционально ее количеству.

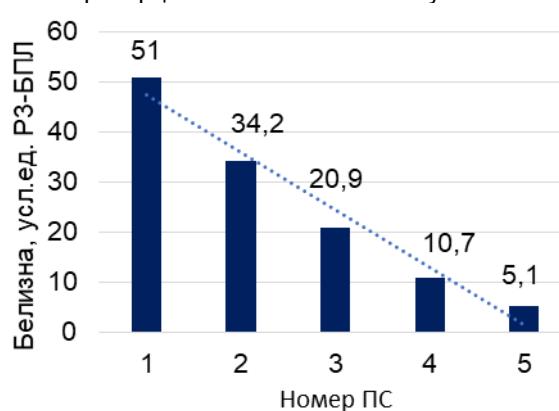


Рисунок 2 – Влияние яблочной клетчатки на белизну пищевых систем

Figure 2 – The effect of apple fiber on the whiteness of food systems

Как видно из данных, приведенных на рисунке 2, использование яблочной клетчатки в количестве 2–8 % взамен части муки пшеничной закономерно снижало белизну пищевых систем на 32,9–90 %, что связано с различной отражательной способностью частиц обогащающей добавки и муки пшеничной.

Результаты изучения влияния яблочной клетчатки на водопоглотительную способность пищевых систем наглядно представлены на рисунке 3.

Включение в состав пищевой системы яблочной клетчатки способствовало увеличению водопоглотительной способности, т.к. высокое содержание растворимых и нерастворимых пищевых волокон в составе обогащающей добавки увеличивало количество воды, необходимой для замеса теста с заданными структурно-механическими характеристиками. В целом,

увеличение данного показателя качества составило от 6 % до 12 % по сравнению с ПС № 1 в зависимости от дозировки клетчатки.

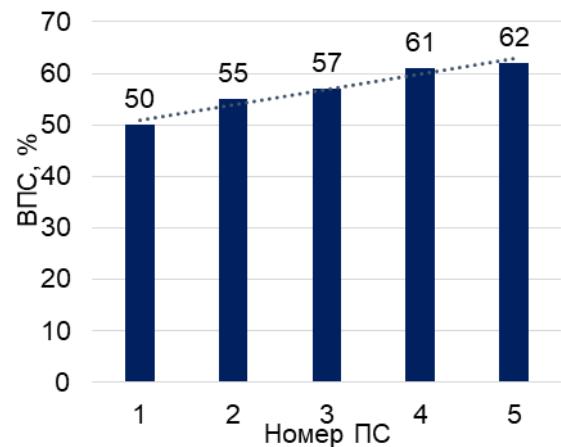


Рисунок 3 – Влияние яблочной клетчатки на водопоглотительную способность пищевых систем

Figure 3 – The effect of apple fiber on the water absorption capacity of food systems

Полученные результаты показали выраженное влияние яблочной клетчатки на процессы тестообразования. Поэтому следующим этапом исследований являлось изучение ее влияния на белково-протеиназный комплекс пищевых систем. Изучение влияния яблочной клетчатки на количество сырой клейковины и ее качество приведено на рисунках 4 и 5.

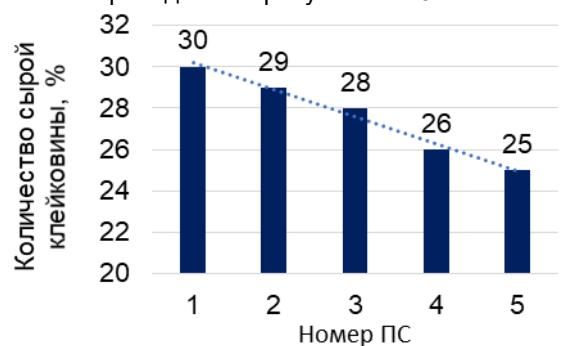


Рисунок 4 – Влияние яблочной клетчатки на количество сырой клейковины пищевых систем

Figure 4 – The effect of apple fiber on the amount of raw gluten in food systems

Проведенные исследования показали, что внесение в пищевые системы яблочной клетчатки снижает количество сырой клейковины, поскольку мы вносим взамен части муки продукт, не содержащий клейковинообразующие белки. Снижение данного показателя качества было зафиксировано на 1–5 % относительно ПС № 1.

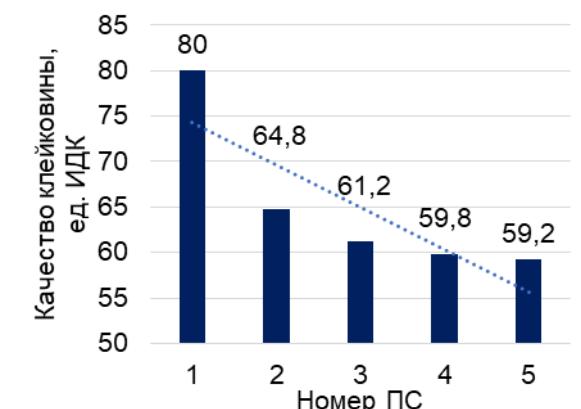


Рисунок 5 – Влияние яблочной клетчатки на качество сырой клейковины пищевых систем

Figure 5 – The effect of apple fiber on the quality of raw gluten in food systems

Помимо изменения количества сырой клейковины было зафиксировано укрепление клейковины, качество которой снизилось с 80 ед. ИДК до 59,2 ед. ИДК. Вероятно, изменение качества клейковины связано с тем, что при внесении яблочной клетчатки в пищевую систему наблюдается сдвиг в окислительно-восстановительной системе последней в сторону окислительного действия, поскольку используемая обогащающая добавка имеет достаточно большое количество органических кислот в своем составе, что упрочняет структуру белковых веществ и снижает протеолиз.

Изменение кислотности пищевых систем при внесении яблочной клетчатки приведено на рисунке 6.

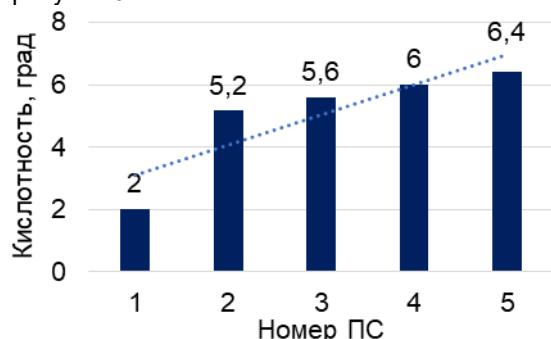


Рисунок 6 – Влияние яблочной клетчатки на кислотность пищевых систем

Figure 6 – The effect of apple fiber on the acidity of food systems

Яблочная клетчатка, содержащая в своем составе до 2,3 г органических кислот на 100 г продукта, существенно увеличивала кислотность пищевых систем: при внесении 2 % обогащающей добавки данный показатель возрастал в 2,6 раза, при внесении 4 % и 6 % – в 2,8 и

3 раза соответственно, использование 8 % – в 3,2 раза. Полученные результаты подтверждают сделанное ранее предположение об изменении кислотности пищевой систем при внесении яблочной клетчатки.

Для изучения влияния яблочной клетчатки на автолитическую активность пищевых систем было определено число падения в ПС № 1–5. Результаты, представленные на рисунке 7, свидетельствуют о некотором снижении числа падения при внесении яблочной клетчатки в количестве 2–8 % взамен части муки пшеничной в пищевую систему. Снижение составляло от 1 % до 10 %. Вероятно, это связано с изменением консистенции водно-мучной клейстеризованной суспензии при внесении пищевых волокон яблочной клетчатки.

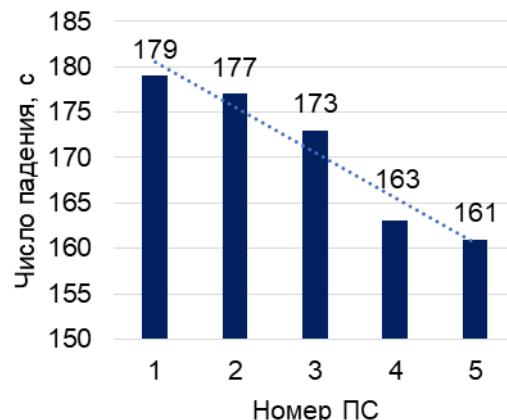
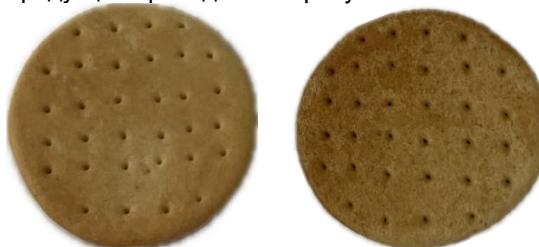


Рисунок 7 – Влияние яблочной клетчатки на число падения пищевых систем

Figure 7 – The effect of apple fiber on the number of diseases of food systems

Несмотря на то, что все опытные пищевые системы имели неподходящие для производства галет качественные характеристики, а именно завышенную кислотность и крепкую клейковину, была произведена выработка опытных образцов галет с использованием ПС № 1 (контроль) и ПС № 4 (опытный образец). Фотографии полученной продукции приведены на рисунке 8.



Контроль Опытный образец
Рисунок 8 – Фотографии галет.

Figure 8. Photos of biscuits

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГАЛЕТ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Полученные изделия имели привлекательный внешний вид, в изломе были слоистыми, с равномерной пористостью, без вздутий, закала и следов непромеса. Цвет опытного образца был более темный, чем у контрольного образца, на его поверхности были заметные вкрапления серо-коричневого цвета. Оба образца галет имели приятный аромат, однако использование яблочной клетчатки способствовало появлению у галет кислого вкуса, что ухудшало потребительские достоинства продукта.

В ходе изучения физико-химических показателей качества полученных галет было установлено, что использование ПС № 4 способствовало некоторому увеличению влажности готовой продукции благодаря повышенной водопоглотительной способности. Намокаемость обоих образцов находилась примерно на одном уровне, однако кислотность опытного образца составляла 8,8 град, при норме для данной группы продукции не более 2,5 град.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены зависимости органолептических характеристик пищевых систем от количества вносимой яблочной клетчатки при их производстве.

Установлены закономерности влияния яблочной клетчатки на белизну, водопоглотительную способность, количество и качество сырой клейковины, кислотность и число падения пищевых систем.

Доказано укрепление белково-протеинового комплекса пищевых систем при использовании яблочной клетчатки, что является преимуществом для использования данной обогащающей добавки в технологии галет, в производстве которых используют специальные добавки восстановительного действия.

Увеличение кислотности пищевых систем сверх рекомендуемых для пшеничной муки норм при внесении яблочной клетчатки не оказалось ожидаемого сокращения продолжительности брожения теста и способствовало ухудшению потребительских достоинств полученных опытных образцов галет.

Таким образом, в результате исследования органолептических и физико-химических характеристик пищевых систем для проектируемых функциональных галет было установлено, что использование яблочной клетчатки в качестве источника пищевых волокон нецелесообразно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка рецептуры комплексной пищевой физиологически функциональной системы с целью получения специализированных продуктов питания для населения Арктики / В.Г. Попов [и др.] // Ползуновский вестник. 2019. № 1. С. 90–95 doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2019.01.017.
2. Изучение питания, антропометрических показателей и состава тела у коренного и пришлого

населения российской Арктики / А.К. Батурин [и др.] // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 5. С. 11–16.

3. Броновец И.Н. Пищевые волокна – важная составляющая сбалансированного здорового питания / И.Н. Броновец // Медицинские новости. 2015. № 10. С. 46–48.

4. Роль пищевых волокон в коррекции пищеварения и запоров различной этиологии / Е.Ю. Плотникова [и др.] // Медицинский совет. 2019. № 14. С. 99–106. doi: 10.21518/2079-701X-2019-14-99-106.

5. Типсина Н.Н. Пищевые волокна в кондитерском производстве / Н.Н. Типсина, Н.В. Присухина // Вестник КрасГАУ. 2009. № 9. С. 166–171.

6. ГОСТ 9404-88. Мука и отруби. Метод определения влажности: введ.1990-01-01. Москва, 2007. 5 с.

7. ГОСТ 26361-2013. Мука. Метод определения белизны: введ.2014-07-01. Москва, 2014.19 с.

8. ГОСТ 27493-87. Мука и отруби. Метод определения кислотности по болтушке: введ.1989-01-01. Москва, 2007. 4 с.

9. ГОСТ 27558-87. Мука и отруби. Методы определения цвета, запаха, вкуса и хруста: введ. 1989-01-01. Москва, 2007. 4 с.

10. ГОСТ 27839-2013. Мука пшеничная. Методы определения количества и качества клейковины: введ. 1990-01-01. Москва, 2007. 9 с.

11. ГОСТ ISO 3093-2016. Зерно и продукты его переработки. Определение числа падения методом Хагберга-Пертена: введ. 2017-07-01. Москва, 2019. 16 с.

12. Скурихин И.М., Тутельян В.А. Химический состав российских продуктов питания: справочник. Москва: ДеЛиПринт, 2002. 236 с.

13. ГОСТ 5897-90. Изделия кондитерские. Методы определения органолептических показателей качества, размеров, массы нетто и составных частей: введ.1992-01-01. Москва, 2012. 8 с.

14. ГОСТ 5898-2022. Изделия кондитерские. Методы определения кислотности и щелочности: введ. 2023-01-01. Москва, 2022. 17 с.

15. ГОСТ 5900-2014. Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ: введ. 2016-07-01. Москва, 2019. 14 с.

16. ГОСТ 10114-80. Изделия кондитерские мучные. Метод определения намокаемости: введ. 2017-07-01. Москва, 2019. 16 с.

Информация об авторах

А. С. Захарова – кандидат технических наук, ст. науч. сотр. ЦКИ «АлтайБиоЛакт», доцент кафедры «Технология хранения и переработки зерна» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

С. И. Конева – кандидат технических наук, ст. науч. сотр. ЦКИ «АлтайБиоЛакт», доцент кафедры «Технология хранения и переработки зерна» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

REFERENCES

1. Development of the formulation of a complex food physiologically functional system in order to obtain specialized food products for the population of the Arctic / V.G. Popov [et al.] // Polzunovsky vestnik. 2019. (1). 90–95 (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2019.01.017.

2. The study of nutrition, anthropometric indicators and body composition in the indigenous and alien population of the Russian Arctic / A.K. Baturin [et al.] // *Questions of nutrition*. 2017. vol. 86. (5). 11-16. (In Russ.).
 3. Bronovets, I.N. Dietary fiber is an important component of a balanced healthy diet / I.N. Bronovets // *Medical news*. 2015. (10). 46-48.
 4. The role of dietary fibers in the correction of food poisoning and constipation of various etiologies / E.Y. Plotnikova [et al.] // *Medical Council*. 2019. (14). 99-106. doi: 10.21518/2079-701X-2019-14-99-106. (In Russ.).
 5. Tipsina, N.N. Dietary fiber in the confectionery industry / N.N. Tipsina, N.V. Prisukhina // *Bulletin of KrasGAU*. 2009. (9). 166-171.
 6. Flour and bran. Method for determining humidity: introduction (2007). GOST 9404-88 from 1 Jan. 1990. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).
 7. Flour. Method for determining whiteness. (2014). GOST 26361-2013 from 1 Jul. 2014. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).
 8. Flour and bran. The method of determining acidity by a chatterbox. (2007). GOST 27493-87 from 1 Jan. 1989. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).
 9. Flour and bran. Methods for determining color, smell, taste and crunch: introduction. (2007). GOST 27558-87 from 1 Jan. 1989. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).
 10. Wheat flour. Methods for determining the quantity and quality of gluten. (2007). GOST 27839-2013 from 1 Jan. 1990. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).
 11. Grain and its processed products. Determination of the number of falls of the Hagberg-Perten method.
- (2019). GOST ISO 3093-2016 from 1 Jul. 2017. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).
12. Skurikhin, I.M., Tutelyan, V.A. Chemical composition of Russian food products : handbook. Moscow : DeLiprint, 2002. 236 p.
 13. Confectionery products. Methods for determining organoleptic indicators of quality, size, net weight and components. (2012). GOST 5897-90 from 1 Jan. 1992. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).
 14. Confectionery products. Methods for determining acidity and alkalinity. (2022). GOST 5898-2022 from 1 Jan. 2023. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).
 15. Confectionery products. Methods for determining moisture and dry substances. (2019). GOST 5900-2014 from 1 Jul. 2016. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).
 16. Pastry flour products. Method for determining wetness. (2019). GOST 10114-80. from 1 Jul. 2017. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

Information about the authors

A.S. Zakharova - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher AltaiBioLact Central Research Institute, Associate Professor of the Department of Grain Storage and Processing Technology, Polzunov Altai State Technical University.

S.I. Koneva - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher AltaiBioLact Central Research Institute, Associate Professor 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 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ МАФФИНОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУФАБРИКАТА ИЗ АРБУЗНЫХ СЕМЯН

Вера Геннадьевна Курцева ¹, Марина Николаевна Колесниченко ²

^{1, 2} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ vera5399@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7101-4878>

² mar.kolesnichenko2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8843-4705>

Аннотация. В данной работе исследуется возможность использования арбузных семян для расширения ассортимента мучных кондитерских изделий и повышения их пищевой ценности. Также предложены рецептура и технология приготовления маффинов с добавлением растительного порошка из арбузных семян.

Арбузные семена содержат множество полезных веществ, включая белки, липиды (в том числе незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты), пищевые волокна и витамины (такие как каротиноиды, токоферолы, тиамин, рибофлавин, никотиновая и фолиевая кислоты), а также разнообразные макро- и микроэлементы, включая цинк, селен и марганец.

Применение измельченных арбузных семян в рецептурах мучных кондитерских изделий является важной задачей, так как это способствует улучшению их пищевой ценности.

Цель исследования состояла в разработке рецептуры маффинов с заменой дорогостоящего орехового сырья на порошок из семян арбуза. Данные исследования показали возможность добавления растительного порошка из семян арбуза в кексовое тесто для получения маффинов – в количестве 100 % взамен ядер кешью (полная замена), именно при такой дозировке обеспечиваются наилучшие показатели качества выпеченных образцов.

Рецептуру маффинов с порошком из арбузных семян можно рекомендовать для предприятий, производящих мучные кондитерские изделия.

Ключевые слова: кондитерские изделия, маффины, кексы, пищевая ценность, семена арбуза, растительный порошок, порошок из арбузных семян, рецептура, показатели качества.

Для цитирования: Курцева В. Г., Колесниченко М. Н. Мучные кондитерские изделия на основе полуфабриката из арбузных семян // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 127–135. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.015. EDN: <https://elibrary.ru/WQHNUU>.

Original article

FLOUR CONFECTIONERY PRODUCTS BASED ON SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM WATERMELON SEEDS

Vera G. Kurtseva ¹, Marina N. Kolesnichenko ²

^{1, 2} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ vera5399@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7101-4878>

² mar.kolesnichenko2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8843-4705>

Abstract. This paper explores the possibility of using watermelon seeds to expand the range of flour confectionery products and increase their nutritional value. A recipe and technology for making muffins with the addition of vegetable powder from watermelon seeds are also proposed.

Watermelon seeds contain many useful substances, including proteins, lipids (including essential polyunsaturated fatty acids), dietary fiber, minerals and vitamins (such as carotenoids, tocopherols, thiamine, riboflavin, nicotinic and folic acids), as well as various macro- and microelements, including zinc, selenium and manganese. The use of crushed watermelon seeds in flour confectionery recipes is an important task, since it helps to improve their nutritional value.

The purpose of the study was to develop a recipe for muffins with the replacement of expensive nut raw materials with watermelon seed powder. These studies have shown the possibility of adding watermelon seed powder to muffin dough to make muffins - in a quantity of 100% instead of cashew kernels (com-

plete replacement), it is at this dosage that the best quality indicators of baked samples are ensured. The recipe for muffins with watermelon seed powder can be recommended for enterprises producing flour confectionery products.

Keywords: confectionery, muffins, cupcakes, nutritional value, watermelon seeds, vegetable powder, watermelon seed powder, recipe, quality indicators.

For citation: Kurtseva, V. G. & Kolesnichenko, M. N. (2025). Flour confectionery products based on semi-finished watermelon seeds. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 127-135. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.015. EDN: <https://elibrary.ru/WQHNUU>.

ВВЕДЕНИЕ

Современная жизнь с ее неблагополучными условиями жизни, стрессами, нерациональным, несбалансированным питанием большинства жителей Российской Федерации требует создания новых продуктов с обогащением их состава необходимыми для физиологического благополучия организма макро- и микронутриентами. Одним из примеров такого обогащения может выступать возможность проектирования новых кондитерских изделий на основе полуфабрикатов из растительного сырья, в частности с использованием муки из арбузных семян. Объектом обогащения может быть любое печенье, ведь это продукт повседневного и массового спроса. Потому что оно, во-первых, отличается высокой энергетической ценностью, во-вторых, имеет приятные вкус и аромат, привлекательные для покупателей, при этом может употребляться в качестве десерта.

Поэтому не секрет, что сегодня расширение ассортиментной линейки мучных кондитерских изделий является важной задачей.

Проведенный литературный обзор свидетельствует о том, что разработке обогащенных кондитерских изделий посвящено множество научных публикаций, ассортимент этих изделий постоянно расширяется, и это немаловажно.

Мнение ведущих нутрициологов Российской Федерации (Шатнук Л.М., Позняковского В.М., Тутельяна В.А., Спирчева В.Б. и др.) заключается в том, что в третьем тысячелетии человек не может обходиться без функциональных пищевых продуктов в своём питании. Для нивелирования продуктов с низкой пищевой ценностью, коими и являются кондитерские изделия, необходима тщательная коррекция состава с целью повышения их микро- и макронутриентного статуса.

XXI век всё еще характеризуется негативными тенденциями в состоянии здоровья населения нашей страны: продолжительность жизни хоть и начала немногого расти, но вместе с ней и возрастает общая заболеваемость, среди основных причин которой является нездоровое питание, обусловленное как недостаточным потреблением пищевых веществ, в первую очередь полноценных белков, витаминов, минеральных веществ, так и нерациональным их соотношением. Для этого актуально снизить в

питании содержание сахара, обогащать его белковыми веществами, витаминами, минеральными веществами, пищевыми волокнами.

Люди часто путают названия «кексы», «маффины», «капкейки»... Но эти кондитерские изделия действительно немного отличаются между собой, несмотря на внешнюю похожесть. Маффинами называют низкокалорийный десерт, а в кексах по рецептуре содержится гораздо больше сахара, соответственно маффины более полезны для тех, кто волнуется о своем здоровье и переживает за свою фигуру. Текстура кексов более нежная и пористая, чем у маффина, это обусловлено технологией производства, но, используя некоторые технологические приёмы, можно и текстуру маффинов сделать более нежной. Кстати, название «кекс» пошло от английского слова «cakes», что в переводе звучит как «тортики» или «пирожные», действительно похож на маленький аккуратный тортик. А слово «маффин» в переводе со старофранцузского означает «мягкий» (хотя маффины пришли к нам из Англии), и изначально именно «мягким хлебом» называли этот продукт. Формочки для маффинов, специальные, небольшие, появились гораздо позже, чем сами маффины.

Что касается арбуза, то эту большую ягоду знают все. И большинство её очень любят. Чего не скажешь про арбузные семена. Все полезные компоненты арбуза содержатся как в мякоти, так и в семенах, а также в корке этого фрукта. Здесь мнения людей расходятся: одни люди эти побочные продукты выбрасывают, а другие съедают. И если с мякотью арбуза действительно всё понятно, она содержит много структурированной воды, витамины, минеральные вещества, нормализующие обмен веществ, то с косточками (семенами) арбуза не всё так гладко в понимании людей.

Поэтому на этих позициях интерес представляют именно семена арбуза, которые являются вторичным продуктом промышленной переработки при изготовлении фруктово-ягодных полуфабрикатов, но в основной своей массе они просто утилизируются. Причём, хоть арбузные семена не так популярны, как тыквенные, но в них много, а порой даже гораздо больше, чем в тыквенных, многих физиологически необходимых микронутриентов, например, фосфора, магния, железа и марганца. Един-

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ МАФФИНОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУФАБРИКАТА ИЗ АРБУЗНЫХ СЕМЯН

ственное только отличие, что арбузные семена содержат меньше калия, чем тыквенные.

Кроме того, мы считаем применение семян арбуза перспективным, поскольку в них содержится набор таких физиологически незаменимых, необходимых и активных веществ, как белки, жиры, пищевые волокна, минеральные микро- и макроэлементы, в том числе цинк, селен, витамины группы В (тиамин, рибофлавин), никотиновая и фолиевая кислоты, токоферолы, каротиноиды и полиненасыщенные жирные кислоты.

Из семян арбузов получают биологически активные добавки, которые назначаются при заболеваниях почек (уретрит, цистит, гломерулонефрит, мочекаменная болезнь и др. почечные заболевания) [1].

Например, арбузные семена содержат биологически активные вещества, которые способствуют повышению щелочности мочи и очищению мочеполовой системы: они помогают растворять солевые токсины в почках, которые затем выводятся с мочой. Кроме того, семена арбуза имеют мочегонное действие и обладают антисептическими и противовоспалительными характеристиками. На вкус они ничем не уступают семенам подсолнуха, их также можно жарить, сушить и подсаливать. Таким образом, можно с уверенностью утверждать о полезных свойствах арбузных семечек как в медицине, так и в кулинарии. Кстати, в Таиланде сушенные семена арбуза продаются в продуктовых магазинах и лавках, как и тыквенные. Поэтому в качестве нетрадиционного сырья в рецептуре маффинов мы решили использовать порошок из семян арбуза.

Целью данной работы являлось изучение влияния измельченных семян арбуза на органолептические, физико-химические показатели качества маффинов, а также на их пищевую ценность.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения нетрадиционного биологически активного вида арбузного сырья (порошок из измельченных семян арбуза) в качестве объекта исследования нами выбрана одна из разновидностей кексов – маффины.

В нашем исследовании применялся порошок из семян арбуза, полученный путем размола этих высушенных семян.

Мы разработали рецептуру и технологию маффинов, где вводили в их рецептуру порошок из арбузных семян в количестве от 12,5 до 100,0 % (полная замена) взамен ядер кешью (сырых) с интервалом варьирования 12,5 %.

В качестве контрольного образца (аналога) был взят кекс «Ореховый» по Сборнику рецептур [5, 6].

Исследования проводили на базе Института биотехнологии, пищевой и химической инженерии (ИнБиоХим) Алтайского государственного

технического университета им. И.И. Ползунова в 2023–2024 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве сырья для получения порошка из арбузных семян использовали семена арбузов, заготовленные в конце сентября в Угловском районе Алтайского края и хранившиеся при температуре 18–20 °C.

Принципиальная схема приготовления муки из семян арбуза в лабораторных условиях приведена на рисунке 1.

Поступившие на исследование арбузы промывали, нарезали на ломти. Далее семена отделяли от арбузной мякоти, проводили проверку на наличие повреждений или гниения семян, а затем их хорошо промывали и высушивали при комнатной температуре.

Затем обследовали высушенные семена на наличие сорных включений и примесей, дополнительно подсушивали их в течение 1,5 часов при температуре от 50 до 55 °C. Далее семена шли на измельчение, где размалывались до крупности детской и диетической муки (проход через сите № 27), а сход с сита в количестве не более 2 % отправляли на повторное домалывание.

После всех манипуляций порошок из арбузных семян был готов к использованию, а оставшаяся его часть шла на хранение.



Рисунок 1 – Технологическая схема получения муки из арбузных семян

Figure 1 – Technological diagram obtaining flour from watermelon seeds

На рисунке 2 представлен внешний вид порошка из арбузных семян.

В таблице 1 приведен химический состав по содержанию макро- и микронутриентов порошка из семян арбуза.

Изучение химического состава порошка из семян арбуза позволяет отметить, что этот полуфабрикат является несомненно богатым источником физиологически необходимых для организма человека белков, жиров, витаминов, макро- и микроэлементов, и ввиду своих органолептических показателей (кремовый цвет, приятный орехово-арбузный привкус и аромат) будет не менее благоприятным в рецептуре при замене им орехового сырья.



Рисунок 2 – Внешний вид арбузных семян и порошка из них

Figure 2 – Appearance of watermelon seeds and powder from them

Таблица 1 – Содержание макро- и микронутриентов порошка семян арбуза

Table 1 – Macro- and micronutrient content of watermelon seed powder

Наименование показателя	Содержание
Белки, г	28,33
Жиры, г	47,37
Углеводы, г	8,31
Клетчатка, г	7,65
Витамины, мг:	
В ₁ (тиамин)	0,19
В ₂ (рибофлавин)	0,15
РР (никотиновая кислота)	3,55
Макроэлементы, мг:	
К (калий)	54
Са (кальций)	648
Mg (магний)	515
Na (натрий)	99
P (фосфор)	755
Микроэлементы, мкг:	
Fe (железо)	7,28
Mn (марганец)	1,62
Cu (медь)	0,69
Zn (цинк)	10,24

Из таблицы видно, что семена арбуза отличаются значительной концентрацией белков и жиров. Жиры представлены наличием полиненасыщенной жирной кислоты (линолевой) и

достаточным количеством насыщенных жирных кислот, то есть семена арбуза могут смело рассматриваться как источники биологически активных веществ для пищевых продуктов функционального назначения.

Следующим шагом нашего изыскания стала разработка рецептур маффинов с добавлением порошка арбузных семян. После получения полуфабриката из арбузных семян в виде порошка мы пересмотрели рецепты производства маффинов, заменив ореховые ингредиенты на порошок из арбузных семян.

Чтобы получить маффины с семенами арбуза достойного качества, было проведено выпекание девяти образцов маффинов. В качестве контрольного образца нами был выбран кекс по рецептуре «Ореховый», но с уменьшенным выходом по массе (масса одной штуки 30 г). Был проведен перерасчет рецептуры маффинов с уменьшением количества орехового сырья.

Порошок из арбузных семян вводили в тесто в количестве 12,5; 25,0; 37,5; 50,0; 62,5; 75,0; 87,5 и 100,0 % за счёт орехового включения, поэтому был проведен перерасчет рецептур с уменьшением количества ядер кешью на данное количество.

Для подготовки рецептуры маффинов с введением порошка из семян арбуза пробные образцы выпекались в расчете на 200 г готовой продукции.

Выпекание маффинов проводилось согласно технологическим инструкциям для производства мучных кондитерских изделий, с использованием рецепта 85 (435) «Кекс «Ореховый» из сборника рецептов на торты, пирожные, кексы, рулеты, печенье, пряники, коврижки и сдобные булочные изделия [5, 6], который стал контрольным образцом.

Готовые образцы были оценены органолептически: анализировались вкус и аромат, поверхность, внешний вид в разрезе, структура, форма и цвет. Также были проведены физико-химические анализы, включая определение влажности, содержания общего сахара и жира, плотности, щелочности, доли золы и нерастворимых в соляной кислоте веществ.

Кроме того, мы посмотрели ненормируемый по ГОСТ показатель – содержание водорастворимых веществ, который косвенно является показателем усвояемости продукта.

Результаты исследований оказались схожи для всех образцов. Например, с увеличением количества добавляемого порошка из арбузных семян сладкий привкус у маффинов становился более выраженным, при этом хоть и со слабоватым, но с отчетливым привкусом орехов, что можно объяснить содержанием моно- и дисахаридов в семенах арбуза, именно они и придают выпеченному продукту неповторимую сладость.

Маффины хорошо взаимодействовали с порошком из арбузных семян. По структуре выпе-

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ МАФФИНОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУФАБРИКАТА ИЗ АРБУЗНЫХ СЕМЯН

ченные образцы маффинов в начале оставались мягкими и рассыпчатыми, но при увеличении дозировки порошка становились менее пористыми, более плотными, что становилось особо заметным у маффинов при добавлении, начиная от 75,0 %, порошка арбузных семян взамен кешию, они уже при этой дозировке тяжелее поддавались нарезанию, а на их поверхности отчетливо было заметно наличие вкраплений порошка из семян арбуза. Но это не снижало их ценность в соответствии со стандартом.

Такой показатель, как «поверхность» маффинов, также изменялся с добавлением вводимого порошка из арбузных семян: с увеличением этого ингредиента поверхность маффинов становилась более шероховатой и заметнее проявлялись видимые на поверхности вкрапления от семян арбуза.

При увеличении дозировки порошка из арбузных семян наблюдается потемнение цвета маффинов, при внесении уже 15 % цвет значительно менялся, а окрас становился темно-коричневым. Это связано с тем, что в порошке более темная окраска, чем в муке, но семена арбуза содержат и сахара, которые в процессе выпечки вступают в реакцию меланоидинообразования, и также влияют на цвет готовых изделий.

С увеличением добавляемого порошка из семян арбуза более выраженным и интенсивным становился запах, довольно ясно ощущался приятный орехово-арбузный аромат.

При введении 15 % порошка из семян арбуза начал изменяться размер маффинов в сторону уменьшения, видимо, начинался процесс затягивания, тесто становилось более обжимистым, и маффины стали терять объем и высоту.

Анализ качества показал, что количество добавляемого порошка из арбузных семян влияет на плотность маффинов: с увеличением дозировки данного компонента она стала снижаться. Плотность готовых изделий проводили по отношению массы маффинов к их объему. Изменение плотности выпеченных образцов показано на рисунке 3.

Уменьшение плотности маффинов можно объяснить тем, что при добавлении порошка из семян арбуза их структура становится слоистой и более рыхлой, на поверхности появляются трещины. Это позволяет продукту лучше впитывать воду, что, в свою очередь, приводит к увеличению его намокаемости и снижению плотности.

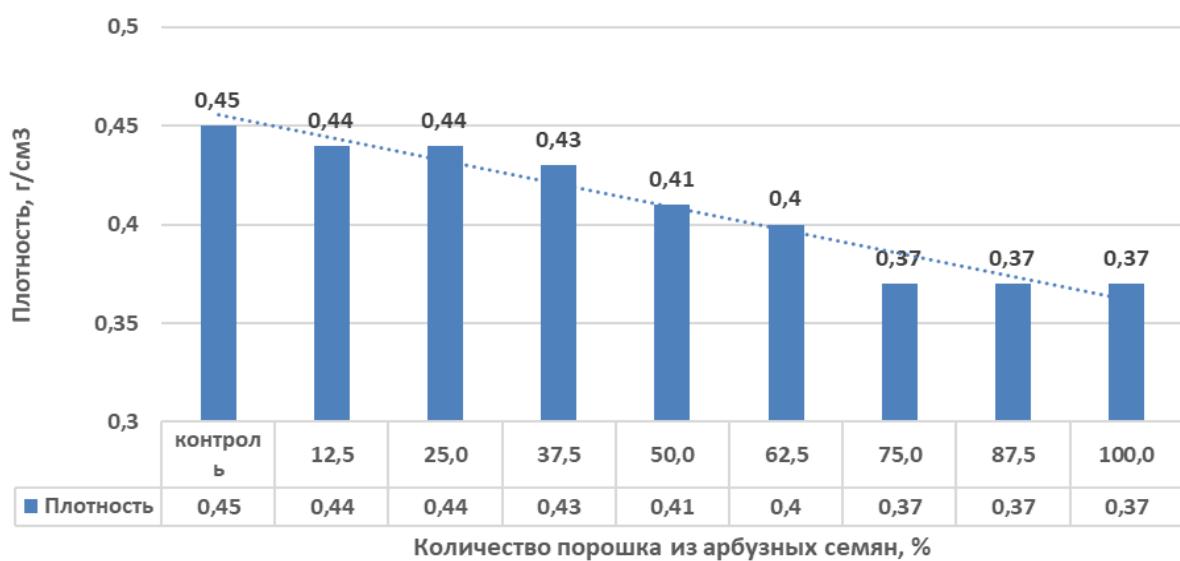


Рисунок 3 – Влияние добавления порошка из арбузных семян на плотность маффинов

Figure 3 – Effect of adding watermelon seed powder on muffin density

Порошок из семян арбуза является шероховатой частью, которая хорошо держит воду, а также повышает впитываемость воды в маффинах.

При добавлении порошка из семян арбуза уменьшается уровень общего сахара в выпеченных маффинах. Это объясняется тем, что семена арбуза по своему химическому составу

содержат моно- и дисахариды, но в количествах гораздо меньших, чем ядра кешию. Изменение этого показателя видны на рисунке 4.

Аналогичная тенденция прослеживается и в изучении содержания жира в зависимости от количества добавляемого порошка из арбузных семян, но изменение это незначительно.

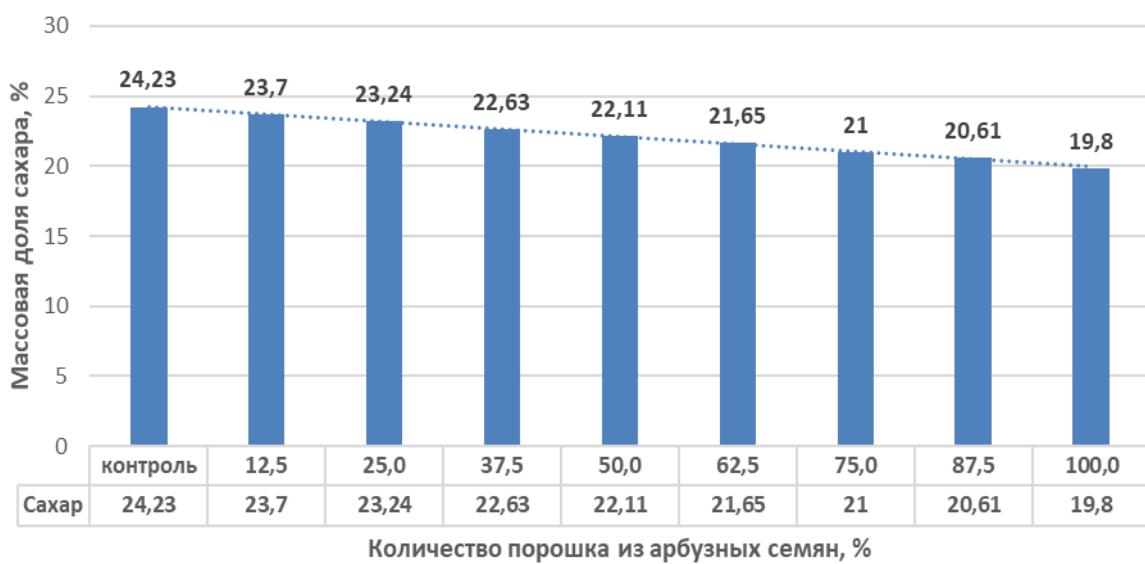


Рисунок 4 – Влияние различного количества порошка из арбузных семян на содержание сахара в маффинах

Figure 4 – Effect of different amounts of watermelon seed powder on sugar content of muffins

Значения содержания массовой доли зоны, нерастворимой в растворе соляной кислоты, во всех выпеченных образцах практически не отличались и соответствовали требованиям стандарта.

Исследование содержания водорастворимых веществ в выпеченных образцах маффинов показало их увеличение, что является косвенным показателем более лучшей усвояемости данного продукта организмом человека.

Таблица 2 – Рецептура маффинов с добавлением арбузных семян взамен муки

Table 2 – Recipe for muffins using watermelon seeds instead of flour

Сырье	Массовая доля сухих веществ, %	Расход сырья, г на 200 г готовой продукции			
		Кекс «Ореховый» (контроль)		Маффины с 100 % арбузных семян взамен ядер кешью	
		в натуре	в сухих веществах	в натуре	в сухих веществах
Мука пшеничная в/сорт	85,50	75,08	64,19	75,08	64,19
Сахар-песок	99,85	48,60	48,53	48,60	48,53
Маргарин	84,00	43,46	36,51	43,46	36,51
Меланж	27,00	39,52	10,67	39,52	10,67
Ядра кешью (сырые)	94,00	19,76	18,57	–	–
Пудра рафинадная	99,85	2,38	2,38	2,38	2,38
Аммоний углекислый	0,00	0,20	0,00	0,20	0,00
Семена арбуза (порошок)	92,00	–	–	20,18	18,57
Итого	–	229,00	180,85	229,42	180,85
Выход	85,00	200,00	170,00	200,00	170,00

Исследованиями установлено, что внесение порошка из семян арбуза практически не влияет на щелочность маффинов, массовую долю жира и зольность.

Путем многократных пробных лабораторных выпечек маффинов с добавлением порошка из семян арбуза и проведенной дегустационной оценки полученных образцов был выбран

В состав водорастворимых веществ входят водорастворимые белки, углеводы, витамины и часть минеральных веществ.

Рецептура маффинов (кекс, контроль) и маффинов с полной заменой ядер кешью на порошок из арбузных семян приведена в таблице 2. Предложенная формула обеспечивает сохранение производственной схемы без значительных изменений в процессе технологии.

образец маффинов, наиболее удовлетворяющий требованиям ГОСТ 15052-2014 [6], – с оптимальным добавлением – 100 % порошка из семян арбуза, то есть полной заменой орехового сырья на исследуемый растительный порошок.

Последним этапом нашего исследования был расчет пищевой и энергетической ценности

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ МАФФИНОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУФАБРИКАТА ИЗ АРБУЗНЫХ СЕМЯН

созданных маффинов, а также их сопоставление с рекомендованными нормами при потреблении 100 г выпечки в день. Несмотря на то, что кондитерские изделия не относятся к товарам повседневного спроса, жизнь современного человека редко обходится без разнообразных сладостей. Поэтому сегодня так важно формировать в населении правильный подход в выборе обогащенных продуктов питания.

Пищевая ценность маффинов, в которых вместо кешью использован порошок из арбузных семян, представлена в таблице 3. В качестве целевой группы выбрана первая категория населения (с очень низким уровнем физической активности, мужчины и женщины, с коэффициентом физической активности 1,4) – это работ-

ники, занимающиеся легким трудом, включая преподавателей вузов и студентов.

Таким образом, мы видим, что с добавлением порошка из арбузных семян пищевая ценность выпеченных образцов становится выше, предлагаемые образцы более богаты необходимыми организму человека макро- и микроэлементами, витаминами.

Разработанные образцы маффинов превосходят контрольный образец (кекс) по содержанию белка на 18 % при одновременном уменьшении количества углеводов заметно улучшилась картина по таким минеральным микроингредиентам, как натрий, кальций, магний и цинк. При этом энергоемкость снижается, что позволяет рекомендовать данные виды изделий для людей-приверженцев здорового питания.

Таблица 3 – Пищевая ценность маффинов с добавлением порошка из арбузных семян взамен ядер кешью, %

Table 3 – Nutritional Value of Muffins with Watermelon Seed Powder Instead of Cashew Nuts, %

Пищевые вещества	Норма суточного потребления в соответствии с МР 2.3.1.0253-2021	Контроль (кекс «Ореховый»)	Маффини с 100 % арбузных семян взамен ядер кешью	Степень удовлетворения суточной потребности в пищевых веществах, % (% от РСП)
Белки, г	67,0*–84,0	7,9	9,3	13,98*–11,1
Жиры, г	57,0–80,0	25,9	25,3	44,4–31,6
Углеводы, г	238–336	55,1	52,0	21,8–15,5
Клетчатка, г	20–25	1,3	2,1	10,5–8,4
Минеральные вещества, мг:				
- натрий	1300	66	75	5,8
- калий	3500	162	162	4,6
- кальций	1000	27	75	7,5
- магний	420	48	71	16,9
- фосфор	700	141	159	22,5
- железо	18–10	2,0	2,1	11,7–21
- марганец	2,0	0,17	0,16	8,0
- медь	1,0	2,20	0,07	7,0
- цинк	12	0,57	1,03	8,6
Витамины, мг:				
- В1	1,5	0,14	0,12	8,0
- В2	1,8	0,56	0,57	31,7
- РР	20	0,98	1,23	6,2
Энергетическая ценность, ккал	1700–2400	482	470	27,6–19,6

*первая цифра – женщины, вторая – мужчины

ВЫВОДЫ

1. Внесение порошка из семян арбуза положительно влияет на качество маффинов, улучшая их химический состав, обогащая их биологически активными веществами естественного происхождения (витаминами, минеральными веществами, пищевыми волокнами), которые так необходимы для ежедневной профилактики организма от различных заболеваний и вредного воздействия окружающей среды. Кроме того, снижается энергетическая ценность готового продукта.

2. Рекомендуется использовать порошок из семян арбуза в количестве 100 % вместо орехового сырья (ядра кешью) при выпечке маффинов по сравнению с контрольным образцом. Такая дозировка обеспечивает наилучшие показатели качества выпеченных образцов. Данные, полученные в ходе исследования, имеют практическое значение. Рецептуру, разработанную в рамках работы, можно рекомендовать для применения на кондитерских предприятиях, особенно тех, которые занимаются производством кексов и маффинов с повышенной пищевой ценностью.

Расчет пищевой и энергетической ценности показал, что при употреблении 100 г маффинов организм получает не только белки, жиры, углеводы, витамины и минералы, характерные для большинства мучных кондитерских изделий, но и значительное количество марганца, меди и цинка, а также клетчатку, необходимую для нормального метаболизма. Причем количество белков за счет введения порошка из семян арбуза значительно выше по сравнению с контрольным образцом.

4. Применение полуфабриката из арбузных семян в производстве мучных кондитерских изделий поможет разнообразить ассортимент, а также справиться с сезонными колебаниями в доступности арбузного сырья, предоставляя населению растительное сырье, богатое ценными биологически активными веществами.

5. Кроме всего прочего, семена арбуза не обладают аллергенностью и поэтому такие кондитерские изделия можно употреблять лицам, страдающим аллергией на орехи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курцева В.Г., Белячкова Л.В. Разработка технологии мучных кондитерских изделий на основе полуфабрикатов из арбузных семян и фасоли / Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: Сборник статей и докладов 14-ой научно-практической конференции с международным участием (2011 год) / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Барнаул, 2011.

2. Инновационные технологии в области пищевых продуктов и продукции общественного питания функционального и специализированного назначения: Коллективная монография / ФГБОУ ВПО «СПбГТЭУ»; под общ. ред. Н.В. Панковой. СПб. : Изд-во «ЛЕМА», 2012. 314 с.

3. 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.). М., 2021. 50 с.

4. Курцева В.Г., Пашкова И.Е. Исследование влияния растительного сырья на качество мучных кондитерских изделий / Сборник трудов XII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2015». Горизонты образования. Вып. 17. 2015.

5. Сборник технологических нормативов. Сборник рецептур на торты, пирожные, кексы, рулеты, печенье, пряники, коврижки и сдобные булочные изделия. Часть 3. М. : Хлебпродинформ, 2000. 720 с.

6. Сборник рецептур мучных кондитерских и булочных изделий / Составитель д.э.н. А.В. Павлов. СПб. : ПРОФИ-ИНФОРМ, 2004. 296 с.

7. Кексы. Общие технические условия: ГОСТ 15052-2014. Введ. 2015-01-01. Москва : Стандартинформ, 2016. 13 с.

8. Изделия кондитерские. Методы определения органолептических показателей качества, размеров, массы нетто и составных частей: ГОСТ 5897-90. Введ. 1992-01-01. Москва : Стандартинформ, 1993. 13 с.

9. Доронин А.Ф. Функциональные пищевые продукты. Введение в технологию / А.Ф. Доронин, Л.Г. Ипатова, А.А. Кочеткова, А.П. Нечаев, О.Г.Шубина, С.А. Хуршудян. М. : ДелоПринт, 2009. 288 с.

10. Химический состав российских пищевых продуктов : Справочник / под ред. член-корр. МАИ, проф. И.М. Скурихина и академика РАМН, проф. В.А. Тутельяна. М. : ДелоПринт, 2002. 236 с.

11. Инновационные технологии в области пищевых продуктов и продукции общественного питания функционального и специализированного назначения : Коллективная монография / ФГБОУ ВПО «СПбГТЭУ»; под общ. Ред. Н.В. Панковой. СПб. : Изд-во «ЛЕМА», 2012. 314 с.

12. Мучные кондитерские изделия функционального назначения. Научные основы, технологии, рецептуры / Т.В. Матвеева, С.Я. Корячкина. СПб. : ГИОРД, 2016. С. 8–34.

13. Могильный М.П. Новые сырьевые компоненты для производства хлебобулочных и мучных кондитерских изделий (характеристика, использование) / М.П. Могильный, Е.В. Шрамко ; под ред. М.П. Могильного. 2016. 231 с.

Информация об авторах

В. Г. Курцева – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии хранения и переработки зерна Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

М. Н. Колесниченко – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бродильных производств и виноделия Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

REFERENCES

1. Kurtseva, V.G., Belyachkova, L.V. Development of technology for flour confectionery products based on semi-finished products from watermelon seeds and beans / Modern problems of engineering and technology of food production: Collection of articles and reports of the 14th scientific and practical conference with international participation (2011) / Altai state tech. univ. I.I. Polzunov. Barnaul, 2011.

2. Innovative technologies in the field of food products and catering products of functional and specialized purposes: Collective monograph / FGBOU HPE "SPbGTEU"; under the general. Ed. N.V. Pankova. SPb. : Publishing house "LEMA", 2012. 314 p.

3. MR 2.3.1.0253-21. Standards of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation (approved by the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing on July 22, 2021). M., 2021. 50 p.

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ МАФФИНОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУФАБРИКАТА ИЗ АРБУЗНЫХ СЕМЯН

4. Kurtseva, V.G., Pashkova, I.E. Study of the influence of plant materials on the quality of flour confectionery products / Collection of works of the XI All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists "Science and Youth - 2015". HORIZONS OF EDUCATION. ISSUE 17. 2015.
5. Collection of technological standards. Collection of recipes for cakes, pastries, muffins, rolls, cookies, gingerbread, gingerbread and rich bakery products. Part 3. M. : Khlebprodinform, 2000. 720 p.
6. Collection of recipes for flour confectionery and bakery products / Compiled by Doctor of Economics A.V. Pavlov. St. Petersburg : PROFI-INFORM, 2004. 296 p.
7. Cupcakes. General specifications: GOST 15052-2014. Introduced on 2015-01-01. Moscow: Standartinform, 2016. 13 p.
8. Confectionery products. Methods for determining organoleptic quality indicators, sizes, net weight, and components: GOST 5897-90. Introduced on 1992-01-01. Moscow : Standartinform, 1993. 13 p.
9. Doronin, A.F. Functional food products. Introduction to technology / A.F. Doronin, L.G. Ipatova, A.A. Kochetkova, A.P. Nechaev, O.G. Shubina, S.A. Khurshudyan. M. : DeLi print, 2009. 288 p.
10. Chemical composition of Russian food products: Handbook / edited by Corresponding Member of MAI, prof. I.M. Skurikhin and Academician of the Russian Academy of Medical Sciences, prof. V.A. Tutelyan. M. : DeLiprint, 2002. 236 p.
11. Innovative technologies in the field of food products and catering products for functional and specialized purposes: Collective monograph / FGBOU HPE "SPbGTEU"; under the general editorship of N.V. Pankova. SPb. : Publishing house "LEMA", 2012. 314 p.
12. Flour confectionery products for functional purposes. Scientific foundations, technologies, recipes / T.V. Matveeva, S.Ya. Koryachkina. St. Petersburg : GIORD, 2016. pp. 8-34. 13. Mogilny, M.P. New raw materials for the production of bakery and flour confectionery products (characteristics, use) / M.P. Mogilny, E.V. Shramko. Under the editorship of M.P. Mogilny, 2016. 231 p.

Information about the authors

V.G. Kurtseva - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Grain Storage and Processing Technology of the Altai State Technical University named after I.I. Polzunov.

M.N. Kolesnichenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Fermentation and Winemaking, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ КРУПНОПЛОДНОГО ЗЕРНА ГРЕЧИХИ

**Василий Александрович Марьин¹, Александр Леонидович Верещагин²,
Андрей Александрович Иванов³**

^{1, 3} ООО «Алтай», с. Смоленское, Смоленского района, Алтайского края, Россия

² Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «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. Основными показателями качества зерна гречихи, влияющими на выход и качество крупы-ядрицы, является крупность, выравненность, высокое содержание ядра и легкость шелушения. Используемая в настоящее время технология переработки зерна гречихи в крупу рассчитана на зерно с невысокой крупностью, так как крупноплодное зерно недостаточно распространено. Поэтому целесообразным является исследование процесса переработки крупноплодного зерна и проведение оценки выхода и качества вырабатываемой крупы. Такой подход определен тем, что выход крупы ядрица и производительность цеха по переработке зерна зависит от многих показателей качества зерна: крупности, выравненности по размеру, содержанию ядра и легкости отделения его оболочки. Основные потери при переработке крупноплодного зерна происходят на этапе шелушения зерна в виде дробленого ядра и мучки. Для такого зерна методом ситового анализа был определен фракционный состав и размер ячеек сит, на которых отбирали крупу ядрицу каждой фракции. Это позволило уменьшить количество проходов через шелушильные системы, улучшить органолептические показатели крупы и увеличить на 1,2 % коэффициент использования ядра. Проведенный анализ переработки крупноплодного зерна позволяет утверждать, что отдельная переработка крупноплодного зерна экономически оправдана.

Целью настоящей работы является оценка влияния крупности зерна гречихи на выход и качество крупы.

Ключевые слова: крупноплодное зерно, фракции, крупа ядрица, шелушильный станок, крупность гречихи.

Для цитирования: Марьин В. А., Верещагин А. Л., Иванов А. А. Снижение потерь при переработке крупноплодного зерна гречихи // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 136–141. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.016. EDN: <https://elibrary.ru/XTMZHO>.

Original article

REDUCTION OF LOSSES DURING PROCESSING OF LARGE-FRUITED BUCKWHEAT GRAIN

Vasiliy A. Marin¹, Alexander L. Vereshchagin², Andrey A. Ivanov³

^{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 main quality indicators of buckwheat grain, affecting the yield and quality of kernel groats, are coarseness, uniformity, high kernel content and ease of husking. The currently used technology of buckwheat grain processing into groats is calculated on grain with low coarseness, as large-fruited grain

is not widely distributed. Therefore, it is expedient to study the process of processing of large-fruited grain and the evaluation of yield and quality of the produced groats. This approach is determined by the fact that the yield of kernel groats and productivity of the shop for grain processing depends on many indicators of grain quality, coarseness, uniformity in size, kernel content and ease of separation of its shell. The main losses in the processing of large-fruited grain occur at the stage of grain husking in the form of crushed kernel and flour. For such grain by the method of sieve analysis was determined fractional composition as well as the size of the sieve cells, on which selected groats kernel of each fraction. That allowed to reduce the number of passes through peeling systems, improve the organoleptic characteristics of groats and increase by 1.2 % the coefficient of kernel utilization. The analysis of coarse grain processing allows us to assert that separate processing of coarse grain is economically justified. The purpose of this work is to evaluate the influence of buckwheat grain coarseness on yield and quality of groats.

Keywords: coarse grain, fractions, kernel groats, peeling machine, coarseness, buckwheat.

For citation: Marin, V. A., Vereshchagin, A. L. & Ivanov, A. A. (2025). Reduction of losses during processing of large-fruited buckwheat grain. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 136-141. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.016. EDN: <https://elibrary.ru/XTMZHO>.

ВВЕДЕНИЕ

Основными показателями качества зерна гречихи, влияющими на выход и качество крупы-ядрицы, является крупность, выравненность, высокое содержание ядра и легкость шелушения. Линейные размеры являются сортовыми признаками гречихи, однако они могут изменяться в зависимости от погодных условий.

В процессе селекции крупность и масса 1000 плодов некоторых современных сортов гречихи достигла 30–34 г и более, при 24–30 г для обычной рядовой гречихи [1, 2].

С повышением крупности плодов повышается массовая доля плодовых оболочек, т.е. пленчатость [3], что отражается на общем выходе крупы с единицы посева [4]. Однако доля плодовых оболочек зерна гречихи также может увеличиваться при неблагоприятных климатических условиях в процессе вегетации, что связано с адаптивными свойствами сортов [5, 6].

Общеизвестно, что крупное по размеру зерно гречихи имеет ярко выраженную крылатость, т.е. фактически это означает значительную разницу размеров между зерном и его ядром, что значительно облегчает процесс шелушения, увеличивая выход и качество полученной крупы.

Особым технологическим свойством зерна гречихи является его различие по размерам, массе, что приводит к необходимости сортировки его на фракции по крупности перед шелушением, вследствие растянутого и неравномерного периода созревания плодов.

Опыт переработки зерна гречихи показал, что при шелушении зерна более крупные фракции меньше дробятся и имеют более высокий коэффициент шелушения [7]. Показатели эффективности шелушения крупных фракций объясняются крылатостью зерна, т.е. значительным различием геометрических размеров зерна и ядра и могут достигать нескольких миллиметров [8].

Опыт эксплуатации гречезавода по переработке крупноплодного зерна по существующей технологии показывает, что при шелуше-

нии такое зерно сильно дробится и уменьшает выход целого ядра, крупы гречневой ядрицы. Поэтому возникает необходимость в усовершенствовании существующей технологии при использовании крупноплодного зерна для переработки в крупу ядрицу.

В настоящее время в литературе отсутствуют данные об использовании крупноплодных сортов гречихи для выработки крупы ядрицы, поэтому совершенствование технологии переработки крупноплодного зерна является актуальной и практически обоснованной.

Целью настоящей работы является разработка технологии переработки крупноплодного зерна гречихи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Появление новых сортов зерна гречихи определяет необходимость изучения методов их переработки. Такой подход обусловлен тем, что выход крупы ядрица зависит от многих показателей качества зерна: крупности, выравненности по размеру, содержанию ядра и легкости отделения его оболочки.

Новый крупноплодный сорт Даша [9] отличается повышенной урожайностью и крупностью ядра, масса 1000 зёрен составляет 25–38 г, максимальная урожайность составила 37,5 ц/га при средней урожайности в России 8–10 ц/га. Общеизвестно, что при шелушении зерна с более высокой массой 1000 зерен сохранность ядра более высокая.

Для оценки эффективности переработки использовали партии зерна с показателями качества согласно требованиям ГОСТ 19092-2021 Гречиха. Технические условия.

Для испытания были отобраны партии рядового зерна гречихи и крупноплодного сорта Даша, которые были собраны в предгорной зоне Алтайского края в 2020 г. Объектом исследования служило зерно гречихи, которое после доведения до требований НД направляли в цех по переработке зерна в крупу ядрица.

Для переработки были выбраны партии ря-

дового и крупноплодного зерна гречихи с показателями, соответствующими требования ГОСТ 19092-2021 результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Фактические показатели качества используемого в переработке зерна и зерна гречихи на соответствие требованиям ГОСТ 19092-2021

Table 1 – Actual quality indicators of grain and buckwheat used in processing for compliance with the requirements of GOST 19092-2021

Свойства	Показатели		
	рядо-вой гречи-хи	крупно-плодной гречихи	Требова-ния ГОСТ 19092-2021
Массовая доля ядра, %, не более	76,3	73,2	73,0
Пленчатость, %	22,4	26,2	—*
Влажность, %, не более	14,2	14,0	14,5
Сорная примесь, %, не более в том числе трудноотделимые семена	2,5 —	1,8 —	2,0 —
Зерновая примесь, %, не более	0,9	1,0	2,0
Зарраженность вредителями	не обнаружено	не обнаружено	не допускается

* – не нормируется

Как следует из представленных данных, зерно исследуемых партий соответствовало требованиям нормативной документации.

Испытания проводили в производственных условиях на гречевом заводе производительностью 100т/ч. В работе все исследования проводились на двухдековых шелушителях 2ДШС-3 с использованием одной абразивной и деки из вязкоупругого материала [10].

Оценку эффективности работы технологической линии оценивали по массовой доле целого и коготого ядра. Образцы для исследования отбирали в местах отбора проб согласно ГОСТ 26312-84 «Правила приемки» и методы оббора проб» производственного цеха.

Достоверность полученных результатов подтверждена многократной повторностью экспериментов, все исследования обрабатывались статистически. В экспериментальной части приведены средние значения показателей.

Контроль качества зерна и выработанной продукции проводили в аккредитованной лаборатории согласно действующей документации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Наиболее важной технологической операцией при переработке зерна гречихи является шелущение. Существуют разные способы и машины для шелущения зерна, их применение связано с особенностью технологических свойств зерна.

В настоящее время используемая технология переработки зерна гречихи в крупу рассчитана на зерно с невысокой крупностью, так как крупноплодное зерно недостаточно распространено. Использование зерна с невысокой крупностью имеет ряд недостатков, в том числе невысокое извлечение ядра. Основные потери происходят на этапе шелущения зерна в виде дробленого ядра и муки, даже при сортировке зерна на фракции по крупности с последующей калибровкой выход готовой продукции может составлять не более 72,0 %. Причем основные потери происходят в более мелких фракциях, где размер зерна и ядра отличаются незначительно.

Технологический процесс переработки зерна гречихи в крупу основывается на общепринятой схеме согласно правилам организации и ведения технологического процесса на крупяных предприятиях. Зерно гречихи перед шелущением разделяют на фракции по крупности. Поэтому методом ситового анализа был определен фракционный состав рядового и крупноплодного зерна, а также размер ячеек сит, на которых отбирали крупу ядрицу каждой фракции. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Размеры круглых отверстий сит, характеризующих фракции зерна гречихи и размеры круглых отверстий сит, на которых отбирали крупу ядрицу каждой фракции

Table 2 – The sizes of the round holes of the sieves characterizing the fractions of buckwheat grain and the sizes of the round holes of the sieves of which the grain kernels of each fraction were selected

Фракция, номер	Рядовое зерно		Сорт Даша	
	Размер ячеек сит мм,			
	зерна	крупы	зерна	Крупы
1	5,0	4,7	6,0	5,5
2	4,7	4,5	5,5	5,0
3	4,5	4,2	5,0	4,7
4	4,2	4,0	4,5	4,2
5	4,0	3,8	4,2	4,0
6	3,8	3,6	4,0	3,8

Из представленных данных следует, что крупность сорта Даша заметно выше рядового зерна гречихи. Для возможности его переработки необходимо вводить дополнительные фракции с размером сит 6,0 и 5,5 мм. Ситовой анализ показал, что сорт Даша значительно отличается по распределению зерна на ситах. Кроме того, необходимо отметить, в данном зерне отсутствует фракция 3,8 мм, что позволяет утверждать, что при доведении такого зерна до требований ГОСТ при его подработке на ситовых сепараторах потери зерна в отходы будут минимальны. Согласно правилам организации и ведения технологического процесса, на крупяных предприятиях для удаления сорной примеси используются сита 2,8×20 мм, через которые

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ КРУПНОПЛОДНОГО ЗЕРНА ГРЕЧИХИ

проходит незначительная часть зерна фракции с размером \varnothing 3,8 мм.

Для получения информации по крупности и возможности разделения зерна перед шелушением методом ситового анализа был определен фракционный состав рядового зерна и крупноплодного. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Фракционный состав обычных и крупноплодных сортов зерна гречихи

Table 3 – Fractional composition of common and large-fruited varieties of buckwheat grain

Номер фракции	Фракционный состав, масс.%					
	1	2	3	4	5	6
Рядовое зерно	37,9	25,4	15,8	13,5	4,4	3,0
Крупноплодное зерно	20,2	30,8	19,6	16,4	10,2	2,8

Как следует из представленных данных, несмотря на то, что сорт Даша значительно отличается по содержанию наиболее крупного зерна, фракционный состав рядового зерна отличается незначительно, и с уменьшением размера фракции уменьшается его массовая доля. Однако необходимо отметить крупность зерна является сортовой особенностью, а выявленные закономерности сортового распределения зерна по линейным размерам (по фракциям) индивидуальны для любого года и для любого сорта. Также необходимо отметить, что с увеличением доли крупных фракций (первых) снижается доля мелких фракций.

Поскольку с ростом крупности зерна наблюдается увеличение его пленчатости, была проанализирована пленчатость каждой фракции крупноплодного зерна и сравнена с рядовым. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Массовая доля плодовой оболочки (пленчатость) во фракциях рядового и крупноплодного зерна

Table 4 – Mass fraction of fruit shell (filminess) in fractions of ordinary and large-fruited grain

Номер фракции	Массовая доля плодовых оболочек, %					
	1	2	3	4	5	6
Рядовое зерно	23,5	22,6	21,2	20,8	19,2	18,5
Крупноплодное зерно	28,0	23,8	22,4	22,0	21,0	20,0

Из представленных данных следует, что с уменьшением геометрических размеров фракции ее пленчатость уменьшается. Причем такая закономерность характерна как для крупного, так и для рядового зерна, что не противоречит ранее проведенным результатам [11].

Зерно, разделенное на фракции согласно указанным геометрическим размерам, направ-

ляли на шелушение для выработки крупы ядрицы. В процессе исследования измеряли коэффициент шелушения и массовую долю колотого ядра. Сравнительную оценку эффективности шелушения исследуемых партий рядового и крупноплодного зерна проводили на шелушильных станках 2ДШС-3, задачей служило получить при тех же коэффициентах шелушения показатели целостности ядра и сравнить. Шелушение 1-2-3-4 фракций производили на станках рабочими органами, в которых является абразивный валок диаметром 650 мм и неподвижные абразивные деки длиной 590 мм. Пятую и шестую фракции шелушили на станках с валком диаметром 350 мм и декой длиной 250 мм. Показатели эффективности шелушения рядового и крупноплодного зерна представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Показатели шелушения рядового, крупноплодного зерна и смеси рядового 70,0 % и крупноплодного зерна 30,0 %

Table 5 – Peeling indicators of ordinary, large-fruited grain and a mixture of ordinary 70.0% and large-fruited grain 30.0 %

Номер фракции	Показатели эффективности шелушения, %					
	Рядовое зерно		Крупноплодное зерно		Смесь партий 70/30	
$K_{ш}$	доля пропада	$K_{ш}$	доля пропада	$K_{ш}$	доля пропада	
1	58,2	0,3	64,2	–	50,0	2,8
2	54,4	0,4	62,6	–	48,0	2,6
3	49,0	0,9	57,4	0,2	45,0	1,6
4	44,5	2,6	51,2	0,4	43,0	2,9
5	36,4	3,4	48,8	0,5	34,0	3,6
6	29,8	4,2	38,4	1,0	28,5	3,5

Примечание: $K_{ш}$ – коэффициент шелушения

Согласно данным таблицы 5, эффективность шелушения разных фракций зерна как рядового, так и крупноплодного различна. Она зависит, прежде всего, от разницы размеров зерна и ядра. У крупных фракций эта разница достаточно большая, поэтому можно за один пропуск шелушить большее количество зерен, не опасаясь значительного дробления ядра, поэтому коэффициент шелушения достаточно высокий. У мелких фракций такая разница значительно меньше, поэтому необходимо шелушить зерно очень осторожно, при малом коэффициенте шелушения. Таким образом, благодаря выраженной крылатости крупноплодного зерна всех фракций можно снизить затраты на переработку за счет более высокого коэффициента шелушения и уменьшения доли колотого ядра, тогда как у рядового зерна крылатость выражена гораздо меньше, а пятую и шестую фракцию можно условно отнести к бескрылому зерну.

Результаты производственных испытаний исследуемых партий зерна представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты производственных испытаний при переработке рядового и крупноплодного зерна гречихи

Table 6 – Results of production tests during processing of ordinary and large-fruited buckwheat grains

Продукт	Массовая доля готового продукта, %			
	Рядовое зерно	Крупноплодное зерно	Смесь партий 70/30	Согласно правилам организации
Крупа ядрица	71,5	70,8	66,1	62,0
Колотое ядро	0,8	0,4	5,0	5,0

Как следует из таблицы 6, примененный способ переработки крупноплодного зерна (при выделении дополнительно фракций 6,0 и 5,5 мм) позволяет получать крупу высшего качества с меньшей массовой долей продела и мучки. Крупное зерно имеет значительную воздушную полость между ядром и оболочкой, поэтому легче разделяется при шелушении, что позволяет уменьшить количество проходов через шелушильные системы, улучшить органолептические показатели крупы и увеличить на 1,2 % коэффициент использования ядра.

В процессе исследования были проанализированы органолептические показатели крупы, выработанные из рядового и крупноплодного зерна показатели в сравнении с требованиями ГОСТ Р 55290-2012. Было установлено, что по цвету, запаху и вкусу выработанная крупа ядрица соответствовала требованиям ГОСТ, однако крупа, выработанная из крупноплодного зерна, более крупная, соответственно обладает более предпочтительным товарным видом.

Фотографии крупы гречневой ядрицы, выработанной из рядового и крупноплодного зерна, представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Крупа гречневая ядрица, выработанная из: а) рядовой; б) крупноплодной гречихи

Figure 1 – Buckwheat kernels made from
a) ordinary; b) large-fruited buckwheat

Экономическая эффективность производственных испытаний при работе с рядовым, крупноплодным зерном и при подсортовке 30,0 % крупноплодного зерна представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Экономическая эффективность испытаний при стоимости зерна гречихи 14 000 руб/т
Table 7 – Economic efficiency of tests at the cost of buckwheat grain of 14,000 rubles/ton

Показатель	Вариант		
	1	2	3
Номинальная производительность, в сутки, т	60	60	60
Крупа продела, %	0,8	0,4	5
Потеря/ увеличение производительности, %	0	10	-20
Фактическая производительность в сутки, т	60	66	48
Стоимость переработки без учета мешкотары руб/т зерна	2 800	2 800	2 800
Стоимость 1т гречихи б/НДС, руб	14 000	14 000	14 000
Стоимость мешкотары на 1 т крупы, руб	333	333	333
Стоимость одной тонны крупы продела, б/НДС	15 000	15 000	15 000
Стоимость одной тонны крупы гречневой, б/НДС	27 000	27 000	27 000
Номинальный выход готовой продукции, %	71,5	71,5	71,5
Фактический выход готовой продукции, %	71,5	70,8	66,0
Стоимость сырья (суточная), руб	840 000	924 000	672 000
Стоимость переработки в денежном выражении, руб	168 000	168 000	168 000
Количество крупы ядрицы, т/сут	42,9	46,7	31,7
Количество продела, т/сут	0,5	0,2	3,0
Стоимость тары, руб	14,286	15,560	10,549
Итого себестоимость крупы, руб	1 022 286	1 107 560	850 549
Себестоимость тонны крупы, руб	23 830	23 702	26 848
Выручка от реализации крупы, руб	1 128 300	1 261 655	855 360
Выручка от реализации продела, руб	7 200	3 600	45 000
Итого выручка, руб	1 165 500	1 265 256	900 360
Маржинальная, руб	136 014	154 096	4 811

Вариант 1 – рядовое

Вариант 2 – крупноплодное

Вариант 3 – смешанное

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенных исследований было выявлено, что крупноплодное зерно отличается от рядового более высокой пленчатостью и соответственно меньшим содержанием массовой доли ядра. Однако так же, как и рядо-

вое, методом ситового анализа его удается разделить на шесть фракций по крупности. Это позволяет перерабатывать его отдельно без подсортировки к рядовому зерну. Полученные данные в процессе производственных испытаний позволяют утверждать, что при разделении на определенные фракции дробление ядра в процессе шелушения значительно меньше, чем у рядового. Кроме того, использование крупноплодного зерна позволяет уменьшить количество проходов через шелушильные системы, улучшить органолептические показатели крупы и увеличить на 1,2 % коэффициент использования ядра. Экономический анализ переработки крупноплодного зерна показал целесообразность использование предложенной схемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование предложенной технологии по переработке зерна позволило повысить рентабельность переработки зерна в крупу, увеличить извлечение и качество готового продукта. Разница в суточной маржинальной прибыли при переработке рядового зерна и крупноплодного зерна по предложенной технологии может составлять порядка 18 тысяч рублей в сутки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варлахова, Л.Н., Бобков, С.В., Мартыненко, Г.Е., Михайлова, И.М. (2017). Технологические качества новых крупноплодных сортов гречихи. Земледелие, (5), 40-44.
2. Варлахова, Л.Н., Бобков, С.В., Мартыненко, Г.Е. & Михайлова, И.М. (2012). Особенности технологических качеств зерна новых крупноплодных сортов гречихи. Зернобобовые и крупяные культуры, (2), 54-61.
3. Фесенко, А.Н. Детерминантные сорта гречихи нового поколения. / А.Н. Фесенко, Г.Е. Мартыненко, Н.В. Фесенко, В.И. Мазалов // Земледелие. 2012. С. 38-39.
4. Кадырова, Ф.З. Новые сорта гречихи для засушливых условий Среднего Поволжья / Ф.З. Кадырова, Л.Р. Кадырова, А.Т. Хуснутдинова // Зерновое хозяйство России. 2014. № 2. С. 54-57.
5. Климова, Ф.З. Формирование качества плодов в

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

процессе селекции гречихи / Кадырова Ф.З., Климова Л.Р., Кадырова Л.Р. // Агробиотехнологии и цифровое земледелие. 2022. № 4 (4). С. 29-33.

6. Рыбась, И.А. Повышение адаптивности в селекции зерновых культур / И.А. Рыбась // Сельскохозяйственная биология. 2016. Том 51. № 5. С. 617-626.

7. Карев, С.В. Совершенствование технологического процесса производства гречневой крупы / С.В. Карев, Л.М. Камозин, В.С. Ванин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2-2 (292). С. 107-111.

8. Дубовик, Е.И. Влияние сортовых особенностей тетрапloidной гречихи на фракционный состав зерна / Е.И. Дубовик // Земледелие и селекция в Беларуси. 2012. № 48. С. 359-366.

9. Фесенко, А.Н. Новый сорт гречихи Даша / А.Н. Фесенко, А.В. Амелин, И.Н. Фесенко, О.В., Бирюхова, В.В. Заикин // Земледелие. 2018. № 4. С. 36-38.

10. Марьин, В.А. Целесообразность применения деки из вязкоупругого материала при шелушении зерна гречихи / В.А. Марьин, А.Л. Верещагин, А.А. Иванов // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50, № 1. С. 87-95. DOI: 10.21603/2074-9414-2020-1-87-95.

11. Марьин, В.А. Влияние размера зерна гречихи на свойства гречневой крупы / В.А. Марьин, А.Л. Верещагин, Н.В. Бычин // Хранение и переработка сельхозсырья. 2017. № 1. С. 5-8.

Информация об авторах

В. А. Марьин – к.т.н., гл. технолог ООО «Алтай».

А. Л. Верещагин – д.х.н., профессор, профессор кафедры «Химической технологии энергонасыщенных материалов и изделий» ФГБОУ ВО «Бийский технологический институт (филиал) «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

А. А. Иванов – экономист ООО «Алтай».

Information about the authors

V. A. Maryin - Candidate of Technical Sciences, Chief Technologist of Altai LLC.

A. L. Vereshchagin - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of Chemical Technology of Energy-Saturated Materials and Products, Biysk Institute of Technology (Branch) Polzunov Altai State Technical University.

A.A. Ivanov - economist, Altai LLC.



МНОГОАСПЕКТНАЯ КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВОГО ХЛЕБОБУЛОЧНОГО ИЗДЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОЦЕССА НАУЧНО-ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

**Сергей Владимирович Новоселов¹, Лариса Александровна Маюрникова²,
Надежда Вадимовна Исаева³**

^{1, 3} Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул, Россия

¹ novoselov_sv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8247-2356>

³ isaeva_nd_vd@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9893-3160>

² Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

³ nir30@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4592-8382>

Аннотация. В современном мире система безопасности играет стратегическую роль в сохранении мира, отдельного государства или индивида. Определение безопасности неразрывно связано с понятием «национальной безопасности». Глобальная безопасность строится на таких принципах, как отказ от использования угроз силой, уважение и признание свобод и прав человека, самоопределение народов, сотрудничество и разоружение и др. Немаловажным является «принцип целостности», означающий, что в XXI веке большинство стран взаимозависимы и создание условий опасности в одной, как следствие, приводит в аналогичной ситуации в других. Для России начало XXI века охарактеризовалось как ситуация с «повышенной опасностью от внешних угроз» и необходимостью усиления «национальной безопасности», в т.ч. продовольственной. Международный и отечественный опыт сохранения и укрепления здоровья населения свидетельствует об эффективности оптимизации рационов за счет включения специализированных продуктов питания и БАД. При этом рост и разнообразие внешних факторов, негативно сказывающихся на здоровье человека, вызывает необходимость новых взглядов ученых на проектирование (моделирование) обозначенной группы пищевой продукции. По мнению целого ряда специалистов, в этой области знаний перспективным направлением является когнитивное моделирование объектов и систем. Авторами предложен новый подход к моделированию пищевых продуктов с заданными свойствами на основе многоаспектной когнитивной модели. В рамках модели рассматриваются три аспекта: 1 – рассуждения ученого о проектируемом объекте; 2 – рассуждения разработчика об объекте как о технической системе с заданными свойствами и их оценкой; 3 – оценка деятельности и потенциального вклада проектируемого объекта в решение обозначенной ранее проблемы. В условиях научно-инновационной деятельности разработка новшеств осуществляется в рамках инновационного проекта, предусматривающего товародвижение «от идеи до потребителя», поэтому в статье рассмотрены факторы, необходимые для учета при формировании технико-технологического образа продукта, т.е. процессов производства и выведения на рынок с целью доведения до потребителя. Процесс проектирования хлебобулочного изделия с добавлением грибного порошка, обладающего функциональными свойствами, рассмотрен на примере региональной проблемы питания Алтайского края в условиях научно-инновационной деятельности (НИД) хлебопекарной отрасли.

Ключевые слова: продовольственная безопасность, многоаспектная когнитивная модель, новшества, хлебобулочные изделия, функциональные свойства, научно-инновационная деятельность, региональные особенности.

Для цитирования: Новоселов С. В., Маюрникова Л. А., Исаева Н. В. Применение многоаспектной когнитивной модели для проектирования нового хлебобулочного изделия в условиях научно-инновационной деятельности // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 142–149. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.017. EDN: <https://elibrary.ru/EYGXBX>.

МНОГОАСПЕКТНАЯ КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВОГО
ХЛЕБОБУЛОЧНОГО ИЗДЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОЦЕССА
НАУЧНО-ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Original article

**APPLICATION OF A MULTIDIMENSIONAL COGNITIVE MODEL FOR
FORMATION OF AN IMAGE OF A NEW FOOD PRODUCT IN
CONTEXT OF SCIENTIFIC AND INNOVATIVE ACTIVITY**

Sergey V. Novoselov¹, Larisa A. Mayurnikova², Nadezhda V. Isaeva³

^{1, 3} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ novoselov_sv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8247-2356>

³ isaeva_nd_vd@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9893-3160>

² Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

³ nir30@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4592-8382>

Abstract. *Annotation* In the modern world, the security system plays a strategic role in preserving peace, a separate state or an individual. The definition of security is inextricably linked to the concept of "national security". Global security is based on such principles as: non-use of threats by force, respect and recognition of human freedoms and rights, self-determination of peoples, cooperation and disarmament, etc. An important one is the "principle of integrity", which means that in the 21st century most countries are interdependent and the creation of dangerous conditions in one, as a result, leads to a similar situation in others. For Russia, the beginning of the 21st century was characterized as a situation with "increased danger from external threats" and the need to strengthen "national security", including food security. International and domestic experience in preserving and strengthening public health testifies to the effectiveness of optimizing diets by including specialized foods and dietary supplements. At the same time, the growth and diversity of external factors that negatively affect human health necessitates new views of scientists on the design (modeling) of the designated group of food products. According to a number of experts, cognitive modeling of objects and systems is a promising direction in this field of knowledge. The authors propose a new approach to modeling food products with specified properties based on a multidimensional cognitive model. Within the framework of the model, three aspects are considered: 1 - the scientist's reasoning about the projected object; 2 - the developer's reasoning about the object as a technical system with specified properties and their assessment; 3 - assessment of the activity and potential contribution of the projected object to solving the previously identified problem. In the context of scientific and innovative activity, the development of innovations is carried out within the framework of an innovative project providing for the movement of goods "from idea to consumer", therefore, the article considers the factors necessary to take into account when forming a technical and technological image of a product, i.e. the processes of production and marketing in order to bring it to the consumer. The process of designing a bakery product with the addition of mushroom powder with functional properties is considered on the example of the regional nutrition problem of the Altai Territory in the conditions of scientific and innovative activity (SIA) of the baking industry.

Keywords: food security, multidimensional cognitive model, innovations, bakery products, functional properties, scientific and innovative activities, regional peculiarities.

For citation: Novoselov, S. V., Mayurnikova, L. A. & Isaeva, N. V. (2025). Application of a multidimensional cognitive model for designing a new bakery product in conditions of scientific and innovative activity *Polzunovskiy vestnik*, (1), 142-149. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.017. EDN: <https://elibrary.ru/EYGXBX>.

ВВЕДЕНИЕ

Территория РФ представлена восемью федеральными округами, каждый из которых имеет свои климатогеографические особенности, определенную ориентацию развития отраслей, социально-экономический статус и др. Это находит отражение в региональных программах развития, предпосылками для процесса разработки которых являются стратегии Развития РФ на перспективу. Так, для решения вопросов обеспечения продовольственной безопасности населения России в Доктрине продовольственной безопасности рекомендуется «...органам государственной власти субъектов РФ руководствоваться положениями Доктрины продовольственной безопасности РФ в практической деятельности и при разработке нормативно правовых актов, касающихся обеспечения продовольственной безопасности...» [1, 2].

При оценке перспектив развития агропромышленного комплекса (АПК) необходимо учитывать, что свыше 4/5 пашни в России приходится на Центральное Поволжье, Северный Кавказ, Урал и Западную Сибирь. Большая часть (70 %) сельскохозяйственных угодий находится в европейской части страны, в том числе: в Поволжском районе – 18–19 %; в Уральском районе – 16–17 %; в Северокавказском районе – 11–12 %. За Уралом это отдельные районы Западно-Сибирского региона – 16–17 %.

Активное развитие АПК в последнее десятилетие обусловлено рядом факторов: пандемией COVID-19 и, как следствие, ростом цен на мировом рынке сырья и продовольствия; изменением международной политической ситуации, приведшей к усилению экономических санкций и ограничению торгового сотрудничества; государственному регулированию развития АПК в части орга-

низационной и финансовой поддержки.

В свою очередь, изменение ситуации в отношении к АПК со стороны государства как фактора обеспечения продовольственной безопасности и продовольственной независимости вызвало интерес со стороны бизнес-сообщества, науки и системы образования, рынка.

Сельское хозяйство – крупная отрасль российской экономики. Доля сельского хозяйства (агропромышленного (АПК)) в валовой добавленной стоимости на 2022 год составила 10,04 %. Аграрный сектор Российской экономики в 2022 году стал одним из самых динамично развивающихся. При этом в производстве сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий РФ лидирует производство зерновых и зернобобовых культур.

Исторически аграрными регионами России считаются южные и центральные районы страны. Это связано с климатическими условиями, позволяющими вести земледелие с меньшими рисками, чем в более северных районах. Лидерами по производству сельскохозяйственной продукции являются Краснодарский и Ставропольский края. Алтайский край входит в ТОР-10 регионов по валовому сбору пшеницы, ячменя и кукурузы.

В 2022 году по валовому сбору зерна Алтайский край занял седьмое место (3,32 млн. тонн.) после Краснодарского, Ставропольского краев, Ростовской, Волгоградской и Воронежской областей [12, 15].

В структуре посевных площадей Алтайского края зерновые и зернобобовые культуры занимают более 60 %. Самообеспеченность региона сельскохозяйственной продукцией и продовольствием за исключением овощей и бахчевых культур превышает установленные пороговые значения: зерно более 196 %, картофель около 220 % при норме, рекомендуемой Доктриной продовольственной безопасности – 95 % [2, 9].

Система АПК представляет собой структурированную совокупность функциональных составляющих системы и их взаимоотношений, включающая подсистемы из разных сфер:

- **Ресурсная или обеспечивающая.** Входят отрасли, которые обеспечивают аграрно-промышленный комплекс средствами производства: сельскохозяйственное машиностроение, производство удобрений и комбикормов, мелиорация.

- **Аграрно-сырьевая.** Иначе говоря, собственно сельское хозяйство.

- **Перерабатывающая.** Продукция сельского хозяйства реализуется в виде продовольственного сырья на потребительском рынке, либо прямыми поставками на переработку и доведение до потребителя в виде готовой продукции. В этой связи для этой сферы характерны такие процессы, как заготовка, хранение, переработка, транспортировка и реализация продукции. В реализации этих процессов участвуют составляющие отрасли АПК: пищевая промышлен-

ность, общественное питание и торговля.

- **Производственная.** Организации разного уровня и функционирования, а также предприятия отраслей, обеспечивающие функционирование аграрного комплекса.

Развитие науки и внедрение в практику научно-технических достижений вызывает необходимость применения новых методов, способов и технологий разработки новшеств в каждой отдельно взятой сферы (отрасли) для эффективного достижения общей цели. Так, в направлениях научных исследований в отраслях с/х, пищевой промышленности и общественного питания отражены в Стратегии повышения качества пищевой продукции.

Уделяется внимание роли науки научных и научно-образовательных учреждений в рамках реализации национальных проектов «Демография» и «Здравоохранение». Еще в 2018 году на заседании президиума РАН обсуждался вопрос «Об актуальных проблемах оптимизации питания населения России: роль науки».

Наряду с вопросами изыскания новых нетрадиционных видов продовольственного сырья разработка новых видов специализированных продуктов питания, обеспечения качества и безопасности продовольствия в рамках созданной системы качества и безопасности рассматривался вопрос подготовки специалистов по новой научной специальности «нутрициология и диетология» [13].

Анализ научной литературы показывает интерес отечественных и зарубежных ученых к проектированию функциональных и обогащенных продуктов питания, биологически активных добавок (БАД) к пище как одного из эффективных путей решения проблемы микронутриентной обеспеченности разных групп населения и снижения неинфекционных хронических заболеваний (НИХЗ) [4].

Профильные вузы России выполняют значимую роль в этом направлении исследований. Данные Росстата, Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) свидетельствуют о динамике роста на рынке ассортимента обогащенной пищевой продукции; активно развивается производство и реализация отечественных БАД.

Среди однородных групп пищевых продуктов массового спроса уделяется внимание группе хлеб и хлебобулочные изделия. Об этом свидетельствуют, например, научно-технические достижения, публикуемые в ежегодных сборниках научных трудов Министерства науки и высшего образования РФ, Российской академии наук и ФГАНУ НИИ хлебопекарной промышленности [10].

В рамках проектирования специализированных пищевых продуктов для разных групп населения Алтая авторами предложен новый

МНОГОАСПЕКТНАЯ КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВОГО ХЛЕБОБУЛОЧНОГО ИЗДЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОЦЕССА НАУЧНО-ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

подход к проектированию хлебобулочных изделий с добавкой грибного порошка на основе когнитивного моделирования.

Целью исследований является разработка и описание этапов процесса проектирования нового пищевого продукта и формирование его

технико-технологического образа на основе многоаспектной когнитивной модели (рисунок 1). Выполняется организация видения специалиста для формирования концептуального образа нового изделия по теме инновационного исследования.



Рисунок 1 – Принципиальная схема многоаспектной когнитивной модели формирования образа нового хлебобулочного изделия

Figure 1 – Schematic diagram of a multidimensional cognitive model of the formation of the image of a new bakery product

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований применяли теоретические методы научного исследования (анализ, обобщение, синтез), позволяющие обобщить и более глубоко изучить имеющуюся в доступной литературе информацию в исследуемой области знаний.

Метод моделирования использован для создания формализованного представления о процессе товародвижения нового хлебобулочного изделия с заданными свойствами в условиях научно-инновационной деятельности с конкретизацией аспектов и факторов.

Методы анализа, индукция и дедукция применялись при описании элементов многоаспектной модели в граничных условиях поставленной цели и задач.

Модель товародвижения новшества на основе процесса НИД «от идеи до потребителя» в системе «наука и образование – производство – рынок» по теме инновационного исследования. На её основе формируется разработка и практическая реализация инновационного проекта с целью получения социального эффекта и экономической эффективности.

Модель развития предприятия на основе инновационного проекта в граничных условиях региона и отрасли.

Механизм формирования потребительских предпочтений на новые товары и услуги модели научкоемкого производства инновационного проекта.

Закономерность инновационного цикла по теме инновационного исследования обеспечивает формирование процесса разработки и практической реализации инновационного проекта.

Методика когнитивного моделирования в условиях процесса НИД «от идеи до потребителя» на основе закономерности инновационного цикла для разработки и практической реализации инновационного проекта.

Товароведно-ориентированная модель разработки, апробации и практической реализации инновационного проекта. Она характеризует постановку и решение задач процесса НИД при интеграции технико-технологических и организационно-экономических решений инновационного проекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В основу рассматриваемого и исследуемого концептуального образа новшества по теме инновационного исследования положены три понятия: модель, аспект и фактор.

Модель – мысленно представляемый объект, замещающий оригинал, который сохраняет

только некоторые важные его свойства. Модель есть аналог, повторяющий существенные свойства моделируемого объекта (прототипа) и опускающий несущественные свойства, в которых они могут отличаться от свойств прототипа в процессе оперирования образами. Они являются результатом творчества специалистов по теме инновационного исследования.

Аспект – взгляд, вид, облик, определенное понимание чего-нибудь, точка зрения. Рассматриваются явление, понятие, перспектива, что является психологической функцией человеческого восприятия, не заменяя объекты, а предоставляя разновидность структурирования. Появление новых данных приводят к видению дела в ином **аспекте**.

Фактор есть причина, движущая сила какого-либо процесса, определяющая его характер или отдельные его черты [6].

Предложенная модель представляет собой систему взглядов/размышлений о совокупности процессов товародвижения новшества (нового пищевого продукта с заданными свойствами) в граничных условиях (инновационное развитие хлебопекарной отрасли Алтая) с учетом факторов, способствующих или сдерживающих процесс НИД.

Проектируемым образом технико-технологического объекта в соответствии с целью моделирования и граничными условиями являются хлебобулочные изделия с добавкой грибного порошка с заданными функциональными свойствами.

Хлебобулочные изделия относятся к продуктам повседневного спроса. Поэтому в соответствии с принципами обогащения эта группа продуктов одна из приоритетных и поэтому как объект для обогащения дефицитными макро- и микронутриентами. Анализ научно-технической литературы показал, что за последние 20–30 лет накоплен достаточно большой опыт по обогащению хлебобулочных изделий биологически активными веществами разного происхождения.

Большой вклад в развитие отрасли внесли Л.Я. Ауэрман, В.И. Дробот, Л.И. Казанская, С.Я. Корячкина, Н.М. Дерканосова, Л.П. Пащенко, Л.И. Пучкова, Т.Б. Цыганова и другие исследователи. Учитывая, что развитие общества – это процесс, на ход которого влияет множество факторов, в том числе факторов питания, изучение проблемы неинфекционных хронических заболеваний (НИХЗ) проводится в системе санитарно-гигиенического мониторинга (СГМ).

Задачей СГМ является определение причинно-следственных связей между состоянием здоровья населения и воздействием на него факторов среды обитания для принятия профилактических мероприятий.

Многолетние результаты исследований показывают, что специализированные продукты питания в рационе человека способствуют поддержанию здоровья, однако проблема не реше-

на и требует совершенствования и продолжения.

Одним из перспективных путей реализации задач по созданию отечественного ассортимента специализированных хлебобулочных изделий является использование натуральных биологических активных веществ (БАВ) растительного происхождения.

Являясь природными ингредиентами, растительные добавки могут содержать в своем составе комплекс БАВ, положительно влияющих на ряд органов организма или на весь организм в целом. К добавкам, представляющим собой витаминно-минеральные полисахаридные комплексы, полученные из растительного сырья, можно отнести добавки на основе древесных грибов – алтайского гриба «Рейши» и «Чага».

Рядом исследователей показано, что гриб «Рейши» (лат. *Ganoderma lucidum*) и «Чага» (лат. *Inonotus obliquus*) обладают выраженными радиопротекторными свойствами. Эти свойства обусловлены уникальным химическим составом этих грибов, содержанием биологически активных полисахаридов, которые способствуют выведению радиоактивных веществ из организма человека, при этом сами грибы «Рейши» и «Чага» не накапливают радионуклиды в количествах, превышающих допустимый уровень.

Грибы содержат в своем составе все необходимые с точки зрения физиологии питания компоненты: белковые вещества, витамины, биофлавоноиды, пищевые волокна, макро- и микрэлементы [3, 11].

Для населения Алтайского края, относящегося к зоне повышенного радиационного загрязнения, актуально включение в рационы питания такой пищевой продукции. Это обуславливает актуальность создания рецептур и технологий ХБИ с внесением добавок, полученных на основе растительного сырья.

На первом этапе моделирования функциональных хлебобулочных изделий (ФХБИ) с грибными добавками приведена краткая характеристика Аспектов модели.

Аспект 1. Моделирование и разработка функционального ХБИ предполагает формирование понятийного аппарата применительно к проектируемому технико-технологическому образу: моделирование ФХБИ; граничные условия и принципы моделирования; заданные свойства продукта на этапе проектирования; допуски в соответствии с требованиями НД; идеальный конечный вариант – критерии, по которым ФХБИ будет относиться к группе «функциональные продукты питания»; потребительские свойства, в т.ч. новизна и конкурентоспособность.

Аспект 2. Подтверждение правильности и эффективности процесса моделирования (*in vitro* и/или *in vivo*) с выходом на функциональность разрабатываемого ХБИ в соответствии с

МНОГОАСПЕКТНАЯ КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВОГО ХЛЕБОБУЛОЧНОГО ИЗДЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОЦЕССА НАУЧНО-ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

требованиями существующих НД. Для этого необходим выбор перечня показателей их критериев и методов оценки, подтверждающих качество, безопасность и профилактическую эффективность нового продукта, в частности применительно к группам населения, проживающего в Алтайском крае.

Аспект 3. Данный аспект предполагает анализ эпидемиологической ситуации в области питания и здоровья с целью выявления наличия, глубины и распространенности алиментарно-зависимых заболеваний (дефицитов макро- и микронутриентов) среди разных групп населения Алтайского края.

Для этого можно использовать отчетные данные ТУ Роспотребнадзора по Алтайскому краю и статистические данные Алтайкрайстата. Представляют интерес собственные исследования по изучению фактического питания и микронутриентной обеспеченности отдельно взятых групп, наиболее подверженных (восприимчивых) к негативному воздействию конкретных факторов внешней среды и требующих «профилактического вмешательства». Это может быть функциональное питание, путем включения в него специализированных пищевых продуктов.

Вторая составляющая данного аспекта предполагает формирование «новизны» и патентоспособности нового ФХБИ на основе проведения патентного поиска по теме исследования. Кроме того, конкурентоспособность нового продукта на рынке определяется его потребительскими свойствами, к которым наряду с традиционными (социальная значимость, качество, безопасность, эргономичность, экологичность, стоимость) относится и патентоспособность. Указанные факторы характерны для рассмотренной группы аспектов и связаны с инновационным развитием отраслей пищевой промышленности в условиях Алтайского края.

Для формирования условий НИД в регионе взаимодействие «науки и производства» приоритетно в рамках тематических кластеров. Надо отметить, что отрасли АПК, в том числе и предприятия пищевой промышленности, относятся к малому предпринимательству, что в определенной степени осложняет процесс научно-инновационной деятельности и требует государственной поддержки. В регионе к 2023 году создано пять промышленных кластеров по приоритетным отраслям промышленности.

Близкими к пищевым отраслям по своей сути являются Промышленный технопарк «АлтайБиоТех» и Алтайский биофармацевтический кластер. Наличие в составе кластеров научных, образовательных и инновационных предприятий позволяет выстроить всю технологическую цепочку развития инноваций: от фундаментальных исследований до серийного производства нового продукта.

Кластеры объединяют свыше 30 участни-

ков (в том числе 27 производственных предприятий), расположенных в Барнауле, Бийске и Новоалтайске. Основная продукция, выпускаемая предприятиями, входящими в кластеры – лекарственные препараты, биологически активные добавки, сиропы и напитки на растительном сырье функционального назначения [5].

Наличие и функционирование профильных кластеров, специалистов и опыта свидетельствуют о том, что инновационный проект по разработке ФХБИ с добавками грибного порошка потенциально может быть поддержан с точки зрения продвижения «от научной разработки до аprobации и внедрения».

Учитывая, что Алтайский край – сельскохозяйственный регион, он имеет собственную сырьевую базу по таким основным видам сырья, как зерновые, молочное, мясное сырье. Это является одним из факторов, определяющим направления научных разработок в ассортименте специализированных продуктов питания.

На 01.01.2023 г. производство хлеба и хлебобулочных изделий в регионе осуществляют порядка 400 предприятий разного уровня. Это дает разработчикам (университету) возможность выбора наиболее прогрессивных предприятий для промышленной аprobации и внедрения новых технологий; создания на базе существующих новых малых инновационных предприятий.

В структуре производства хлеба и хлебобулочных изделий максимальную долю традиционно занимает хлеб из пшеничной муки 1 сорта (более 50 %). Однако с учетом того, что в регионе имеются отраслевые профильные научно-образовательные организации (Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова и его филиалы, Алтайский государственный аграрный университет и др.), ведутся разработки в сфере питания.

Анализ рынка показывает, что кроме традиционной пшеничной и ржаной муки в производстве хлеба предприятия используют другие злаки (овес, гречиху, ячмень, просо) для производства много-компонентных и цельнозерновых хлебов [16].

Третья группа аспектов связана с факторами, формирующими условия НИД, спрос рынка на ФХБИ. Наиболее востребованными среди хлебов на рынке Алтайского края являются ржаной хлеб (27 % от общего объема), а также хлеб, приготовленный из пшеничной муки первого сорта (24,7 % от общего объема) и булочные изделия из пшеничной муки высшего сорта (19,2 % от общего объема).

Потребительский спрос на хлеб и хлебобулочные изделия в Алтайском крае вариирует, но при этом высок, поскольку данные продукты являются неотъемлемой частью рациона питания населения. Однако с течением времени наблюдается изменение в предпочтениях потребителей в пользу более здоровых и нату-

ральных продуктов, что увеличивает спрос на функциональные и специализированные хлебобулочные изделия [14].

Данная статистика характеризует рынок ХБИ как стабильный, с одной стороны, с другой – как традиционный. При условии насыщения рынка продуктами питания специализированного назначения рынок ХБИ требует «корректировки» в ассортименте и разработки механизма формирования потребительского спроса на новые продукты.

В условиях процесса НИД новшество формируется в рамках разработки инновационного проекта, в связи с чем надо применять механизм формирования потребительских предпочтений (модель товародвижения новшества – от идеи до потребителя). Надо применять когнитивные методы научно-технического творчества.

Для создания образа инновационного проекта актуален «метод семикратного поиска». Так, для получения ответов на вопросы «что?» и «где?» используют модели маркетинговых исследований по стадиям процесса НИД в рамках периода разработки инновационного проекта.

Ответ на вопрос «чем?» можно получить путем сравнительной оценки инновационных потенциалов участников процесса НИД: «университет» и «производство». Ответом на вопрос «кто?» будет являться выбор участника процесса НИД с инновационным потенциалом, обладающим разработкой и практической реализацией инновационного проекта.

Сформированные в процессе разработки новые потребительские свойства, в том числе новизна и конкурентоспособность специализированного продукта, отвечают на вопрос: «как?» вызвать интерес и востребованность этого продукта у потребителя.

Выбор проблемы, ее актуальность, обоснованность направления процесса НИД в рамках обозначенной тематики применительно к граничным условиям, глубина проработки, выявление и интеграция участников инновационного проекта, как совокупность Аспектов когнитивной модели дают ответы на вопросы «зачем?» и «когда?».

Применение многоаспектной когнитивной модели предусматривает формирование творческого коллектива по теме инновационного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ научно-технической литературы показал, что в большей степени разработки специализированных продуктов питания осуществляются на основе традиционного подхода с обоснованием и глубокой проработкой в граничных условиях «от сырья до готовой продукции и обеспечения ее качества и безопасности по факту и с учетом установленных сроков годности».

В условиях процесса НИД формирование технико-технологического образа нового пищевого продукта (НПП) целесообразно рассматривать на основе применения многоаспектной когнитивной модели по теме инновационного исследования. Это обеспечивает обоснование концептуального образа НПП для формирования вариантов технико-технологического решения нового пищевого продукта.

Знание закономерности инновационного цикла с учетом специфики региона и отрасли позволяет моделировать инновационный проект с учетом множества аспектов и факторов применительно к конкретной проблеме и продукту для ее решения. Рекомендуется для создания новых продуктов питания использовать описанный в статье пример разработки хлебобулочного изделия с добавлением грибного порошка для населения, проживающего в Алтайском крае и др.

Многоаспектная когнитивная модель формирования концептуального образа нового ТО, ТС обеспечивает организацию творчества специалистов с учетом разработки технических решений инновационного проекта. Организация творчества специалистов формируется на основе процесса НИД на базе аспектов в системе «наука и образование – производство – рынок» по теме Инновационного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водясов П.В. Доктрина продовольственной безопасности России и ее регионов: от постановки цели к методикам ее достижения // Экономика профессия бизнес, 2021, № 2. С. 13–20.
2. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации, утв. Указом Президента Российской Федерации от 21.01.2020 г. № 20.
3. Зейле Л.А., Новиков И.В., Петрова Е.В., Рабцевич Е.С. Элементный состав чаги березовой трутовика косотрубчатого (*Inonotus obliquus*) // Химия растительного сырья. 2022. № 1.
4. Маюрикова Л.А. Обогащение пищевых продуктов как фактор профилактики микронутриентной недостаточности / Л.А. Маюрикова, А.А. Кокшаров, Т.В. Крагива, С.В. Новоселов // Техника и технология пищевых производств 2020, Т. 50, № 1. С. 124–136.
5. Министерство экономического развития Алтайского края / Мониторинг инновационной деятельности за 2023 год.
6. Новоселов С.В. Теоретическая инноватика: научно-инновационная деятельность и управление инновациями : учеб. пособие / С.В. Новоселов, Л.А. Маюрикова. СПб. : ГИОРД, 2017. 416 с.
7. Новоселов С.В., Маюрикова Л.А., Маковская И.С. Апробация многоаспектной когнитивной модели для формирования образа объекта в условиях инновационной деятельности сферы питания // Ползуновский вестник. 2012. № 2-2.
8. Новоселов С.В., Исаева Н.В., Вассев К.С. Моделирование новшества в сфере питания на основе процесса научно-инновационной деятельности // V Международная научно-практическая конференция «Проблемы техносферной безопасности», Изд-во АлтГТУ, Барнаул, 2022. С. 15–20.
9. Петрова М.В. Роль и значение агропромышленного комплекса Алтайского края в обеспечении продовольственной безопасности России // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал, 2021 № 3 (67) URL : <https://eee-region.ru/article/6712/>.
10. Пищевые технологии будущего: инновационные

МНОГОАСПЕКТНАЯ КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВОГО ХЛЕБОБУЛОЧНОГО ИЗДЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОЦЕССА НАУЧНО-ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

идеи, научный поиск, креативные решения / Сборник Материалов науч.-практич. конференции, посвященной памяти Р.Д. Поландовой, Москва, 2023, 193 с.

11. Пучкова Т.А., Бабицкая В.С., Щерба В.В. Перспективы использования биологически активных соединений лекарственных грибов // Наука и инновации. 2006. №12 (46).

12. Смирнов В.Н. Динамика развития аграрного сектора экономики России в 2022 году // Бюллетень науки и практики. 2023. Т. 9. № 4. С. 430–433.

13. Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года, утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 июня 2016 г. № 1364-р.

14. Социально-экономическое положение Алтайского края за 2023 год. Стат. докл. / Управление Федеральной службы государственной статистики по Алтайскому краю и Республике Алтай. Б., 2024. 148 с.

15. Тихомиров А.И. Государственная поддержка АПК России: основные тенденции и социально-экономическое значение Международный сельскохозяйственный журнал, 2024. Т. 67. № 2. С. 121–125.

16. Управление Алтайского края по пищевой, перерабатывающей, фармацевтической промышленности и биотехнологиям / Аналитическая информация о развитии отраслей за 2023 год.

Информация об авторах

С. В. Новоселов – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механика и инноватика» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Л. А. Маюровикова – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и организации общественного питания» Кемеровского государственного университета.

Н. В. Исаева – аспирант, ассистент кафедры «Механика и инноватика» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

REFERENCES

1. Vodiasov, P.V. (2021). The doctrine of food security in Russia and its regions: from setting a goal to methods of achieving it. *Economics profession business* (2), 13-20. (In Russ.).
2. The Doctrine of Food Security of the Russian Federation, approved By Decree of the President of the Russian Federation No. 20 dated 01/21/2020.
3. Zeile, L.A., Novikov, I.V., Petrova, E.V. & Rabtsevich, E.S. (2022). The elemental composition of the birch tinder chaga (*Inonotus obliquus*). *Chemistry of vegetable raw materials*. № 1. (In Russ.).
4. Mayurnikova, L.A., Koksharov, A.A., Krapiva, T.V. & Novoselov, S.V. (2020). Fortification of food products as a factor in the prevention of micronutrient insufficiency. *Technique and technology of food production*. vol. 50, (1), 124-136. (In Russ.).
5. Ministry of Economic Development of the Altai Territory / Monitoring of innovation activity for 2023.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



ИЗУЧЕНИЕ АССОРТИМЕНТА И МАКРОНУТРИЕНТНОГО СОСТАВА СУХИХ СМЕСЕЙ ЭНТЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Дмитрий Борисович Никитюк ¹, Елена Михайловна Щетинина ²,
Инна Юрьевна Тармаева ³, Анастасия Сергеевна Билялова ⁴

^{1, 2, 3, 4} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, г. Москва, Россия

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

^{1, 3} Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

¹ dimitrynik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2259-1222>

² schetinina2014@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3463-9502>

³ tarmaeva@ion.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7791-1222>

⁴ asbilyalova@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1162-7015>

Аннотация. Одной из первоочередных задач государственной политики в области здорового питания является укрепление здоровья населения через обеспечение его качественными пищевыми продуктами. Динамично развивающийся продовольственный рынок предлагает потребителю продукцию, способную удовлетворять его потребности как по пищевой ценности, так и в отношении к ее фасовке. Следует отметить, что в зависимости от возраста, состояния здоровья, уровня физической и социальной активности каждый человек в той или иной мере нуждается в индивидуально подбранном рационе питания. По этой причине одним из перспективных направлений развития пищевой индустрии является создание и организация производства обогащенных продуктов, в том числе специализированного назначения. Вместе с тем, существует группа потребителей, нуждающихся в особых видах пищевой продукции. К ним относятся пациенты клиник после различных хирургических вмешательств, а также с некоторыми видами заболеваний, для которых необходима особенная нутритивная поддержка. Расширение ассортимента пищевой продукции специализированного лечебного питания соответствующего состава и свойств позволит повысить эффективность лечения подобных заболеваний.

В статье приведен анализ продукции энтерального питания, представлены результаты исследований по изучению ассортиментного ряда, макронутриентного состава, а также сырьевой основы сухих смесей для энтерального питания отечественного производства.

Ключевые слова: энтеральное питание, нутритивная поддержка, специализированные пищевые продукты, лечебное питание, молочные белки, состав.

Для цитирования: Никитюк Д. Б., Щетинина Е. М., Тармаева И. Ю., Билялова А. С. Изучение ассортимента и макронутриентного состава сухих смесей энтерального питания отечественного производства // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 150–154. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.018. EDN: <https://elibrary.ru/FFYVKF>.

Original article

STUDY OF THE ASSORTMENT AND MACRONUTRIENT COMPOSITION OF DRY ENTERAL NUTRITION MIXTURES OF DOMESTIC PRODUCTION

Dmitry B. Nikityuk ¹, Elena M. Shchetinina ², Inna Yu. Tarmaeva ³,
Anastasia S. Bilyalova ⁴

^{1, 2, 3, 4} Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia

© Никитюк Д. Б., Щетинина Е. М., Тармаева И. Ю., Билялова А. С., 2025

ИЗУЧЕНИЕ АССОРТИМЕНТА И МАКРОНУТРИЕНТНОГО СОСТАВА СУХИХ СМЕСЕЙ ЭНТЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

¹ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

^{1, 3} Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

¹ dimitrynik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2259-1222>

² schetinina2014@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3463-9502>

3 tarmaeva@ion.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7791-1222>4 asbilyalova@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1162-7015>

Abstract. One of the primary objectives of the state policy in the field of healthy nutrition is to strengthen the health of the population by providing it with high-quality food products. The dynamically developing food market offers consumers products that can satisfy their needs both in terms of nutritional value and in relation to their packaging. It should be noted that, depending on age, health status, level of physical and social activity, each person to one degree or another needs an individually selected diet. For this reason, one of the promising areas of development of the food industry is the creation and organization of production of fortified products, including those for specialized purposes. At the same time, there is a group of consumers who need special types of food products. These include patients of clinics after various surgical interventions, as well as with certain types of diseases that require special nutritional support. Expanding the range of food products of specialized therapeutic nutrition of the appropriate composition and properties will improve the effectiveness of treatment of such diseases. The article provides an analysis of enteral nutrition products, presents the results of research on the study of the product range, macronutrient composition, as well as the raw material base of dry mixes for enteral nutrition of domestic production.

Keywords: enteral nutrition, nutritional support, specialized food products, therapeutic nutrition, milk proteins, composition.

For citation: Nikityuk, D. B., Shchetinina, E. M., Tarmaeva, I. Yu. & Bilyalova, A. S. (2025). Study of the assortment and macronutrient composition of dry mixtures of enteral nutrition of domestic production. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 150-154. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.018. EDN: <https://elibrary.ru/FFYVKF>.

ВВЕДЕНИЕ

Агропромышленный комплекс Российской Федерации активно развивается, чему способствует Федеральный закон «О развитии сельского хозяйства» от 29.12.2006 № 264-ФЗ [1], а также нормативные правовые акты Правительства Российской Федерации, которые обозначили одной из основных целей государственной аграрной политики РФ повышение конкурентоспособности и обеспечение качества продовольственных товаров. Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года, утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 июня 2016 года № 1364-р [2], и Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 года [3], ставят задачу укрепления здоровья населения через обеспечение его качественными продуктами питания. Расширение ассортимента специализированной пищевой продукции лечебного питания является актуальным направлением пищевой индустрии и медицины, позволяющим повысить эффективность лечения ряда социально-значимых заболеваний.

Введенное с 2014 года продовольственное эмбарго в отношении Российской Федерации обусловило необходимость обеспечения технологического суверенитета в области пищевых продуктов и ингредиентов [4], в первую очередь, пищевых продуктов специализированного

назначения, в том числе лечебного питания, которые стали одним из динамично развивающихся сегментов продовольственного рынка.

Во многих публикациях отмечается использование в различных отраслях промышленности белков молочного происхождения. В частности, Меньшикова Л. Н. в своих исследованиях отмечает, что в мясной промышленности уже на протяжении длительного времени используются белки молочного происхождения, а именно: молоко пастеризованное, молоко сухое, обезжиренное сухое молоко, казеинат натрия, молочная сыворотка. Целевое применение этих компонентов связано с улучшением вкусоароматических и функциональных характеристик продукции, например, прочности и водосвязывающей способности мясных фаршей, а также с повышением пищевой и биологической ценности продукта [5]. Российскими и зарубежными учеными опубликованы статьи о пользе молочных белков, создании на их основе различных видов пищевой продукции как массового потребления, так и специализированного назначения (продуктов диетического лечебного и детского питания) [6, 7, 8, 9, 10].

Согласно медико-биологическим исследованиям, при наличии ряда заболеваний и хирургических вмешательств пациенты нуждаются в нутритивной поддержке в виде продуктов особенного состава и свойств [11, 12], которые относятся к категории пищевой продукции энтерального питания (ЭП).

В соответствии с определением термина, приведенного в ТР ТС 027/2011, пищевая продук-

ция энтерального питания – жидкая или сухая (восстановленная до готовой к употреблению) пищевая продукция диетического лечебного или диетического профилактического питания, предназначенная для перорального употребления непосредственно или введения через зонд при невозможности обеспечения организма в пищевых веществах и энергии обычным способом.

Согласно ГОСТ 35004-2023 «Продукция пищевая специализированная. Продукты пищевые энтерального питания базовые. Общие технические условия» [13], базовым пищевым продуктом энтерального питания (ЭП) принято считать специализированный пищевой продукт энтерального питания, содержащий в своем составе белки от 15 до 25, жиры – от 25 до 40, углеводы – от 45 до 65 (в процентах от энергетической ценности), макро- и микроэлементы, водо- и жирорастворимые витамины, а также другие нутриенты, необходимые для обеспечения функциональных свойств продукта. Энтеральное питание обеспечивает особенные, преимущества питания пациентам, включая сохранение кишечного микробиома, а также модуляцию иммунных и воспалительных реакций [14, 15, 16, 17]. В ряде исследований показано, что применение продуктов ЭП на ранних этапах лечения помогает улучшить его результаты у пациентов в критическом состоянии [18, 19].

МЕТОДЫ

Авторами проведен поиск оригинальных статей на тему производства и применения продуктов ЭП на глубину 5 лет, отобраны и проанализированы доступные статистические данные на тему сухих смесей для энтерального питания.

Исследование выполнено в рамках средств, выделяемых для реализации государственного задания ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» (FGMF-2025-0011).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Существуют три формы белка, в которых он может присутствовать в смесях для ЭП: интактный, или цельный белок (казеин, сывороточный, соевый, яичный, молочный); пептиды, представляющие собой гидролизованные белки; свободные аминокислоты [21].

В ассортименте продукции ЭП отечественных производителей представлены сухие смеси и жидкие формы продуктов типа сиппинг, отличающиеся по своему химическому составу и свойствам, ориентированные на пациентов с различными клиническими проблемами. Ассортимент пищевых продуктов ЭП отечественного производства включает в себя стандартные смеси, полумакроэлементные смеси, смеси направленного действия и загустители для еды и напитков.

Основу отечественных смесей ЭП составляют концентрат молочного белка, концентрат белка молочной сыворотки, гидролизат сывороточных белков или их различное сочетание.

С учетом того, что при различных клинических случаях необходима разная макронутриентная поддержка [5, 7, 9], состав смесей должен отличаться не только по содержанию белков, жиров и углеводов, но и по содержанию микронутриентов: минеральных веществ и витаминов. На рисунке 1 представлен макронутриентный состав сухих смесей отечественного производства [22].

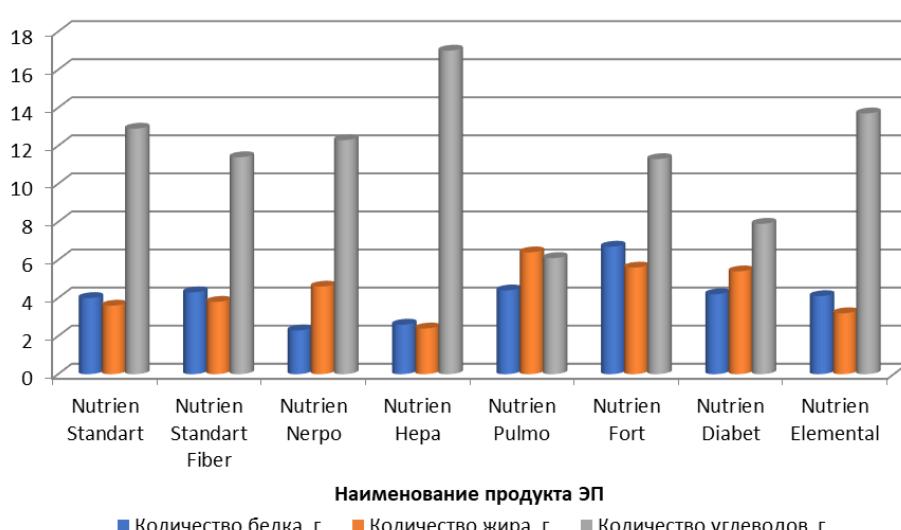


Рисунок 1 – Содержание макронутриентов в сухих смесях ЭП отечественного производства

Figure 1 – Macronutrient content in dry mixtures of EP of domestic production

ИЗУЧЕНИЕ АССОРТИМЕНТА И МАКРОНУТРИЕНТНОГО СОСТАВА СУХИХ СМЕСЕЙ ЭНТЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Согласно рисунку 1, сухие смеси отечественного производства по химическому составу представлены следующим ассортиментом: 34 % – полимерные смеси, 56 % – смеси метаболической направленности и 10 % – олигомерные смеси; по содержанию белка: 56 % – изонитрогенные смеси и 44 % – гипернитрогенные; по содержанию энергетической ценности: 22 % – изокалорические и 88 % – универсальные смеси в зависимости от разведения. Количество белка в продуктах ЭП находится в пределах от минимального 2,3 г в Nutrien Nero до максимального 6,7 г в Nutrien Fort. Содержание жира колеблется от 2,4 г в Nutrien Nero до 6,8 г. в Nutrien Pulmo, а содержание углеводов минимально в Nutrien Pulmo – 6,1 г, максимально – в Nutrien Нера – 17,0 г. Стоит отметить, что энергетическая ценность в 100 мл готового продукта составляет 419 кДж /100 ккал во всех смесях, кроме Nutrien Fort 525 кДж /125 ккал.

ВЫВОДЫ

В ассортименте отечественных продуктов ЭП представлены сухие смеси и жидкие формы, типа сиппинг, отличающиеся по своему химическому составу и свойствам, ориентированные на пациентов с различными клиническими проблемами. Основу отечественных смесей ЭП составляют концентрат молочного белка, концентрат белка молочной сыворотки, гидролизат сывороточных белков или их различное сочетание. Ассортимент отечественных сухих смесей ЭП унаследован наличием универсальных смесей, энергетическую ценность которых можно регулировать в зависимости от концентрации их разведения. Однако стоит отметить, что данное направление специализированной продукции и ее рынок являются сравнительно молодыми и не обеспечивают все потребности, при этом отдельные группы пациентов нуждаются в персонализации своего питания. Таким образом, разработка новых отечественных специализированных продуктов ЭП является перспективной и актуальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «О развитии сельского хозяйства» от 29.12.2006 г. № 264-ФЗ.
2. Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года, утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 июня 2016 г. № 1364-р.
3. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г.
4. Беляев С.А., Зюкин Д.А. Снижение импортозависимости как один из параметров обеспечения экономической безопасности России // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3. С. 181-187.
5. Меньшикова Л.Н. Функционально-технологические свойства смесей на основе молочных белков и их применение при производстве мясных продуктов // Все о мясе. 2010. № 4. С. 44-46
6. Шуваева Г.П., Мерзликина А.А., Свиридовича Т.В., Вострикова А.С., Валуйских В.А. Разработка молочного десерта, обогащенного гидролизатом белков молочной сыворотки // Актуальная биотехнология. 2022. № 1. С. 362.
7. Семенова Е.С., Симоненко Е.С., Симоненко С.В., Зорин С.Н., Петров Н.А., Мазо В.К. Исследование процесса гидролиза белков молока с использованием ферментных препаратов отечественного производства // Пищевые системы. 2023. Т. 6. № 2. С. 224-232. DOI: 10.21323/2618-9771-2023-6-2-224-232.
8. Симоненко С.В., Антилова Т.А., Андросова Н.Л., Фелик С.В., Кудряшова О.В., Симоненко Е.С. Концентраты молочных белков для использования в специализированных продуктах питания // Пищевая промышленность. 2022. № 11. С. 19-21. DOI: 10.52653/PP1.2022.11.11.004.
9. Kenbon Beyene Abdisa, Emőke Szerdahelyi, Máté András Molnár, László Friedrich, Zoltán Lakner, András Koris, Attila Toth, Arjjit Nath Metabolic Syndrome and Biotherapeutic Activity of Dairy (Cow and Buffalo) Milk Proteins and Peptides: Fast Food-Induced Obesity Perspective-A Narrative Review // Biomolecules. 2024 Apr; 14(4): 478. doi: 10.3390/biom14040478.
10. Qausar Hamed ALKaisy, Jasim S. Al-Saadi, Ali Khudhair Jaber AL-Rikabi, Ammar B. Altemimi, Mohammad Ali Hesarinejad, Tarek Gamal Abedelmaksoud Exploring the health benefits and functional properties of goat milk proteins // Food Sci Nutr. 2023 Oct; 11(10): 5641-5656. doi: 10.1002/fsn3.3531.
11. Baiu I., Spain D.A. Enteral Nutrition // JAMA. 2019 May 28; 321(20):2040. doi: <https://doi.org/10.1001/jama.2019.4407>.
12. Mohamed Elfadil O., Velapati S.R., Patel J., Hurt R.T., Mundi M.S. Curr Enteral Nutrition Therapy: Historical Perspective, Utilization, and Complications // Gastroenterol Rep. 2024 Aug; 26(8):200-210. doi: <https://doi.org/10.1007/s11894-024-00934-8>.
13. Межгосударственный стандарт ГОСТ 35004-2023 «Продукция пищевая специализированная. Продукты пищевые энтерального питания базовые. Общие технические условия»: утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 сентября 2023 г. № 1023-ст : введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 сентября 2024 г. : У. 20c.
14. Wang A., Yang J., Jiang L., Chen J., Ma Y., Wang Y.J. Clin Nurs. Best evidence summary for aspiration prevention and management in critically ill patients with nasogastric feeding. 2024 Aug 12. doi: <https://doi.org/10.1111/jocn.17342>.
15. Deng Y., Ren Y., Wang W., Sun R., Pei H., Song H. Zhonghua Wei Zhong Bing Ji Jiu Yi Xue Summary of the best evidence for the energy and protein intake targets and calculation in critically ill patients. 2023 Aug; 35(8):849-855. doi: <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121430-20230130-00043>.
16. Krezalek M.A., Yeh A., Alverdy J.C., Morowitz M. Influence of nutrition therapy on the intestinal microbiome. Curr Opin Clin Nutr Metab Care. 2017; 20(2):131-137. DOI: <https://doi.org/10.1097/MCO.0000000000000348>.
17. Singer P., Blaser A.R., Berger M.M., Alhazzani W., Calder P.C., Casae M.P., Hiesmayr M., Mayer K., Montejano J.C., Pichard C. [et al.]. ESPEN guideline on clinical nutrition in the intensive care unit. Clin Nutr. 2019; 38(1):48-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2018.08.037>.
18. Ke L., Lin J., Doig G.S., van Zanten A.R.H., Wang Y., Xing J., Zhang Z., Chen T., Zhou L., Jiang D. [et al.]. Actively implementing an evidence-based feeding guideline for critically ill patients (NEED): a multicenter, cluster-randomized, controlled trial. Crit Care. 2022; 26(1):46. doi: <https://doi.org/10.1186/s13054-022-03921-5>.
19. Bechtold M.L., Brown P.M., Escuro A. [et al.]. When is enteral nutrition indicated? JPEN J Parenter Enteral

Nutr. 2022; 46(7): 1470–1496. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpen.2364>.

20. Как развивается категория лечебного питания в России и мире. [Электронный ресурс]. URL : <https://milknews.ru/longridy/lechebnoye-pitaniye.html>. (Дата обращения: 27.10.2024).

21. Ерпулёва Ю.В. Смеси на основе гидролизата сывороточного белка в практике врача-интенсивиста // Медицинский алфавит. 2018. Т. 2. № 18 (355). С. 43–50.

22. ЗАО Инфаприм: [Электронный ресурс]. URL : <https://infaprime.com/ru> (Дата обращения: 01.11.2024).

Информация об авторах

Д. Б. Никитюк – доктор медицинских наук, профессор, акад. РАН, директор 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».

И. Ю. Тармаева – доктор медицинских наук, профессор, ученый секретарь ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии».

А. С. Билялова – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории пищевых

биотехнологий и специализированных продуктов ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии».

Information about the authors

D.B. Nikityuk - Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the Federal State Budgetary Institution of Science "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".

I.Yu. Tarmaeva - Doctor of Medical Sciences, Professor, Scientific Secretary of the Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Research Center of Nutrition and Biotechnology".

A.S. Bilyalova - Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Laboratory of Food Biotechnologies and Specialized Products of the Federal State Budgetary Institution "Federal Research Center for Nutrition and Biotechnology".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)

УДК 664.76

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.019

EDN:FNNHQR

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА СОРГО

Екатерина Сергеевна Серебренникова ¹, Людмила Витальевна Анисимова ²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный центр оценки безопасности и качества продукции агропромышленного комплекса». Алтайский филиал, Барнаул, Россия

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ silver.775594@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0651-3512>

² anislv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7900-2935>

Аннотация. Исследовано два способа гидротермической обработки (ГТО) сорго с интенсивным увлажнением зерна. Интенсификацию увлажнения зерна осуществляли в первом способе путем пропаривания, во втором способе – путем увлажнения под вакуумом с последующим отволаживанием. Завершающим этапом в обоих способах ГТО явилась сушка зерна в псевдоожженном слое. Поиск оптимальных режимов ГТО осуществляли с помощью математических методов планирования экспериментов. За основу взяли план полного факторного эксперимента ПФЭ 2³. При обработке первичных данных и оптимизации процесса ГТО, а также при построении математических моделей использовали программы «Stat Soft Statistica 13.3.7.704.19» и «Microsoft Excel». В способе ГТО с пропариванием зерна сорго в качестве изменяемых факторов при поиске оптимальных условий процесса были выбраны: давление насыщенного водяного пара; температура агента сушки; влажность зерна после сушки. Продолжительность пропаривания стабилизировали на уровне 4 мин. В способе ГТО с увлажнением зерна под вакуумом измененияли на двух уровнях следующие факторы: степень разрежения воздуха в рабочей камере установки; температуру агента сушки; влажность зерна после сушки. Зерно сорго увлажняли до влажности (21,0±0,5) %, после увлажнения отволаживали в течение 6 часов. Выходом процесса ГТО зерна сорго послужили показатели: выход шлифованного ядра; коэффициент шелушения; коэффициент цельности ядра, показатель степени измельчения ядра. Программы оптимизации процесса ГТО зерна сорго рассчитаны по методике Бокса-Уилсона с учетом межфакторных взаимодействий. По итогам реализации программ оптимизации и анализа полученных данных определены оптимальные режимы ГТО сорго с пропариванием и ГТО сорго с увлажнением зерна под вакуумом.

Ключевые слова: сорго, гидротермическая обработка зерна, пропаривание зерна, увлажнение зерна под вакуумом, сушка зерна, оптимальные режимы, выход ядра, коэффициент шелушения, коэффициент цельности ядра.

Для цитирования: Серебренникова Е. С., Анисимова Л. В. Определение оптимальных режимов гидротермической обработки зерна сорго // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 155–160. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.019. EDN: <https://elibrary.ru/FNNHQR>.

Original article

DETERMINATION OF OPTIMAL MODES OF HYDROTHERMAL TREATMENT OF SORGHUM GRAIN

Ekaterina S. Serebrenikova ¹, Ludmila V. Anisimova ²

¹ Federal State Budgetary Institution "Federal Center for Assessment of safety and quality of products of the agro-industrial complex". Altai Branch, Barnaul, Russia

² Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ silver.775594@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0651-3512>

² anislv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7900-2935>

Abstract. Two methods of sorghum hydrothermal treatment (HTT) with intensive grain moistening were studied. Intensification of grain moistening was carried out: in the first method - by steaming, in the second method - by moistening under vacuum with subsequent resting. The final stage in both methods of

HTT was drying of grain in a fluidised bed. Search for optimal modes of HTT was carried out with the help of mathematical methods of planning experiments. The plan of the full factor experiment FFE 2³ was taken as a basis. When processing primary data and optimising the HTT process, as well as when building mathematical models, the programs 'Stat Soft Statistica 13.3.7.704.19' and 'Microsoft Excel' were used. In the method of HTT with steaming of sorghum grain as variable factors in the search for optimal conditions of the process were chosen: pressure of saturated water vapour; temperature of the drying agent; moisture of grain after drying. Duration of steaming was stabilised at the level of 4 min. In the method of HTT with moistening of grain under vacuum the following factors were changed at two levels: the degree of air rarefaction in the working chamber of the unit; temperature of the drying agent; moisture of grain after drying. Sorghum grain was moistened up to moisture (21,0±0,5) %, after moistening it was rested for 6 hours. The sorghum grain HTT process outputs were as follows: polished kernel yield; peeling coefficient; kernel integrity coefficient, kernel milling degree index. Programs of sorghum grain HTT process optimisation were calculated according to the Box-Wilson method with consideration of inter-factor interactions. Following the implementation of optimisation programmes and analysis of the obtained data, the optimal regimes of sorghum HTT with steaming and sorghum HTT with grain moistening under vacuum were determined.

Keywords: sorghum, grain hydrothermal treatment, grain steaming, grain moistening under vacuum, grain drying, optimal modes, kernel yield, peeling coefficient, kernel integrity coefficient.

For citation: Serebrenikova, E. S. & Anisimova, L. V. (2025). Determination of optimal modes of hydro-thermal treatment of sorghum grain. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 155-160. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.019. EDN: <https://elibrary.ru/FNNHQR>.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день агропромышленный комплекс Алтайского края претерпевает значительные изменения, одной из причин которых является повышение среднегодовых температур за последние 30 лет [1]. Кроме того, наличие засушливых районов в юго-западной части края и более 3 млн. га солончаковых и засоленных почв [2] влечет за собой заинтересованность фермерских хозяйств искать наиболее перспективные культуры, способные выживать в этих условиях. Сорго относится к таким культурам.

Одной из отличительных особенностей сорго является его засухоустойчивость и нетребовательность к почвам. Сорго способно останавливать свое развитие во время наступления неблагоприятных условий окружающей среды и продолжать его при улучшении погодных условий, а также сохранять высокую урожайность из года в год [3, 4, 5, 6].

Сорго выращивают во многих странах мира. Возделыванием данной культуры занимается 110 стран. В 2023 году урожайность сорго достигла почти 564 ц/га в Омане, что является максимальной отметкой среди зерновых, зернобобовых и масличных культур мира. В России средняя урожайность сорго составляет около 13 ц/га, по посевным площадям сорго занимает 38 место [7].

Зерно сорго – важный пищевой источник, что подтверждается его химическим составом: содержание белка достигает 21 %, жира – 8 %, золообразующих веществ – 3 %, клетчатки – около 4 % [8, 9, 10]. Но больше всего в зерне сорго содержится крахмала – до 80 %, его отличительной особенностью является более медленная скорость ферментативного гидролиза в сравнении с другими зерновыми культурами [13]. Белок сорго содержит незаменимые аминокислоты: валин, метионин, аргинин, фенилаланин, изолейцин [11]. Кроме того, сорго

является источником витаминов, таких как тиамин (0,38 мг/100 г), ниацин (11,5 мг/100 г), рибофлавин (0,15 мг/100 г) [12].

Таким образом, сорго следует рассматривать как перспективную культуру для возделывания в Алтайском крае. При этом основной проблемой, препятствующей более активному выращиванию зернового сорго, является недостаток информации о путях его реализации в качестве пищевой культуры, а также эффективных технологиях при переработке в крупу и муку.

Одним из известных технологических процессов, позволяющих повысить выход и качество готовой продукции в крупяном производстве, является гидротермическая обработка (ГТО) зерна.

Целью данной работы явился поиск оптимальных режимов ГТО сорго с использованием интенсивного увлажнения зерна путем пропаривания и увлажнения под вакуумом.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ

В работе использовали голозерное красное сорго сорта Орловское. Изучали два способа ГТО сорго. Интенсификацию увлажнения зерна осуществляли: в первом способе – путем пропаривания, во втором способе – путем увлажнения под вакуумом с последующим отволаживанием. Завершающим этапом в обоих способах ГТО явилась сушка зерна в псевдоожженном слое.

После ГТО зерно сорго направляли на операцию шелушения-шлифования в шелушитель типа ЗШН. Продукты шелушения разделяли на наборе сит Ø 1,5/№ 08. Сходом с верхнего сита получали целое ядро, сходом с нижнего сита – дробленое ядро, проходом через нижнее сито – мучку. Лузгу отвеивали на аспираторе.

Все опыты проводили на лабораторных установках.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА СОРГО

Поиск оптимальных режимов ГТО осуществляли с помощью математических методов планирования экспериментов. За основу взяли план полного факторного эксперимента ПФЭ 2³.

При обработке первичных данных и оптимизации процесса ГТО, а также при построении математических моделей использовали программы «Stat Soft Statistica 13.3.7.704.19» и «Microsoft Excel».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В связи с тем, что на эффективность процесса ГТО зерна сорго, как и других культур, влияет несколько факторов, для обоих исследуемых способов ГТО были проведены серии однофакторных экспериментов, позволивших выделить наиболее значимые факторы и подобрать уровни стабилизации остальных факто-

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов процессов ГТО зерна сорго

Table 1 – Levels and intervals of variation of the factors of hydrothermal processing of sorghum grain

Фактор	Буквенное обозначение	Уровень фактора			Шаг
		нижний	средний	верхний	
Пропаривание					
Давление насыщенного водяного пара, р, МПа	x ₁	0,05	0,15	0,25	0,10
Температура агента сушки <i>t_{ac}</i> , °C	x ₂	80	110	140	30
Влажность зерна после сушки <i>W_{3c}</i> , %	x ₃	12,5	14,5	16,5	2
Увлажнение под вакуумом					
Степень разрежения воздуха <i>p_a</i> , МПа	x ₁	-0,03	-0,05	-0,07	0,02
Температура агента сушки <i>t_{ac}</i> , °C	x ₂	90	110	130	20
Влажность зерна после сушки <i>W_{3c}</i> , %	x ₃	13,5	15,0	16,5	1,5

Выходом процесса ГТО зерна сорго с пропариванием послужили показатели: выход шлифованного ядра *B* – *y₁*, %; коэффициент шелушения *K_ш* – *y₂*, %; коэффициент цельности ядра *К_ц* – *y₃*, %. Выход процесса ГТО зерна сорго с увлажнением под вакуумом оценивали по выходу шлифованного ядра *B* – *y₁*, %; показателю степени измельчения (ПСИ)

Таблица 2 – Уравнения регрессии, показывающие зависимость выхода процесса от параметров ГТО зерна сорго

Table 2 – Regression equations showing the dependence of the process output on the parameters of hydrothermal treatment of sorghum grain

Показатель	Уравнения регрессии (пропаривание)
Выход шлифованного ядра, %	$y_1 = 90,45 + 0,26 \cdot x_1 + 0,58 \cdot x_2 + 1,15 \cdot x_3 - 0,26 \cdot x_2 x_3 - 0,79 \cdot x_1 x_2 x_3$
Коэффициент шелушения, %	$y_2 = 98,87 + 0,33 \cdot x_1 + 0,16 \cdot x_2 - 0,37 \cdot x_3 - 0,16 \cdot x_1 x_2 x_3$
Коэффициент цельности ядра, %	$y_3 = 96,53 - 0,23 \cdot x_2 + 0,30 \cdot x_3 - 0,22 \cdot x_1 x_2 - 0,20 \cdot x_1 x_3$
Выход шлифованного ядра, %	$y_1 = 86,38 - 0,29 \cdot x_1 + 0,35 \cdot x_2 + 0,34 \cdot x_3 + 0,31 \cdot x_1 x_2 - 0,27 \cdot x_2 x_3 - 0,26 \cdot x_1 x_3 + 0,62 \cdot x_1 x_2 x_3$
Показатель степени измельчения ядра, %	$y_2 = 46,40 - 0,37 \cdot x_1 - 4,29 \cdot x_3 + 0,72 \cdot x_1 x_2 - 1,10 \cdot x_2 x_3 - 0,96 \cdot x_1 x_3 - 1,69 \cdot x_1 x_2 x_3$
Коэффициент цельности ядра, %	$y_3 = 90,83 + 0,53 \cdot x_2 + 1,48 \cdot x_3 - 0,61 \cdot x_1 x_2 + 0,49 \cdot x_1 x_2 x_3$

Из представленных уравнений регрессии следует, что повышение давления насыщенного водяного пара ведет к увеличению выхода шлифованного ядра сорго, а также повышению коэффициента шелушения. Выход шлифованного ядра и коэффициент шелушения зерна сорго

ров применительно к зерну сорго.

В способе ГТО с пропариванием зерна сорго в качестве изменяемых факторов при поиске оптимальных условий процесса были выбраны: *p* – давление насыщенного водяного пара; *t_{ac}* – температура агента сушки; *W_{3c}* – влажность зерна после сушки. Продолжительность пропаривания стабилизировали на уровне 4 мин.

В способе ГТО с увлажнением зерна под вакуумом изменяли на двух уровнях следующие факторы: *p_a* – степень разрежения воздуха в рабочей камере установки; *t_{ac}* – температуру агента сушки; *W_{3c}* – влажность зерна после сушки. Зерно сорго увлажняли до влажности (21,0±0,5) %, после увлажнения отволаживали в течение 6 часов.

Уровни и интервалы варьирования факторов процессов ГТО зерна сорго приведены в таблице 1.

ядра – *y₂*, %; коэффициенту цельности ядра *К_ц* – *y₃*, %.

В результате реализации планов экспериментов, а также статистической обработки полученных данных с использованием критериев Стьюдента и Фишера были предложены математические модели для двух способов ГТО зерна сорго в виде уравнений регрессии, адекватно описывающих процесс (таблица 2).

Таблица 2 – Уравнения регрессии, показывающие зависимость выхода процесса от параметров ГТО зерна сорго

Table 2 – Regression equations showing the dependence of the process output on the parameters of hydrothermal treatment of sorghum grain

возрастают с увеличением температуры агента сушки. Повышение влажности зерна сорго после сушки влечет увеличение выхода шлифованного ядра сорго и коэффициента цельности ядра, но снижает коэффициент его шелушения.

При ГТО сорго с увлажнением зерна под

вакуумом увеличение глубины вакуума в рабочей камере вакуумной установки ведет к снижению выхода шлифованного ядра сорго, а на коэффициент цельности ядра влияет только через межфакторные взаимодействия. Выход шлифованного ядра и коэффициент цельности ядра возрастают с увеличением температуры агента сушки, а также влажности зерна после сушки. Показатель же степени измельчения ядра, характеризующий его прочностные свойства при динамическом нагружении [14], с увеличением влажности зерна после сушки снижается, что вполне закономерно. Дело в том, что чем ниже ПСИ ядра, тем оно прочнее. Соответственно тем выше коэффициент цельности ядра.

DV: Выход шлифованного ядра, %

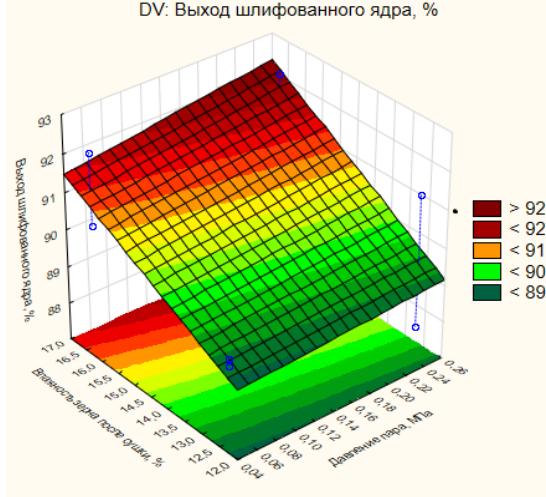


Рисунок 1 – Влияние параметров ГТО сорго (пропаривание) на выход шлифованного ядра

Figure 1 – Influence of the parameters of hydrothermal sorghum treatment (steaming) on the yield of the polished kernel

Наглядно зависимость основного показателя выхода процесса ГТО зерна сорго – выхода шлифованного ядра – от давления насыщенного водяного пара p и влажности зерна после сушки W_{sc} для способа ГТО с пропариванием зерна и от степени разрежения воздуха в рабочей камере p_v и влажности зерна после сушки W_{sc} для способа ГТО с увлажнением зерна.

Таблица 3 – Программы оптимизации ГТО зерна сорго

Table 3 – Programs for optimizing hydrothermal treatment of sorghum grain

Опыт	Фактор		
	ГТО зерна сорго с пропариванием		
давление насыщенного водяного пара p , МПа	0,15	температура агента сушки t_{sc} , °C	влажность зерна после сушки W_{sc} , %
0	0,15	110	14,5
I	0,16	116	15,3
II	0,17	122	16,3
ГТО зерна сорго с увлажнением зерна под вакуумом			
степень разрежения воздуха p_v , МПа		температура агента сушки t_{sc} , °C	влажность зерна после сушки W_{sc} , %
0	-0,050	110	15,0
I	-0,046	115	15,4
II	-0,040	120	16,0

на под вакуумом представлена на рисунках 1 и 2 соответственно. Температура агента сушки при построении обоих графиков была принята равной 110 °C.

На основе уравнений регрессии для выхода шлифованного ядра для обоих исследованных способов ГТО зерна сорго по методике Бокса-Уилсона с учетом межфакторных взаимодействий [15] рассчитали программы оптимизации (таблица 3).

В связи с тем, что влажность зерна сорго после сушки в третьем опыте для обоих способов ГТО составляет 16,3 и 16,0 %, третий шаг программы оптимизации делать нецелесообразно, поскольку в таком случае значение влажности зерна после сушки выйдет за пределы допустимого технологического уровня.

DV: Выход шлифованного ядра, %

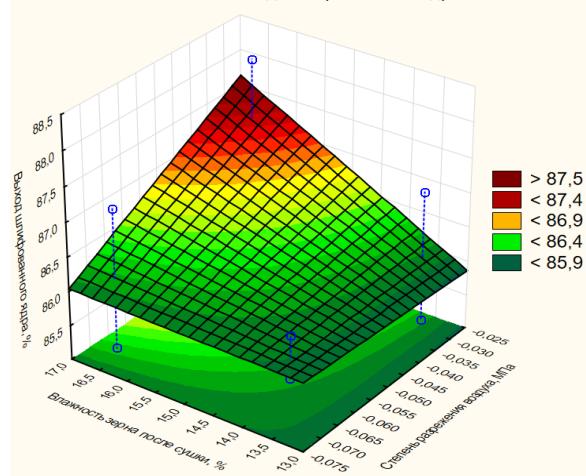


Рисунок 2 – Влияние параметров ГТО сорго (увлажнение зерна под вакуумом) на выход шлифованного ядра

Figure 2 – Influence of the parameters of hydrothermal sorghum treatment (grain moistening under vacuum) on the yield of polished kernel

Результаты реализации программ оптимизации для способа ГТО зерна сорго с пропариванием и способа ГТО зерна сорго с увлажнением под вакуумом приведены в таблице 4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ГИДРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА СОРГО

Таблица 4 – Результаты реализации программ оптимизации гидротермической обработки зерна сорго

Table 4 – Results of programs for optimizing the process of hydrothermal treatment of sorghum grain

ГТО зерна сорго с пропариванием				
Номер опыта	Условия опыта	Выход шлифованного ядра B , %	Коэффициент шелушения зерна $K_{ш}$, %	Коэффициент цельности ядра $K_{ц}$, %
1	$p=0,15$ МПа $t_{ac}=110$ °С $W_{3c}=14,5$ %	92,0	99,3	96,2
2	$p=0,16$ МПа $t_{ac}=116$ °С $W_{3c}=15,3$ %	93,3	99,5	96,8
3	$p=0,17$ МПа $t_{ac}=122$ °С $W_{3c}=16,3$ %	93,5	99,4	97,2
ГТО зерна сорго с увлажнением под вакуумом				
1	$p_e= -0,050$ МПа $t_{ac}=110$ °С $W_{3c}=15,0$ %	87,2	99,7	91,9
2	$p_e= -0,047$ МПа $t_{ac}=115$ °С $W_{3c}=15,4$ %	91,2	99,8	92,4
3	$p_e= -0,040$ МПа $t_{ac}=120$ °С $W_{3c}=16,0$ %	86,4	99,7	92,1

По итогам реализации программ оптимизации и анализа полученных данных оптимальными значениями варьируемых параметров гидротермической обработки зерна сорго с пропариванием были выбраны: давление насыщенного водяного пара – 0,16–0,17 МПа; температура агента сушки – 116–122 °С; влажность зерна сорго после сушки – 15,3–16,3 %. При этом продолжительность пропаривания составила 4 мин. В способе гидротермической обработки сорго с увлажнением зерна под вакуумом были подобраны следующие оптимальные режимы: степень разрежения воздуха в рабочей камере установки – -0,047 МПа; температура агента сушки – 115 °С; влажность зерна сорго после сушки – 15,4 %. При этом влажность зерна сорго после увлажнения составила 21,0±0,5 %; длительность отволаживания зерна – 6 часов.

ВЫВОДЫ

Сорго является перспективной культурой для выращивания и реализации в Алтайском крае. В результате малой распространенности сорго в качестве пищевой культуры в России существует необходимость разработки технологии переработки сорго в продукты питания и подбор технологических параметров процессов его переработки, частью которых являются оптимальные режимы гидротермической обработки.

Таким образом, в результате проведенных исследований, а также с учетом результатов однофакторных экспериментов были выбраны оптимальные режимы ГТО сорго с пропариванием и ГТО сорго с увлажнением зерна под вакуумом. В первом способе ГТО: давление насы-

щенного водяного пара – 0,16–0,17 МПа; длительность пропаривания – 4 мин; температура агента сушки – 115–120 °С; влажность зерна сорго после сушки – 15,5±0,5 %. Во втором способе ГТО: степень разрежения воздуха в рабочей камере установки – (-0,045)–(-0,050) МПа (остаточное давление воздуха 0,050–0,055 МПа); влажность зерна после увлажнения – 21,0±0,5 %; длительность отволаживания зерна – 6 часов; температура агента сушки – 110–120 °С; влажность зерна после сушки – 15,0–15,5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Погода и климат // www.pogodaiklimat.ru. Электрон. текст. дан. Режим доступа: http://www.pogodaiklimat.ru/history/44277_3.htm. Загл. с экрана.
- Шукис Е.Р. Потенциал возделывания сорговых культур в Алтайском крае / Е.Р. Шукис, А.Б. Володин, С.И. Капустин // Сельскохозяйственный журнал. 2018. С. 32–37.
- Горпиниченко С.И. Результаты селекции сундской травы / С.И. Горпиниченко, Г.М. Ермолина, П.И. Ляшов // Достижения, направления развития сельскохозяйственной науки России. Всероссийский научно-исследовательский институт зерновых культур им. И.Г. Калиненко ВНИИЗК-75 лет. Ростов-на-Дону, 2005. С. 248–251.
- Метлина Г.В. Агронергетическая эффективность возделывания новых сортов и гибридов сорго сахарного / Г.В. Метлина, С.И. Горпиниченко, Н.А. Ковтунова, С.А. Васильченко // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. № 114. 2015. С. 288–297.
- Раева С.А. Производство зернового сорго

- в Ростовской области / С.А. Раева // Кукуруза и сорго. № 6. 2005. С. 12–14.
6. Алабушев А.В. Оценка новых сортов сорго зернового при использовании в хлебопечении / А.В. Алабушев, В.В. Ковтунов, Н.С. Кравченко, О.А. Лушпина, Н.Г. Игнатьева // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. № 3(54). 2017. С. 144–150.
7. FAOSTAT // Food and Agriculture Organization of the United Nations. Электрон. текст. дан. Режим доступа : <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Загл. с экрана.
8. Ковтунов В.В. Основные направления использования сорго зернового / В.В. Ковтунов, С.И. Горпиниченко // Зерновое хозяйство России. 2011. № 6. С. 28–32.
9. Казаков Е.Д. Зерноведение с основами растениеводства / Е.Д. Казаков. М. : Колос, 1973. 288 с.
10. Ratnavathi C.V. Sorghum biochemistry: an industrial perspective / C.V. Ratnavathi, J.V. Patil, U.D. Chavan. Academic Press, 2016. 61 р.
11. Алабушев А.В. Технологические приёмы возделывания и использования сорго / А.В. Алабушев. Ростов-на-Дону : ЗАО «Книга», 2007. 224 с.
12. Widowati S. Karakteristik Mutu Gizi Dan Diversifikasi Pangan Berbasis Sorgum (Sorghum vulgare) / S. Widowati // PANGAN. 2010. Vol. 19 (4). P. 373–382.
13. Collar C. Significance of heat-moisture treatment conditions on the pasting and gelling behav- iour of various starch-rich cereal and pseudocereal flours / C. Collar // Food Science and Technology International. 2017. № 23 (7). P. 623–636.
14. Мартынова А.И. Оценка технологических свойств товарных партий пшеницы / А.И. Мартынова, Б.Е. Кравцова, Т.В. Васюсина, Г.Е. Гришина. Москва : Агропромиздат, 1986. 152 с.
15. Грачев Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. Москва : ДeЛи принт, 2005. 296 с.

Информация об авторах

Е. С. Серебренникова – главный специалист испытательной лаборатории Алтайского филиала ФГБУ «ЦОК АПК».

Л. В. Анисимова – к.т.н., доцент, доцент кафедры ТХПЗ ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

Information about the authors

E.S. Serebrennikova - Chief Specialist of the testing laboratory of the Altai branch of the Federal State Budgetary Institution "Federal Center for Assessment of safety and quality of products of the agro-industrial complex".

L.V. Anisimova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of THPZ 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 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.8:634.1:635.64
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.020

EDN: DVVLHI

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФРУКТОВ ПОСЛЕ ЛИОФИЛЬНОЙ СУШКИ

Татьяна Григорьевна Причко¹, Наталья Васильевна Дрофичева²

^{1, 2} Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия», Краснодар, Россия

¹ prichko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5153-482>

² Droficheva.nata@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0003-1552-159X>

Аннотация. Большая часть фруктов имеет сочную водянистую консистенцию, массовая доля жидкости в которых может достигать 70–80 %, что является одним из критериев быстрой порчи. Поэтому при переработке необходимо не только минимизировать ее содержание, но и сохранить качество и структуру готового продукта. Такого эффекта можно добиться при использовании лиофильной сушильной установки, осуществляющей процесс дегидратации. В лаборатории хранения и переработки плодов и ягод ФГБНУ СКФНЦСВБ установлены изменения показателей качества фруктового сырья после проведения лиофилизации. Исследовано влияние параметров сушики плодов яблони, абрикоса, черешни, земляники и малины (температура, время) на внешний вид, химические и органолептические показатели сухофруктов. Процесс сушики происходит при низкой температуре (-82°C) и давлении (1 Па), благодаря чему свежие фрукты сохраняют свои свойства, что дает возможность хранить их длительно. За счет высокого вакуума нестабильные вещества в составе фруктов не подвергаются окислению кислородом, что позволяет сберечь привлекательный внешний вид. По результатам проведенных лабораторных опытов установлены закономерности изменения содержания витаминов С, Р, полифенольных и других биологически активных веществ (БАВ) в фруктовом сырье. Установлено, что потери БАВ не значительны и составляют не более 10 %. Органолептическая оценка высушенных фруктов по категориям – вкус, цвет, аромат, консистенция (текстура мякоти и форма) – показала, что по всем пунктам они имеют общую оценку более четырех баллов. В связи с тем, что сухофрукты, высушенные на лиофильной сушильной установке, обладают высокой гигроскопичностью, проведены исследования по определению зависимости их качества от способа и времени хранения.

Ключевые слова: лиофильная сушика, фрукты, показатели качества, витамины, биологически активные вещества.

Для цитирования: Причко Т. Г., Дрофичева Н. В. Закономерности изменения показателей качества фруктов после лиофильной сушики // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 161–167. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.020. EDN: <https://elibrary.ru/DVVLHI>.

Original article

REGULARITIES OF CHANGES IN THE QUALITY INDICATORS OF FRUITS AFTER FREEZE DRYING

Tatyana G. Prichko¹, Natalia V. Droficheva²

^{1, 2} Federal State Budgetary Scientific Institution "North-Caucasian Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, Winemaking", Krasnodar, Russia

¹ prichko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5153-8482>

² Droficheva.nata@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0003-1552-159X>

Abstract. Most of the fruits have a juicy watery consistency, the mass fraction of liquid in which can reach 70-80 %, which is one of the criteria for rapid spoilage. Therefore, during processing, it is necessary not only to minimize its content, but also to preserve the quality and structure of the finished product. Such

an effect can be achieved by using a lyophilic drying plant that carries out the process of dehydration. changes in the quality indicators of fruit raw materials after lyophilization. The effect of drying parameters of apple, apricot, cherry, strawberry and raspberry fruits (temperature, time) on the appearance, chemical and organoleptic characteristics of dried fruits was investigated. The drying process takes place at a low temperature (-82 °C) and pressure (1 Pa), due to which fresh fruits retain their properties, which makes it possible to store them for a long time. Due to the high vacuum, unstable substances in the fruit are not oxidized by oxygen, which allows you to preserve the attractive appearance. Based on the results of laboratory experiments, the regularities of changes in the content of vitamins C, P, polyphenolic and other biologically active substances (BAS) in fruit raw materials have been established. It has been established that the losses of biologically active substances are not significant and amount to no more than 10%. Organoleptic assessment of dried fruits by categories: taste, color, aroma, consistency (pulp texture and shape) showed that they have a total score of more than four points on all points. dried on a freeze-drying plant is high, in connection with which studies have been carried out to determine the dependence of their quality on the method and time of storage.

Keywords: *freeze-drying, fruits, quality indicators, vitamins, biologically active substances.*

For citation: Prichko, T. G. & Droficheva, N. V. (2025). Regularities of changes in the quality indicators of fruits after freeze drying. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 161-167. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.020. EDN: <https://elibrary.ru/DVVLHI>.

ВВЕДЕНИЕ

Большое значение в питании имеет содержание витаминов и полифенольных веществ в потребляемых продуктах [1]. Основными источниками этих веществ являются фрукты. Они значительно улучшают качество и вкус пищи, что способствует лучшему её усвоению [2]. Из-за того, что в процессе хранения фрукты портятся и теряют свои ценные свойства, потребление свежих плодов и ягод для восполнения суточной потребности организма в необходимых элементах питания носит сезонный характер. Сохранить качество плодов и ягод возможно с помощью различных методов переработки [3]. Дефицит биологически активных веществ носит круглогодичный, массовый характер, касается всех групп населения, отрицательно сказывается на здоровье населения [2]. В этой связи растет интерес к натуральным растительным продуктам как основному источнику функциональных ингредиентов. Принципиальным отличием этих продуктов является использование сырья с высоким содержанием природных антиоксидантов – витамина C, полифенольных веществ – рациональное сочетание которых гарантирует полноценное обеспечение питательными и биологически ценными веществами всех жизненно важных систем организма, включая иммунную [2, 3]. Поэтому актуальным является изучение химического состава плодов и ягод с целью выделения лучших из них по витаминному составу, содержанию полифенолов, минеральных, пектиновых веществ, полисахаридов [4].

В настоящее время большая часть мировых исследований направлена на увеличение сроков хранения фруктового сырья при максимальном сохранении показателей качества, витаминов, полифенолов, минеральных веществ [3]. Исследования в этой области на протяжении нескольких лет проводятся такими учеными, как

Бойцовой Ю.С., Аленина И.П., Патаниной К.В. Ими установлено два наиболее часто используемых метода: обезвоживание и сублимационная сушка [4]. «Обезвоживание» позволяет высушивать или коптить пищу, циркулируя по ней горячим и сухим воздухом, температура сушки должна быть достаточно высокой, чтобы удалить лишнюю влагу. «Лиофильная сушка» осуществляется за счет использования низких температур, благодаря чему жидкость в продукте превращается из твердого состояния в газ, мимуя жидкое состояние, тем самым поддерживая структуру пищи и сохраняя ее важнейшие питательные вещества. Из этих двух процессов обезвоживание удаляет около 90–95 % влаги, в то время как лиофильная сушка удаляет около 98–99 %. Чем ниже влажность, тем дольше срок хранения [4–8].

Обзор литературных источников за последние пять лет свидетельствуют о том, что максимально увеличить срок хранения при минимальных потерях биологически активных веществ возможно при использовании лиофильной сушильной установки, которую в пищевой промышленности применяют для производства снеков из фруктов, а также порошка из соков или измельченного овощного сырья [9–10].

Многочисленные исследования свидетельствуют о высокой антиоксидантной активности БАВ такого фруктового сырья, как яблоки, абрикосы, черешня, земляника и малина, что позволяет использовать их для разработки функциональных продуктов питания и БАД [1]. Технологический процесс лиофилизации основан на замораживании фруктового сырья с последующим уменьшением внешнего давления, за счет чего удаляется большая часть содержащейся в них влаги, а концентрация клеточного сока увеличивается в несколько раз [10]. После лиофильной сушки изменяется химический состав готовых продуктов, который варьирует с

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФРУКТОВ ПОСЛЕ ЛИОФИЛЬНОЙ СУШКИ

учетом этапов технологического процесса и характеризуется высокой скоростью, дефицитом кислорода и низкой температурой сушки, благодаря чему обеспечивается структурная целостность и сохранность большинства исходных свойств сырья: формы, аромата, цвета, вкуса, текстуры, биологической ценности, антиоксидантной активности и витаминов [10–12].

Высушенные в лиофильной сушильной установке фрукты имеют ряд преимуществ: 98 % содержания воды удаляется, пища становится легкой, что значительно снижает стоимость доставки, удаление влаги происходит при низкой температуре, благодаря чему ферментативное расщепление и опасность окисления нестабильных веществ кислородом сводится к минимуму, а фрукты и овощи сохраняют свои изначальные свойства; в высушиваемом продукте остается 1 % влаги, что позволяет увеличить сроки хранения готовых продуктов [11, 12].

В лаборатории ФГБНУ СКФНЦСВВ за последние три года накоплен материал по оптимизации режимов лиофильной сушильной установки и их влияния на показатели качества готового продукта влажностью 1–2 % с учетом вида используемого фруктового сырья.

Цель исследования – установить закономерности изменения показателей качества фруктов после лиофильной сушки.

С учетом сформированной цели основными задачами исследования являются:

- определение содержания биологически активных веществ в свежем сырье;
- проведение органолептической оценки фруктов после лиофильной сушки;
- определение содержания витаминов, полифенольных веществ и антиоксидантной активности с учетом температуры и времени сушки в готовом продукте.

МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования использовали плоды и ягоды широко распространенных на Кубани сортов: яблоки (Голден Делишес), абрикос (Ананасный), черешня (Мелитопольская), земляника (Клер), малина (Полана).

На первом этапе проводилась оценка показателей качества свежего фруктового сырья. Биохимические исследования выполнены на оборудовании ЦКП (Центр коллективного пользования) по общепринятым и стандартным методикам [11].

При исследовании показателей качества фруктов определяли: общие сахара – фотометрическим методом на фотоэлектроколориметре КФК-3-01 по ГОСТ 8756.13-87; витамин С – титрометрически по ГОСТ 24556-89; полифенолы и витамин Р и общие полифенольные вещества – колориметрическим методом в модификации Л.И. Вигорова; АОА – по методу А.Я. Яшина; органолептическая оценка – по ГОСТ 8756.1-2017 [11–14].

Лиофильная сушка плодов и ягод осуществлялась с использованием морозильной

камеры L.Cexy 4010-23D-001 производства фирмы «Liebherr» (Австрия) и лабораторной установки лиофильной сушки UV-DF, ERSTEVAK ltd (Китай) 2021 г.в.

На следующих этапах исследования было изучено влияние температуры заморозки (от -20°C до -82°C) и длительности сушки фруктового сырья (от 36 до 84 часов) на показатели качества сухофруктов с использованием таких же лабораторных методов, как и при оценке свежих плодов и ягод [11–14].

Оценка органолептических показателей проводилась с применением балльной шкалы по показателям: вкус, цвет, форма, аромат, текстура (консистенция мякоти) [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследований определены химические показатели качества плодов яблони (Голден Делишес), абрикоса (Ананасный), черешни (Мелитопольская), земляники (Клер) и малины (Полана).

Отобранные плоды и ягоды по результатам исследований характеризовались высоким содержанием витамина С – до 51 мг/100 г, витамина Р – до 124,2 мг/100 г и варьированием полифенольных веществ – от 32,4 до 210,4 мг/100 г.

На втором этапе исследований проведено три опыта: 1 – заморозка фруктов при температуре минус 20°C (согласно литературным источникам); 2 – при температуре минус 50°C (произвольная); 3 – при температуре минус 82°C (рекомендовано производителем лиофильной сушильной установки). В каждом опыте фрукты замораживались в течение 30 минут. После этого они были помещены в лиофильную сушильную установку.

В процессе первичной сушки давление понижают до нескольких (2–3) миллибар, и к высушиваемому материалу доставляется ровно такое количество тепла, которого хватит для возгонки льда. В этой фазе сушки сублимируется около 75 % воды. Этот этап длится не более 2 часов [16].

Давление в камере контролируется посредством частичного вакуума. Вакуум ускоряет процесс сушки. Кроме того, холодная камера конденсора обеспечивает повторное затвердевание водяного пара, чтобы прекратить любые физико-химические взаимодействия, которые образовались между молекулами воды и замороженным материалом. На следующем этапе сушки давление понижают до 1 Па. Время его проведения варьируют от вида фруктового сырья, толщины кожицы, размера и структуры мякоти. По окончании операции конечное содержание остаточной воды в продукте чрезвычайно низкое: от 1 до 2 % [17–21].

Установлено время работы лиофильной сушки с учетом вида используемого сырья с влажностью не более 1 %.

Фрукты, подвергнутые предварительной заморозке при минус 20°C , оставались недосушеными после 84 часов, опыт был отмечен как неудовлетворительный.

Результат второго опыта с предварительной заморозкой при минус 50 °С, показал полностью просушенные пористые дольки яблок, половинки абрикоса, ягоды малины и земляники, но сырье (с кристаллами льда) плоды черешни.

Третий опыт был самым успешным, все фрукты, подвергнутые заморозке при -82 °С, были досушенены в интервале от 36 до 68 часов с

влажностью не более 1 %. Для яблок дольками потребовалось 36 часов, половинок абрикоса без косточки – 48 часов, ягод малины – 50 часов, земляники – 58 часов, плодов черешни – 68.

Все исследованные плоды, яблони, абрикоса, черешни, а также ягоды земляники и малины, имели привлекательный внешний вид и органолептическую оценку (рисунок 1, 2).



Рисунок 1 – Внешний вид плодов и ягод после применения лиофильной сушки

Figure 1 – Appearance of fruits and berries after the use of freeze drying

Высушенные плоды имели привлекательный внешний вид, воздушно-пористую структуру с хрустящим изломом.

Изменения показателей качества в процессе лиофилизации привели к сокращению массы фруктов более чем на 50 % (таблица 1).

Установлено, что общая потеря массы плодов у яблок – 57 %, у абрикоса – 55 %, у черешни – 56 %, ягод малины – 51 % и земляники – 59 %.

Таблица 1 – Изменение массы фруктов после сушки
Table 1 – Changes in fruit and vegetables weight after lyophilization

Наименование сырья	Масса фруктов до сушки, г	Масса высушенных фруктов, г
Яблоки	325,2	180,4
Абрикос	420,6	229,2
Черешня	315,2	173,5
Малина	302,8	186,6
Земляника	505,2	343,7

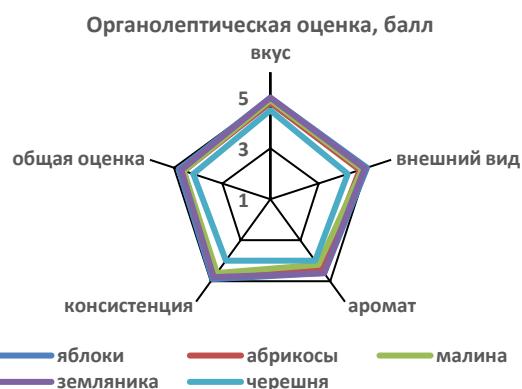


Рисунок 2 – Профилограмма органолептической оценки, балл

Figure 2 – Organoleptic valuation profile, point

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФРУКТОВ ПОСЛЕ ЛИОФИЛЬНОЙ СУШКИ

Согласно литературным данным, на стадии удаления влаги при температурах процесса ниже температуры кипения воды происходит концентрирование БАВ в 8–12 раз. Также происхо-

дит увеличение биодоступности БАВ для организма, они усваиваются на 95–100 % [22, 23].

Установлены изменения химических показателей качества фруктового сырья после проведения лиофильной сушки (таблицы 2, 3).

Таблица 2 – Содержание витамина С и Р в плодах и ягодах до и после лиофильной сушки

Table 2 – Vitamin C and P content in fruits and berries before and after freeze drying

Наименование сырья	Витамин С, мг/100г		Витамин Р, мг/100г	
	свежие	высушенные	свежие	высушенные
Яблоки	10,6	139,4	86,4	1125,6
Черешня	8,8	148,2	95,4	1674,2
Абрикосы	12,4	161,6	64,0	842,9
Малина	32,2	451,8	124,2	1723,8
Земляника	51,0	546,4	26,0	269,0

Таблица 3 – Содержание полифенольных веществ и антиоксидантная активность фруктов до и после лиофильной сушки

Table 3 – Polyphenolic content and antioxidant activity of fruits before and after freeze drying

Наименование сырья	Общие полифенолы, мг/100г		Антиоксидантная активность (АОА), %	
	свежие	высушенные	свежие	высушенные
Яблоки	32,4	434,2	102,4	1413,2
Черешня	198,9	3515,4	192,6	3402,4
Абрикосы	40,8	522,2	118,0	1584,2
Малина	178,4	2626,2	331,8	4738,6
Земляника	165,0	1797,8	125,5	1315,0

Использование лиофильной сушильной установки позволяет получить сухофрукты с высокой антиоксидантной активностью и максимально (до 90 %) сохранить витамины и полифенолы.

Установлено, что потери витаминов С, Р и

других биологически активных веществ (БАВ) после проведения лиофильной сушки в пересчете на сухое вещество составили не более 10 %. Так, потери витамина С варьируют от 3,8 до 7,3 %, а витамина Р – от 3,6 до 7,5 % (рисунок 3).

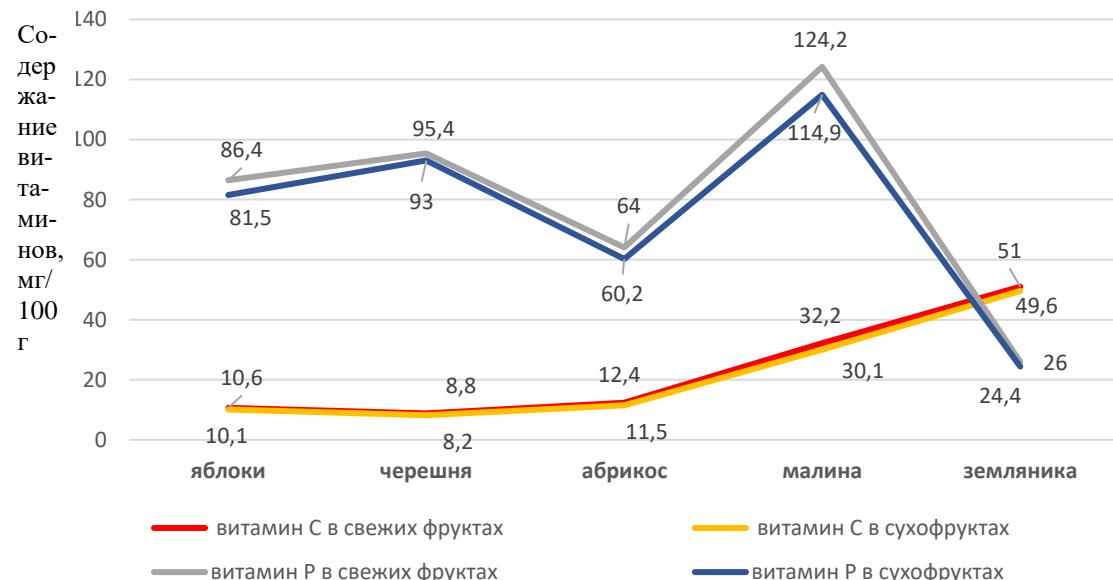


Рисунок 3 – Содержание витамина С и Р в сухофруктах в пересчете на СВ (сухие вещества, %) в сравнении с показателями свежего сырья

Figure 3 – Vitamin C and P content in dried fruits in terms of DM (dry matter, %) compared to fresh raw materials

После проведения лиофильной сушки фруктов проведены лабораторные опыты по определению закономерности изменения их

веса и влажности от срока хранения:

- 1 – высушенные плоды оставлены при комнатной температуре на открытом пространстве;

- 2 – высушенные плоды укупорены в тару (банку);

3 – высушенные плоды укупорены в вакуумную упаковку.

Установлено, что полученные сухофрукты обладают высокой гигроскопичностью и оставленные без упаковки при комнатной температуре напитывались влагой в течение первых 30 минут, по истечении которых влажность продукта составляла 20 %, а вес сухофруктов увеличился на 8 %, через 60 мин – на 10 %, через 24 часа – на 17 %, а через 48 часов – на 25 %. Дальнейшие исследования не представляли интереса ввиду потери товарных качеств плодов: частичное потемнение, изменение консистенции готового продукта.

Сухофрукты, укупоренные в банку, через сутки весили на 2 % больше, а через 7 суток – на 2,5 %, через 14 дней – на 2,8 %, через месяц – на 4,2 %.

Высушенные плоды укупорены в вакуумную упаковку, через сутки хранения свой вес не изменили так же, как и через 14 дней, а через три месяца весили на 1 % больше, через полгода – на 1,5 %, через год – на 2 %, через полтора года – на 3,5 %.

По результатам проведенных опытов установлена влажность сухофруктов на разных этапах хранения, которые позволяют сделать вывод о перспективе использования вакуумной упаковки для длительного поддержания показателей качества высушенных фруктов.

ВЫВОДЫ

На сегодняшний день технологический способ лиофильной сушки является наиболее востребованным, т.к. он позволяет сохранить пищевую и биологическую ценность высушенных продуктов. В ходе исследований отмечены закономерности изменения показателей качества сухофруктов в зависимости от вида растительного сырья. Высушенные плоды яблони, абрикоса, а также ягоды земляники и малины имели высокие баллы органолептической оценки. В ходе проведенных исследований отмечены изменения некоторых показателей после лиофилизации: уменьшение массы фруктов – на 50–60 %, потери витамина С и Р – от 3,6 до 7,5 % в пересчете на сухое вещество с учетом вида высушенного сырья. Все полученные сухофрукты отличались высокой антиоксидантной активностью, что позволяет рекомендовать их к использованию в профилактическом питании и выгодно отличает от сухофруктов, полученных по технологии с использованием высоких температур сушки [24]. Для определения сроков хранения сухофруктов установлены закономерности изменения веса и влажности от времени хранения и способа упаковки. Высушенные плоды, укупоренные в вакуумную упаковку, показали меньший вес и гигроскопичность в сравнении с сухофруктами в банке или хранением на открытом пространстве.

Согласно ГОСТ Р 55577-2013 «Продукты пищевые функциональные. Информация об отличительных признаках и эффективности», «пищевой продукт является источником витаминов или минералов, если витамины составляют не менее 15 % от суточной потребности на 100 г». С учетом полученных результатов исследований, согласно техническому регламенту таможенного союза ТР ТС 022/2011, употребление около 100 г сухофруктов, полученных с использованием лиофильной сушильной установки, позволяет удовлетворить суточную потребность организма в витаминах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдина С.Б. Технология продуктов функционального питания : учеб. пособие для ВУЗов / С.Б. Юдина. СПб. : ИД «Лань», 2017. 280 с.
2. Мачнева И.А., Дрофичева Н.В. Оценка сортов плодово-ягодных культур для создания рецептурных композиций продуктов питания с радиопротекторными свойствами // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2012. № 18 (6). С. 129–137.
3. Захарова И.И., Крылова Р.Ф., Климина Е.В. Возможность применения лиофилизированных продуктов в индустрии питания // Столыпинский Вестник. 2021. № 3. С. 14–20.
4. Бойцова Ю.С., Аленин И.П., Патанина К.В. Рынок сублимированной продукции // Экономика и бизнес теория и практика. 2020. № 12–1 (70). С. 98–102. <https://doi.org/10.24411/2411-0450-2020-11025>.
5. Омаров М.М. Применение криоконцентрации и лиофильной сушки в производстве диетических соков из плодовоощного и дикорастущего сырья // Пиво и напитки. 2016. № 2. С. 22–24.
6. Кригер О.В., Носкова С.Ю. Разработка приемов длительного сохранения свойств молочнокислых микробов // Техника и технология пищевых производств. 2018. Т. 49. № 4. С. 30–38. <http://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-30-38>.
7. Novoselova M.V. and Prosekov A.Yu. (2016). Technological options for the production of lactoferrin // Foods and Raw Materials. Vol. 4, (1), 90–101. DOI: <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-1-90-101>.
8. Sukhikh S.A., Krumlikov V.Y., Evsukova A.O. and Asyakina L.K. (2017). Formation and study of symbiotic consortium of lactobacilli to receive a direct application starter // Foods and Raw Materials, Vol. 5, (1), 51–62. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-51-62>.
9. Prosekov A.Yu. and Ivanova S.A. (2018). Food security: The challenge of the present. Geoforum, Vol. 91, 73–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>.
10. Добропольский В.Ф., Павлова Л.П., Лындина М.И. Разработка инновационных технологий пищевых продуктов для питания космонавтов // Индустрия питания. 2019. Т. 4. № 3. С. 34–41. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2019-4-3-4>.
11. Методы биохимического исследования растений : учеб. / А.И. Ермаков [и др.]. Л. : «Агропромиздат», 1987. 430 с.
12. ГОСТ 24556-89. Библиографическая ссылка. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С. введ. 1990-01-01. Москва, 2003. 11 с.
13. Вигоров Л.И. Метод определения Р-активных веществ: Труды III семинара по БАВ. Свердловск, 1972. 362 с.
14. ГОСТ 8756.1-2017 Продукты пищевые консервированные. Методы определения органолептических показателей, массы нетто или объема и массовой

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФРУКТОВ ПОСЛЕ ЛИОФИЛЬНОЙ СУШКИ

- доли составных частей. введ. 2019-01-01. Москва, 2010. 10 с.
15. Гигиенические требования к организации производства и оборота биологически активных добавок к пище (БАД). СанПиН 2.3.2.1290-03. [Электронный ресурс]. URL : <http://files.stroyinf.ru/Data1/39/39762>.
 16. Технический регламент таможенного союза ТР ТС 021/2011. «О безопасности пищевой продукции»: принят решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 880. Москва : Изд-во стандартов, 2011. 29 с.
 17. Shuan Feng, Jinfeng Bi, Timo Laaksonen, Patrick Laurén, Jianyong Yi. (2024). Texture of freeze-dried intact and restructured fruits: Formation mechanisms and control technologies // Trends in Food Science & Technology. Vol. 143. 104267. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104267>.
 18. Suwapat Kittibunchakul, Piya Temviriyanyukul, Pittaya Chaikhamp, Varongsiri Kemswas. (2023). Effects of freeze drying and convective hot-air drying on predominant bioactive compounds, antioxidant potential and safe consumption of maoberry fruits // LWT. Vol. 184. 114992. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114992>.
 19. Семенов Г.В., Краснова И.С., Хвыля С.И., Балаболин Д.Н. Влияние акустического замораживания на показатели структуры сублимированной клубники // Теоретические аспекты хранения и переработки сельхозпродукции. ХИПС. 2019. № 3. С. 29–38. <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.175>.
 20. Блынская Е.В., Тишков С.В., Алексеев К.В. Технологические подходы к совершенству процесса лиофилизации белковых и пептидных лекарственных препаратов // Российский биотерапевтический журнал. 2017. Т. 16. № 1. С. 6–11. <https://doi.org/10.17650/1726-9784-2017-16-1-6-11>.
 21. Searles J.A. (2010). Freezing and Annealing Phenomena in Lyophilization. In: Freezedrying // lyophilization of pharmaceutical and biological products. Eds. L. Rey, J.C. May. New York: Inform. <https://doi.org/10.3109/9781439825761-6>.
 22. David E. Overcashier, Thomas W. (1999). Pata-poff, Chung C. Hsu Lyophilization of protein formulations in vials: Investigation of the relationship between resistance to vapor flow during primary drying and small-scale product collapse // Journal of Pharmaceutical Sciences. Vol. 88, I. 688–695. <https://doi.org/10.1021/j1980445>.
 23. Причко Т.Г. [и др.]. Новые виды консервной продукции функционального назначения из плодово-ягодного сырья // Высокоточные технологии производства, хранения и переработки плодов и ягод : материалы Международной научно-практической конференции. Краснодар : ФГБНУ СКФНЦСВВ, 2010. С. 373–378.
 24. Roberto A. Depaz, Swapnil Pansare, Sajal Manubhai Freeze-Drying. (2016). Above the Glass Transition Temperature in Amorphous Protein Formulations While Maintaining Product Quality and Improving Process Efficiency // Journal of Pharmaceutical Sciences. Vol. 105, I. 1, 40–49. <https://doi.org/10.1002/jps.24705>.

Информация об авторах

Т. Г. Причко – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующая лабораторией хранения и переработки плодов и ягод ФГБНУ СКФНЦСВВ.

Н. В. Дрофичева – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории хранения и переработки плодов и ягод ФГБНУ СКФНЦСВВ.

Information about the authors

T.G. Prichko - doctor of agricultural sciences, professor, head of the laboratory for storage and processing of fruits and berries of the federal state budgetary scientific Institution of the north caucasuss scientific center for agricultural research.

N.V. Droficheva - candidate of technical sciences, senior researcher of the laboratory of storage and processing of fruits and berries of the federal state budgetary scientific institution of the north caucasuss scientific center for storage and processing of fruits and berries.

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

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)

УДК547.458.88:678.048

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.021

EDN: EBELOP

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДОВ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ КОМБИНАЦИЙ НА АНТИОКСИДАНТНУЮ АКТИВНОСТЬ И КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПИЩЕВЫХ СИСТЕМАХ

Зурет Нурбиевна Хатко ¹, Татьяна Анатольевна Белявцева ²,
Джулетта Магомедовна Бегеретова ³, Екатерина Михайловна Колодина ⁴,
Саида Каплановна Кудайнетова ⁵, Надежда Николаевна Бугаева ⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Майкопский государственный технологический университет, г. Майкоп, Россия

¹ znkhatko@mail.ru, 0000-0001-7097-1345

² belyavceva.tanya@yandex.ru, 0009-0008-8224-9999

³ dzhuliya_bg@mail.ru

⁴ goodwill_katya@mail.ru

⁵ saidakudainetova@yandex.ru, 0009-0006-1283-0740

⁶ nadiabugaeva456@gmail.com, 0009-0005-5263-8246

Аннотация. Пектиновые вещества обладают широким спектром полезного действия на организм человека и обуславливают заданные технологические и функциональные свойства пищевым системам. Цель работы состоит в исследовании влияния видов (и типов) пектиновых веществ, и их комбинаций на антиоксидантную активность, комплексообразующую способность, для применения в пищевых системах. Установлено, что антиоксидантная активность исследуемых видов (и типов) пектиновых веществ и их комбинаций различна и варьирует: от 0,78 до 3,89 мг/см³ (пектины); от 0,77 до 6,09 мг/см³ (комбинации пектинов). Комбинации пектиновых веществ отличаются преимущественным антиоксидантным эффектом, превышающим базовый уровень в 2–3 раза при использовании пектинов различных производителей (без комбинирования). Эффекты антиоксидантной активности могут варьировать в зависимости от степени этерификации (согласно данным спецификаций производителей пектинов). Показана взаимосвязь между антиоксидантной активностью пектинов и их технологическими свойствами. Так, высокими показателями антиоксидантной активности (5,14–6,09 мг/см³) обладают комбинации с «Унипектин ОВ 763» (образец № 3), который технологически отличается от других пектинов обработкой аммиаком, что приводит к изменению структуры полисахарида и, как следствие, к повышению его антиоксидантных свойств. Отмечается синергический эффект в проявлении антиоксидантной активности некоторых комбинаций пектинов. Установлено, что комплексообразующая способность комбинаций пектиновых веществ зависит от вида пектинов, их соотношений, степени этерификации (согласно данным спецификаций производителей пектинов). Значения показателя варьируют от 207 до 39 мг Pb²⁺ /г пектина. Отмечается синергический эффект в проявлении комплексообразующей способности комбинаций яблочного и цитрусового со свекловичным пектином за счет последнего. В комбинации яблочного и цитрусового пектинов значения комплексообразующей способности значительно ниже. Полученные результаты представляют интерес для дальнейшего исследования пектинов и их комбинаций с целью применения в пищевых системах, обеспечивающих высокий уровень антиоксидантной и детоксикационной защиты организма человека.

Ключевые слова: пектиновые вещества, комбинации пектинов, степень этерификации, антиоксидантная активность, комплексообразующая способность.

Благодарности: Исследование выполнялось за счет средств гранта ректора ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет» (тема «Аутентичные пищевые продукты и кулинарные изделия Республики Адыгея как основа для здорового питания: традиции, технологии и их актуализация») и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1023122100005-9-2.9.1 Высокоэффективные технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, обеспечивающие экспортный потенциал: новые конкурентоспособные пищевые продукты, новые медицинские и косметические средства, инновационные технологии, пролонгирование сроков хранения продуктов).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДОВ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ КОМБИНАЦИЙ
НА АНТИОКСИДАНТНУЮ АКТИВНОСТЬ И КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПИЩЕВЫХ СИСТЕМАХ

Для цитирования: Исследование влияния видов пектиновых веществ и их комбинаций на антиоксидантную активность и комплексообразующую способность для применения в пищевых системах / З. Н. Хатко [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 168–177. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.021. EDN: <https://elibrary.ru/EBELOP>.

Original article

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TYPES OF PECTIN SUBSTANCES AND THEIR COMBINATIONS ON ANTIOXIDANT ACTIVITY AND COMPLEXING ABILITY FOR USE IN FOOD SYSTEMS

Zuret N. Khatko ¹, Tatyana A. Belyavtseva ², Juleta M. Begeretova ³,
Ekaterina M. Kolodina ⁴, Saida K. Kudainetova ⁵, Nadezhda N. Bugaeva ⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Maikop State Technological University, Maikop, Russia

¹ znkhatko@mail.ru, 0000-0001-7097-1345

² belyavceva.tanya@yandex.ru, 0009-0008-8224-9999

³ dzhuliya_bg@mail.ru

⁴ goodwill_katya@mail.ru

⁵ saidakudainetova@yandex.ru, 0009-0006-1283-0740

⁶ nadiabugaeva456@gmail.com, 0009-0005-5263-8246

Abstract. Pectin substances have a wide range of beneficial effects on the human body and determine the desired technological and functional properties of food systems. The aim of the work is to study the effect of types (and types) of pectin substances and their combinations on antioxidant activity, complexing ability, for use in food systems. It was found that the antioxidant activity of the studied types (and types) of pectin substances and their combinations is different and varies: from 0.78 to 3.89 mg/cm³ (pectins); from 0.77 to 6.09 mg/cm³ (combinations of pectins). Combinations of pectin substances have a predominant antioxidant effect, exceeding the baseline level by 2-3 times when using pectins from different manufacturers (without combining). The effects of antioxidant activity may vary depending on the degree of esterification (according to the specifications of the pectin manufacturers). The relationship between the antioxidant activity of pectins and their technological properties is shown. Thus, combinations with "Unipectin OV 763" (sample No. 3) have high rates of antioxidant activity (5.14-6.09 mg/cm³), which technologically differs from other pectins by ammonia treatment, which leads to a change in the structure of the polysaccharide and, as a result, to an increase in its antioxidant properties. There is a synergistic effect in the manifestation of antioxidant activity of some combinations of pectins. It has been established that the complexing ability of combinations of pectin substances depends on the type of pectins, their ratios, and the degree of esterification (according to the specifications of pectin manufacturers). The values of the indicator range from 207 to 39 mg Pb²⁺ /g of pectin. There is a synergistic effect in the manifestation of the complexing ability of combinations of apple and citrus fruits with beet pectin due to the latter. In the combination of apple and citrus pectins, the values of the complexing ability are significantly lower. The results obtained are of interest for further research of pectins and their combinations for use in food systems that provide a high level of antioxidant and detoxification protection of the human body.

Keywords: pectin substances, combinations of pectins, degree of esterification, antioxidant activity, complexing ability.

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of a grant from the rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Maikop State Technological University" (topic "Authentic food products and culinary products of the Republic of Adygea as a basis for healthy nutrition: traditions, technologies and their actualization") and the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 1023122100005-9-2.9.1 High-performance technologies storage and processing of agricultural products providing export potential: new competitive food products, new medical and cosmetic products, innovative technologies, prolongation of shelf life of products).

For citation: Khatko, Z. N., Belyavtseva, T. A., Begeretova, Ju. M., Kolodina, E. M., Kudainetova, S. K. & Bugaeva, N. N. (2025). Investigation of the effect of types of pectin substances and their combinations on antioxidant activity and complexing ability for use in food systems. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 168-177. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.021. EDN: <https://elibrary.ru/EBELOP>.

ВВЕДЕНИЕ

Создавшаяся ситуация по заболеваемости, смертности, обеспеченности нутриентами в России подтверждает необходимость принятых действенных решений на государственном уровне. Так, принят ряд программных документов:

- Федеральная программа России, направленная на увеличение продолжительности и качества жизни населения, а также повышение качества пищевых продуктов и расширение их ассортимента, что отражено в различных документах;

- Доктрина продовольственной безопасности РФ, отражающая определяющую роль сельского и рыбного хозяйства и пищевой промышленности в обеспечении безопасности;

- Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ на период до 2030 года, призванная обеспечить долгосрочное и перспективное развитие отраслей, импортозамещение критически важных видов продукции, усиление продовольственной безопасности, развития новых направлений экспорта и др. [3];

- Федеральный проект «Здоровое питание», направленный на улучшение качества жизни и здоровья граждан за счет обеспечения безопасными и качественными продуктами, а также внедрения норм здорового питания и здорового образа жизни в каждую семью.

Одним из инновационных направлений здорового питания [1] является разработка продуктов питания общеукрепляющего, профилактического, адаптогенного и специального назначения, ассортимент которых нуждается в постоянном расширении и обновлении, особенно отечественного производства.

В настоящее время к явным достижениям науки о питании следует отнести роль биологически активных добавок для создания продуктов питания, корректирующих состояние здоровья человека. К числу ингредиентов, представляющих научно-практический интерес в решении данной проблемы, относятся пектины – сложные полисахариды, состоящие в основном из трёх основных структурных доменов: гомогалактуронана (HG), рамногалактуронана-I (RG-I) и рамногалактуронана-II (RG-II).

Недостаточно научной информации о влиянии видов пектиновых веществ и их комбинаций на различные свойства, проявляемые в пищевых системах и организме человека, что снижает эффективность работы при конструировании новых пектиносодержащих пищевых продуктов.

В последнее время большое внимание уделяется проблеме сниженного иммунитета, основной причиной возникновения которого значится оксидативный стресс, вызывающий изменения в клеточной структуре человеческого организма.

Поступление антиоксидантов из пищи, лекарств с антиоксидантным эффектом, а также биологически активных добавок может миними-

зировать оксидативный стресс и значительно снизить его проявления, которые возникают вследствие негативного воздействия свободных радикалов [4, 5].

Исследованию функциональных свойств (антиоксидантной активности, комплексообразующей способности и др.) пектиновых веществ в зависимости от разных факторов (извлечения из сырья, модификации и др.) посвящены работы многих зарубежных ученых, что подтверждает актуальность данного направления.

Shikai Zhang, Geoffrey I.N. и др. установили, что фракции пектинов обладают заданными реологическими, термическими, эмульгирующими, стабилизирующими эмульсию, водопоглощающими, маслосвязывающими, холестеринсвязывающими и антиоксидантными свойствами [14].

Chunhong Xiang, Hui Teng, Zhili Sheng, Chao Zhao и др. [10] с помощью ферментативного расщепления из сахарной свеклы выделен SBP-3A – новый ферулоилсодержащий полисахаридный фрагмент, получено подтверждение потенциального его применения в качестве функционального продукта питания для лечения заболеваний, связанных с окислительным стрессом.

Rui-xue Deng, Yi-ying Zheng, Dong-jie Liu и др. [13] показано, что мощность ультразвука оказывает значительное влияние на антиоксидантную активность пектина из мороженых плодов инжира: ультразвуковая энергия разной мощности и структурные изменения по-разному влияют на пространственную структуру и свойства, а также биологическую активность пектина из мороженых плодов инжира.

Установлено, что пектины, извлечённые из кожуры фейхоа с помощью воды и щелочи (в отличие от кислоты), обладают более высокой антиоксидантной и гипогликемической активностью, причем состав моносахаридов, соотношение сахаров и степень ацетилирования – основные, по мнению авторов, факторы, влияющие на функциональные свойства, антиоксидантную и гипогликемическую активность.

Hui Li, Jiajia Rao, Bingcan Chen и др. [11] показано, что модифицированный тирозином пектин обладает повышенной растворимостью, амфи菲尔ностью и антиоксидантной активностью.

Na Liu, Wanna Yang, Xia Li и др. [12] исследовано 10 видов пектинов из кожуры цитрусовых и установлено, что два из них обладают превосходной антиоксидантной биологической активностью, два – отличными функциональными свойствами (термостабильностью и вязкостью), один имеет большой потенциал для применения в продуктах питания, подвергающихся воздействию высоких температур, один может использоваться в качестве загустителя или стабилизатора в пищевой промышленности

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДОВ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ КОМБИНАЦИЙ НА АНТИОКСИДАНТНУЮ АКТИВНОСТЬ И КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПИЩЕВЫХ СИСТЕМАХ

и т.д.

К наиболее распространенному в нашей стране пектинсодержащему сырью относятся яблочные выжимки, плоды цитрусовых, свекловичный жом и корзинки подсолнечника, на переработке которых основана пищевая промышленность [1, 5]. В настоящее время отечественного производства пектинов нет, поэтому в пищевой промышленности используются импортная продукция [2].

В связи с вышеизложенным, исследование антиоксидантной активности и комплексообразующей способности пектиновых веществ, оптимизация подбора их видов или комбинаций

для разработки пищевых систем с использованием растительного сырья и продуктов его переработки, богатых биологически активными веществами, повышающими физиологические показатели организма, в том числе иммунитет, является актуальной и перспективной задачей.

Цель работы состоит в исследовании влияния видов (и типов) пектиновых веществ и их комбинаций на антиоксидантную активность и комплексообразующую способность для применения в пищевых системах.

Объекты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика пектиновых веществ / Table 1 – Characteristics of pectin substances

Наименование	Торговая марка, производитель	Степень этерификации, %	Спецификация
Определение антиоксидантной активности			
1. Яблочный пектин 1 (Я ₁)	«Айдиго», Китай	45-49	[17]
2. Яблочный пектин 2 (Я ₂)	«VALDE», Германия	более 50	[22]
3. Яблочный пектин «Унипектин ОВ 763» (Я ₃) (низкометоксилированный амидированный), поставщик – ООО «Евро-Ойл», г. Уфа	«Cargill», Франция	32-38	[16]
4. NH пектин цитрусовый термообратимый (Ц ₁)	«VALDE», Германия	27-32	[20]
5. Цитрусовый пектин (Ц ₂)	«VALDE», Германия	более 50	[21]
6. Цитрусовый пектин «АРС 105» (Ц ₃)	AndrePectin, Китай	менее 62	[19]
7. Яблочный пектин «АРА 104» (Я ₄)	AndrePectin, Китай	62-66	[18]
Комбинации пектинов:			
1:7, 1:6, 1:5, 1:4, 1:3, 1:2, 2:3, 2:4, 2:5, 2:6, 2:7, 3:4, 3:5, 3:6, 3:7, 4:5, 4:6, 4:7, 5:6, 5:7, 6:7			
Определение комплексообразующей способности			
1. Яблочный пектин 1 (Я ₁)	«Айдиго», Китай	45-49	[17]
2. Цитрусовый пектин (Ц ₂)	«VALDE», Германия	более 50	[21]
3. Свекловичный пектин (С _{лаб.})	Лабораторный	37,1	–
Соотношение компонентов в комбинации, %: 20:80, 40:60, 50:50, 60:40, 80:20			

Свекловичный пектин лабораторный (С_{лаб.}) получен в условиях кафедры технологии пищевых производств и организации питания ФГБОУ ВО «МГТУ» из свекловичного жома по типовой схеме: гидромодуль – 1:5; температура – 74...75 °; продолжительность – 2 ч.; концентрация HCl в гидролизующем агенте – 1,3 %.

Образцы пектинов зарубежного производства (Германия, Китай, Франция) представлены в виде сыпучих порошков, цвет которых соответствует виду сырья – от светло-желтого до светло-коричневого, запах незначительный без посторонних нот, вкус почти нейтральный без постороннего привкуса.

Исследование антиоксидантной активности пектиновых веществ и их комбинаций осуществлялось амперометрическим методом с помощью анализатора антиоксидантной активности «ЦветЯзу-01-АА» по ТУ МКБ. 414538.001 в соответствии с инструкцией к прибору.

Определение содержания антиоксидантов заключается в измерении электрического тока [9], возникающего при окислении исследуемого вещества (или смеси веществ) на поверхности

рабочего электрода при определенном потенциале и сравнении полученного сигнала с сигналом стандарта (кверцетина – стандартное вещество), измеренного в тех же условиях.

Расчет антиоксидантной активности (СА, мг/см³) исследуемого образца проведен (в соответствии с прописью метода) по калибровочно-му графику кверцетина.

Исследование и расчет комплексообразующей способности пектиновых веществ по отношению к ионам свинца проводили трилонометрическим титрованием, по методике Решетникова В.И.

Массу свинца в анализируемом и контролльном опытах определяли по формуле:

$$m_{Pb} = \frac{(N_2 V_2 - N_1 V_1) * 103,6 * 250}{20 * 1000},$$

где N₁ и V₁ – нормальность и объем (мл) стандартного раствора сульфата цинка, пошедшего на титрование избытка трилона Б;

N₂ и V₂ – нормальность и объем (мл) трилона Б, добавленного к аликоветесвинецодержащему раствору;

103,6 – молярная масса эквивалента свинца, г/моль;

250 – объем исходного раствора, мл;
20 – объем аликовтысвинецсодержащего раствора;

1000 – коэффициент пересчета грамм в миллиграммы.

Комплексообразующую способность пектинов в мг ионов Pb^{2+} на грамм пектина (препарата) определяли по формуле:

$$KC = \frac{m_{pb}^k - m_{pb}^A}{m_h},$$

где m_{pb}^k и m_{pb}^A – масса свинца в контрольном и анализируемом растворах соответственно, мг;

m_h – масса исходной навески исследуемого пектина (препарата), взятая для анализа, г.

Все опыты проводились не менее пяти раз с последующим усреднением результата. Предварительно пектиновые вещества растворяли в воде и готовили растворы концентрацией 1 %. В комбинациях пектинов взяты в соотношении 1:1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При определении антиоксидантной активности образцов в качестве промежуточного результата проведен расчет средней площади пиков водных растворов исследуемых образцов пектиновых веществ (рисунок 1).

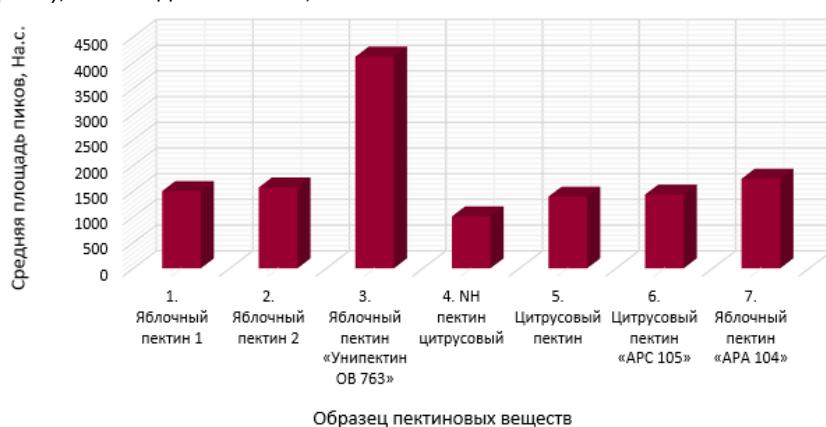


Рисунок 1 – Средняя площадь пиков водных растворов исследуемых образцов пектиновых веществ, S, На.с.

Figure 1 – The average peak area of aqueous solutions of the studied samples of pectin substances, S, Na.s.

Как показывают данные рисунка 1, средняя площадь пиков водных растворов исследуемых образцов пектиновых веществ изменяется в зависимости от вида, степени этерификации (согласно данным спецификаций производителей пектинов) и технологии производства, при-

чем максимальное значение – у образца № 3 (Яблочный пектин «Унипектин ОВ 763»).

В соответствии с прописью метода рассчитано содержание антиоксидантов в водных растворах исследуемых образцов пектиновых веществ (рисунок 2).

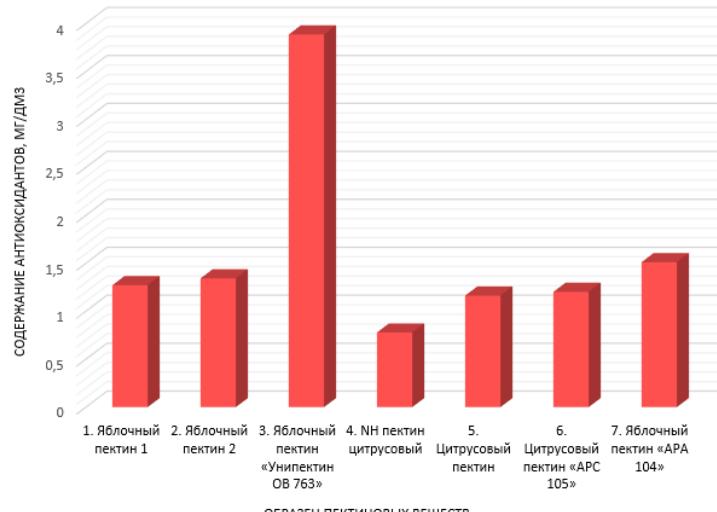


Рисунок 2 – Содержание антиоксидантов в водных растворах исследуемых образцов пектиновых веществ, мг/дм³

Figure 2 – Antioxidant content of aqueous solutions of the studied samples of pectin substances, mg/dm³

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДОВ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ КОМБИНАЦИЙ НА АНТИОКСИДАНТНУЮ АКТИВНОСТЬ И КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПИЩЕВЫХ СИСТЕМАХ

Данные рисунка 2 показывают аналогичный (рисунку 1) характер изменения содержания антиоксидантов водных растворов исследуемых образцов пектиновых веществ.

Результаты расчетов антиоксидантной активности водных растворов исследуемых образцов пектиновых веществ представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Антиоксидантная активность водных растворов исследуемых образцов пектиновых веществ, $\text{мг}/\text{см}^3$

Как показывают данные рисунка 3, антиоксидантная активность образцов пектинов изменяется от 0,78 до 3,89 $\text{мг}/\text{см}^3$, среднее значение составляет 1,59 $\text{мг}/\text{см}^3$. Наибольшей антиоксидантной активностью обладает водный раствор яблочного пектина «Унипектин ОВ 763» – 3,89 $\text{мг}/\text{см}^3$.

Учитывая научную информацию о том, что биополимеры в комбинациях между собой и с другими веществами могут проявлять синерги-

ческие эффекты действия, нами исследованы антиоксидантные свойства комбинаций разных видов (и типов) пектинов [6, 7, 8].

Результаты определения средней площади пиков, содержания антиоксидантов и антиоксидантной активности водных растворов исследуемых образцов комбинаций пектиновых веществ представлены на рисунках 4–6.

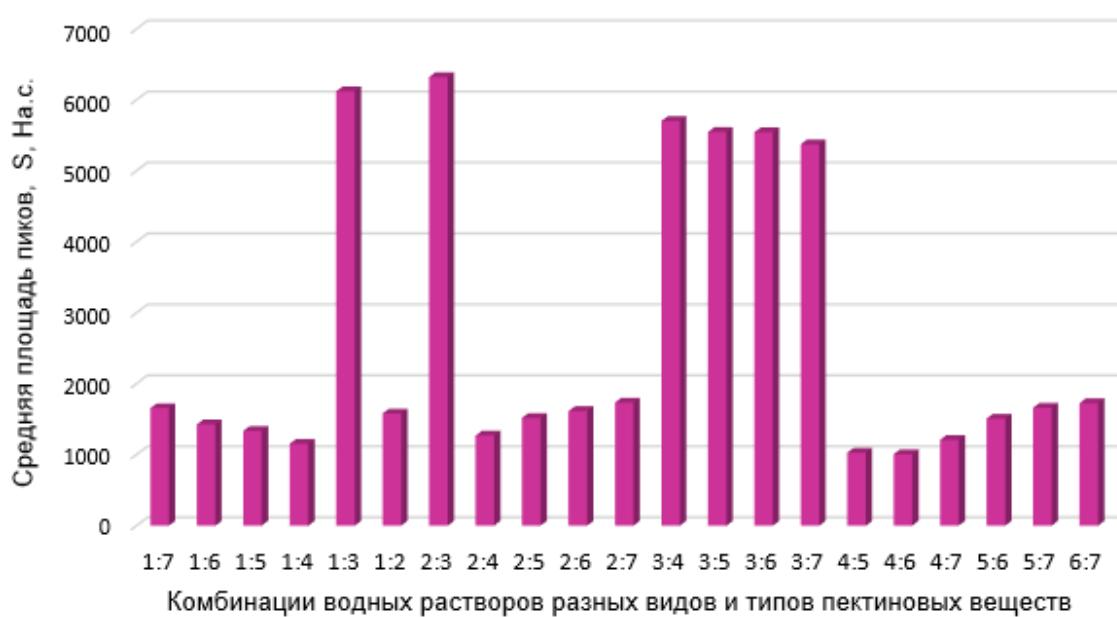


Рисунок 4 – Средняя площадь пиков комбинации водных растворов разных видов и типов пектиновых веществ, $S, \text{На.с.}$

Figure 4 – Average peak area of a combination of aqueous solutions of different types and types of pectin substances, $S, \text{Na.c.}$

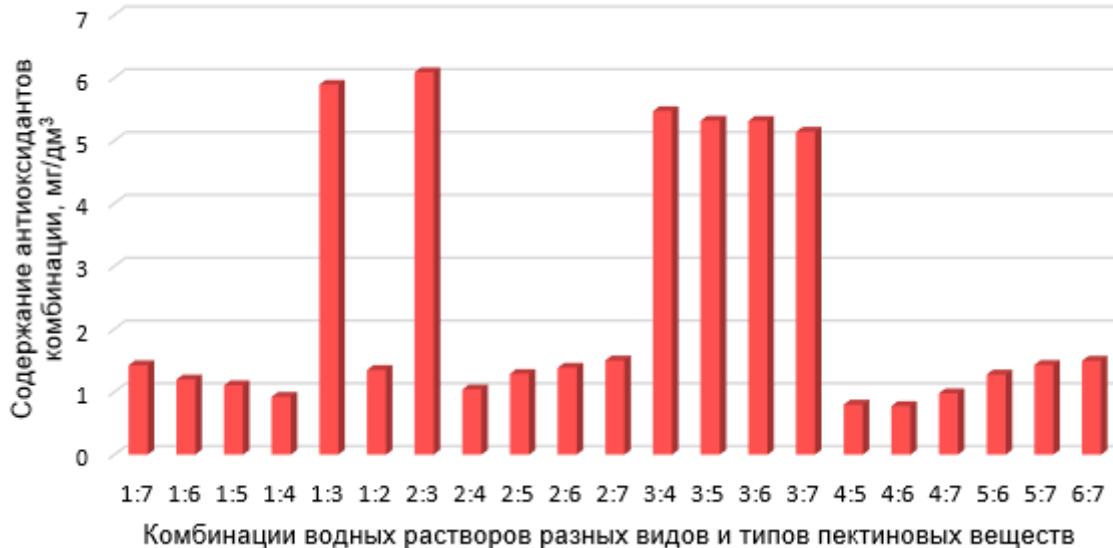


Рисунок 5 – Содержание антиоксидантов в комбинациях водных растворов разных видов и типов пектиновых веществ, мг/дм³

Figure 5 – The content of antioxidants in combinations of aqueous solutions of different types and types of pectin substances, mg/dm³

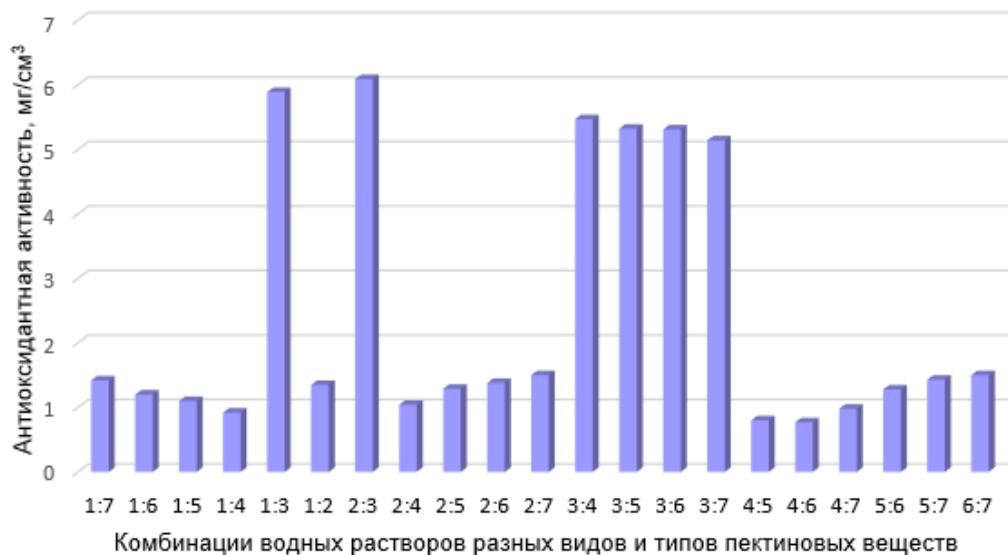


Рисунок 6 – Антиоксидантная активность комбинаций водных растворов разных видов и типов пектиновых веществ, мг/см³

Figure 6 – Antioxidant activity of combinations of aqueous solutions of different types and types of pectin substances, mg/cm³

Данные рисунков 4–6 показывают аналогичность (рост или снижение) в изменении показателей средней площади пиков, содержании антиоксидантов, антиоксидантной активности, проявляемых комбинациями водных растворов разных видов и типов пектиновых веществ. Установлено, что в некоторых комбинациях пектинов (1:3, 2:3, 3:4, 3:5, 3:6, 3:7), содержащих яблочный пектин «Унипектин ОВ 763» (образец № 3), значения, например антиоксидантной активности, значительно возрастают в сравнении

с пектинами (без комбинирования), что подтверждает синергический эффект их действия. По антиоксидантной активности (преимущественные значения) эти комбинации пектинов могут расположиться в убывающий ряд (начиная) следующим образом:

2:3 – Я₂ Я₃ (6,09 мг/см³) > 1:3 – Я₁ Я₃ (5,89) > 3:4 – Я₃ Ц₁ (5,47) > 3:5 – Я₃ Ц₂ (5,32) > 3:6 – Я₃ Ц₃ (5,31) > 3:7 – Я₃ Я₄ (5,14) >.

Показано, что в остальных комбинациях пектинов, не содержащих яблочный пектин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДОВ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ КОМБИНАЦИЙ НА АНТИОКСИДАНТНУЮ АКТИВНОСТЬ И КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПИЩЕВЫХ СИСТЕМАХ

«Унипектин ОВ 763», не наблюдается синергический эффект. По антиоксидантной активности они могут расположиться в убывающий ряд (окончание) следующим образом:

> 2:7 – Я₂ Я₄(1,50), 6:7 – Ц₃ Я₄(1,50) > 5:7 – Ц₂ Я₄(1,43) > 1:7 – Я₁ Я₄(1,42) > 2:6 – Я₂ Ц₃(1,38) > 1:2 – Я₁ Я₂(1,35) > 2:5 – Я₂ Ц₂(1,29) > 5:6 – Ц₂ Ц₃(1,28) > 1:6 – Я₁ Ц₃(1,20) > 1:5 Я₁ Ц₂(1,10) > 1:4 Я₁ Ц₁(0,92) > 4:5 – Ц₁ Ц₂(0,80) > 4:6 – Ц₁ Ц₃(0,77).

Установлено, что антиоксидантная активность выше у пектинов и их комбинаций с низкой степенью этерификации (согласно данным спецификаций производителей пектинов). В значительной степени большую антиоксидантную активность обеспечивает яблочный пектин «Унипектин ОВ 763» (низкометоксилированный, обработанный аммиаком), остальные (необработанные аммиаком) проявляют близкие между собой меньшие значения.

Ранее нами установлено, что комплексообразующая способность свекловичного пектина при значениях pH от 1,0 до 9,0 изменяется

от 474 до 493 мг Pb²⁺ /г пектина, а чистого пектина при тех же значениях pH – выше в каждой точке и составляет 570...650 мг Pb²⁺ /г пектина. Это подтверждает отрицательное влияние балластных веществ в пектине на этот показатель. С увеличением концентрации растворенного пектина в свинецсодержащем растворе повышается его комплексообразующая способность, тогда как увеличение количества сухого пектина в свинецсодержащем растворе значительно снижает этот показатель. Последнее объясняется большой водопоглотительной способностью пектинов и экранированием активных (карбоксильных, гидроксильных и др.) групп, которые увеличиваются с повышением их концентрации. При концентрации пектина 0,27 % комплексообразующая способность одинакова и не зависит от физического состояния пектина.

Далее исследована комплексообразующая способность пектиновых веществ и их комбинаций по отношению к ионам Pb²⁺ (рисунок 7).

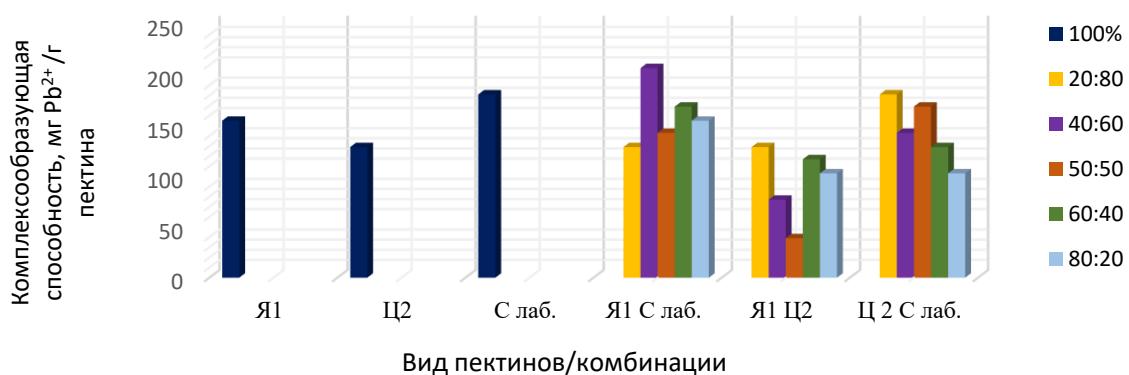


Рисунок 7 – Комплексообразующая способность пектиновых веществ и их комбинаций, мг Pb²⁺ /г пектина

Figure 7 – Complexing ability of pectin substances and their combinations, mg Pb²⁺ /g of pectin

Как показывают данные рисунка 7, комплексообразующая способность пектинов в зависимости от вида и соотношений их в комбинациях варьирует от 207 до 39 мг Pb²⁺ /г пектина. Сравнительный анализ значений комплексообразующей способности представлен ниже:

Пектин:

С лаб. (181 мг Pb²⁺ /г пектина) > Я₁(155) > Ц₂(129).

Комбинации пектинов:

Я₁:С лаб. – 40:60(207)>60:40(169)>80:20(155) >50:50(143)>20:80(129)

Я₁:Ц₂ – 20:80(129)>60:40(117)>80:20(103)>40:60(77)>50:50(39).

Ц₂:С лаб. – 20:80(181)>50:50(169)>40:60(143)>60:40(129) >80:20(103).

Значения комплексообразующей способности могут расположиться в убывающий ряд следующим образом:

Я₁С лаб. – 40:60 (207 мг Pb²⁺ /г пектина) > С лаб.(181); Ц₂С лаб. – 20:80(181)>Я₁С лаб. 60:40(169); Ц₂С лаб.:50:50(169)>Я₁(155); Я₁С лаб. 80:20 (155) > Ц₂С лаб. 40:60 (143); Я₁С лаб. 50:50 (143).> Ц₂ (129); Ц₂С лаб.:60:40(129)>Я₁Ц₂:60:40 (117) > Я₁Ц₂:80:20 (103); Ц₂С лаб.:80:20(103)> Я₁Ц₂:40:60 (77)> Я₁Ц₂:50:50 (39)

Показано, что свекловичный пектин проявляет максимальную комплексообразующую способность самостоятельно и усиливает этот показатель в комбинации с яблочным (в 1,7 раза) и цитрусовым (1,6 раза) при сравнении средних значений: в комбинациях с яблочным – 160,6 мг Pb²⁺ /г пектина, с цитрусовым – 145,0 мг Pb²⁺ /г пектина, без свекловичного пектина (комбинация Я₁:Ц₂) – 93,0 мг Pb²⁺ /г пектина.

Сравнение комплексообразующей способности свекловичного и яблочного (модифицированного низкоэтерифицированного) пектинов показывает, что нативная низкая степень эти-

рификации (как у свекловичного) обеспечивает преимущественные свойства, в том числе комплексообразующую способность.

Таблица 2 – Расчетное значение комплексообразующей способности комбинаций пектиновых веществ, полученных на основе опытных данных для разных видов пектинов

Table 2 – The calculated value of the complexing ability of combinations of pectin substances obtained on the basis of experimental data for different types of pectins

Соотношение компонентов в комбинации, %	Расчетное значение комплексообразующей способности		
	Комплексообразующая способность видов пектиновых веществ (опытное значение), мг Pb ²⁺ /г пектина: Я ₁ – 155; Ц ₂ – 129; С _{лаб.} – 181.		
	Комбинация пектиновых веществ		
	Я ₁ С _{лаб.}	Я ₁ Ц ₂	Ц ₂ С _{лаб.}
20:80	175,8	134,2	170,6
40:60	170,6	139,4	160,2
50:50	168,0	142,0	155,0
60:40	165,4	144,6	149,8
80:20	160,2	149,8	139,4

Как показывают данные таблицы 2, в некоторых комбинациях пектинов (Я₁ С_{лаб.} 40:60; 60:40; Ц₂ С_{лаб.} – 50:50) значения комплексообразующей способности значительно возрастают и превышают расчетные значения, что подтверждает синергический эффект действия. Полученные результаты представляют интерес для дальнейшего исследования пектинов и их комбинаций с целью применения в пищевых системах, обеспечивающих высокий уровень антиоксидантной и детоксикационной защиты организма человека.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что антиоксидантная активность исследуемых видов (и типов) пектиновых веществ и их комбинаций различна и варьирует: от 0,78 до 3,89 мг/см³ (пектины); от 0,77 до 6,09 мг/см³ (комбинации пектинов). Комбинации пектиновых веществ отличаются преимущественным антиоксидантным эффектом, превышающим базовый уровень в 2–3 раза при использовании пектинов различных производителей (без комбинирования). Эффекты антиоксидантной активности могут варьировать в зависимости от степени этерификации (согласно данным спецификаций производителей пектинов). Показана взаимосвязь между антиоксидантной активностью пектинов и их технологическими свойствами. Так, высокими показателями антиоксидантной активности (5,14–6,09 мг/см³) обладают комбинации с «Унипектин ОВ 763» (образец № 3), который технологически отличается от других пектинов обработкой аммиаком, что приводит к изменению структуры полисахарида и, как следствие, к повышению его антиоксидантных свойств. Установлен синергический эффект в проявлении антиоксидантной активности некоторых комбинаций пектинов.

2. Установлено, что комплексообразующая способность комбинаций пектиновых веществ

Для оценки «вклада» каждого вида пектина в комбинации рассчитана их комплексообразующая способность на основе данных рисунка 7. Результаты представлены в таблице 2.

зависит от вида пектинов, их соотношений, степени этерификации (согласно данным спецификаций производителей пектинов). Значения показателя варьируют от 207 до 39 мг Pb²⁺ /г пектина. Показан синергический эффект в проявлении комплексообразующей способности комбинаций яблочного и цитрусового со свекловичным пектином за счет последнего. В комбинации яблочного и цитрусового пектинов значения комплексообразующей способности значительно ниже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белая М.В., Мартынова Е.Г. Роль пектиновых веществ в питании человека // ГОРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ.. Инновационные решения для АПК (24–25 февраля 2021 года): в 4-х. 2021. С. 18.
- Музыка М.Ю. [и др.]. Анализ перспектив создания функциональных напитков с использованием пектина // Colloquium-journal. Голопристанський міськрайонний центр заліяності, 2020. №. 4 (56). С. 29–32.
- Стратегия развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2020 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 17 апреля 2012 г. № 559-р).
- Тарасенко А.В. Исследование свойств пектиновых веществ для производства продуктов здорового питания // Новые технологии. 2023. Т. 19. №. 4. С. 163–167.
- Хатко З.Н. Пектиносодержащие пленочные структуры / З.Н. Хатко, А.А. Ашинова. Майкоп : Майкопский государственный технологический университет, 2019. 112 с.
- Хатко З.Н. Инновационные пектиносодержащие композиции на основе высокоочищенного свекловичного пектина полифункционального назначения: Новые технологии. Майкоп : Изд-во ФГБОУ ВПО № 4. С. 42–48.
- Хатко З.Н. Свекловичный пектин полифункционального назначения: Свойства, технологии, применение. Майкоп : Изд-во МГГУ, 2012. 244 с.
- Хатко, З.Н. Развитие научно-практических основ технологии высокоочищенного свекловичного пектина полифункционального назначения и пектиносодержащих композиций : специальность 05.18.01 "Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодово-ягодной продукции и виноградарства", 05.18.07 "Биотехнология пищевых продуктов и биологических активных веществ" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Хатко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДОВ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ КОМБИНАЦИЙ НА АНТИОКСИДАНТНУЮ АКТИВНОСТЬ И КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПИЩЕВЫХ СИСТЕМАХ

Зурет Нурбиевна. Майкоп, 2013. 40 с.

9. Шерова З.У. [и др.]. Микрокапсулы на основе белка сериицина и яблочного пектина с антиоксидантной активностью // Технологии и продукты здорового питания. 2021. С. 802–808.

10. Chunhong Xiang, Hui Teng, Zhili Sheng, Chao Zhao, Jingteng Deng, Chengang Zhao, Bo He, Lei Chen, Chao Ai, Structural characterization and antioxidant activity mechanism of the ferulic acid-rich subfraction from sugar beet pectin, Carbohydrate Polymers, Volume 347, 2025.

11. Hui Li, Jiajia Rao, Bingcan Chen, Tyramine modification of high and low methoxyl pectin: Physicochemical properties, antioxidant activity, and gelation behavior, Food Hydrocolloids, Volume 144, 2023.

12. Na Liu, Wenna Yang, Xia Li, Ping Zhao, Yu Liu, Lan-ping Guo, Luqi Huang, Wenyuan Gao, Comparison of characterization and antioxidant activity of different citrus peel pectins, Food Chemistry, Volume 386, 2022.

13. Rui-xue Deng, Yi-ying Zheng, Dong-jie Liu, Jing-yi Liu, Meng-nan Zhang, Guang-yuan Xi, Lu-lu Song, Pu Liu. The effect of ultrasonic power on the physicochemical properties and antioxidant activities of frosted figs pectin, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 106, 2024.

14. Shikai Zhang, Geoffrey I.N. Waterhouse, Tingting Cui, Dongxiao Sun-Waterhouse, Peng Wu, Pectin fractions extracted sequentially from *Cerasus humilis*: their compositions, structures, functional properties and antioxidant activities, Food Science and Human Wellness, Volume 12, Issue 2, 2023.

15. Ting Zhang, Hao Zhang, Min Wei, Chuanhe Zhu, Effects of enzymatic treatment on the physicochemical properties and antioxidant activity of hawthorn pectin, Materials Today Communications, Volume 30, 2022.

16. Спецификация «Пектин Унипектин ОВ 763» <https://100ing.ru/media/specifications/pektin-unipektin-ov-763e440.pdf>.

17. Спецификация «Пектин «Айдиго» натуральный растительный загуститель». https://prodservice.shop/upload/iblock/6e5/ev6jp9nilbexvpvk9edzhd704jryl0/f76e843d-6efc-11e4-a779-0015170f6d6d_18103146-2563-11ea-99b5-00155d001848.docx?ysclid=m7x5y17ras244679192.

18. Спецификация «Пектин АРА104 высокой степени этерификации (медленной садки) Е440». <https://kondidoc.com/ru/raws/45105?ysclid=m7x2ggdbc9534406757>.

19. Спецификация «Пектин яблочный Andre Pectin APC105». <https://fontan-mechty.ru/pektin/tproduct/434138135-675445860021-pektin-tsitrusovii-andre-pectin-apc105-2?ysclid=m7x6c1vb9z93890956>.

20. Спецификация «Пектин НН термообратимый VALDE». [https://prodservice.shop/upload/iblock/84e/arf2wlkf8d3sds6l6fm6k4wj2pfzhs/c550778c9-0c49-11eb-80c6-002590199189.pdf?ysclid=m7x5zaw41o20932754](https://prodservice.shop/upload/iblock/84e/arf2wlkf8d3sds6l6fm6k4wj2pfzhs/c550778c9-0c49-11eb-80c6-002590199189_b30e9a3e-0c49-11eb-80c6-002590199189.pdf?ysclid=m7x5zaw41o20932754).

21. Спецификация «Пектин цитрусовый Valde (EWALD)». <https://fontan-mechty.ru/pektin/tproduct/434138135-967443342701-pektin-tsitrusovii-valde-ewald-500-gr?ysclid=m7x61hgrxo554319929>.

22. Спецификация «Пектин яблочный Valde (EWALD)». <https://fontan-mechty.ru/pektin/tproduct/434138135-183524705491-pektin-yablochnii-valde-ewald-500-gr?ysclid=m7x634vsht976357726>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

Информация об авторах

3. Н. Хатко – доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой технологии пищевых продуктов и организации питания ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет».

Т. А. Белявцева – старший преподаватель кафедры технологии пищевых продуктов и организации питания ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет».

Д. М. Бегеретова – аспирант кафедры технологии пищевых продуктов и организации питания ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет».

Е. М. Колодина – преподаватель кафедры технологии пищевых продуктов и организации питания ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет».

С. К. Кудайнетова – младший научный сотрудник кафедры технологии пищевых продуктов и организации питания ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет».

Н. Н. Бугаева – магистрант кафедры технологии пищевых продуктов и организации питания ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет».

Information about the authors

Z.N. Khatko - is a Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Food Technology and Nutrition of the Maykop State Technological University.

T.A. Belyavtseva - is a senior lecturer at the Department of Food Technology and Nutrition of the Maykop State Technological University.

D.M. Begeretova - is a post-graduate student of the Department of Food Technology and Nutrition of the Maykop State Technological University.

E.M. Kolodina - is a lecturer at the Department of Food Technology and Nutrition of the Maykop State Technological University.

S.K. Kudainetova - is a junior researcher at the Department of Food Technology and Nutrition of the Maykop State Technological University. State Technological University".

N.N. Bugaeva - is a graduate student of the Department of Food Technology and Catering of the Maykop State Technological University.



РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Обзорная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.357.7+669.248.7+546.742+661.741.1

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.022

EDN: GNQLXR

АЦЕТАТЫ НИКЕЛЯ И АЦЕТАТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЕМ

Евгений Геннадиевич Афонин

Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств, Калуга, Россия
afonineg.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5457-8646>

Аннотация. Гальванические покрытия никелем широко применяются в промышленности для защитно-декоративной отделки и изменения физико-механических свойств поверхности стали, меди, латуни, бронзы, алюминия, сплавов цинка и других металлических материалов. Никелирование чаще всего проводят электрохимическим осаждением из водных растворов, содержащих соли или комплексы никеля. В настоящей работе представлен обзор литературных данных по водным ацетатным электролитам никелирования, которые по химической природе являются промежуточными между простыми и комплексными. Предложена классификация электролитов, содержащих никель(+2) и ацетат-ион, по химическому составу, приведены некоторые технологические характеристики этих электролитов и физико-механические свойства покрытий. Например, из электролита с pH 5, содержащего 100 г/дм³ ацетата никеля, 30 г/дм³ хлорида никеля, 20 г/дм³ ацетата натрия, 30 г/дм³ борной кислоты, 0,1 г/дм³ лаурилсульфата натрия, при температуре 50 °C, катодной плотности тока 4–5 А/дм² получают твердое покрытие никелем на мягкой стали (катодный выход по току 87 %, рассеивающая способность электролита 7,6–9,6 %). В обзоре также обсуждаются способы приготовления ацетатных электролитов никелирования, в которых в качестве исходных веществ используют никель, его гидроксокарбонат, хлорид, сульфат, ацетат. Приведены литературные данные о растворимости ацетата никеля в воде, экспериментально оценены растворимости тетрагидрата ацетата никеля в водных растворах некоторых веществ и в большом числе органических растворителей различной природы: карбоновых кислотах, спиртах, простых и сложных эфирах, амидах карбоновых кислот, углеводородах, хлорированных углеводородах и других. Представлены сведения о кристаллической структуре тетрагидрата ацетата никеля(+2), а также о комплексообразовании никеля(+2) с ацетат-ионами в водном растворе.

Ключевые слова: ацетат никеля, комплексообразование, растворимость тетрагидрата ацетата никеля, кристаллическая структура тетрагидрата ацетата никеля, гальваническое никелирование, химический состав электролита, ацетатный электролит никелирования, ацетатно-хлоридный электролит никелирования, хлоридно-ацетатный электролит никелирования, ацетатно-формиатный электролит никелирования, ацетатно-аминоацетатный электролит никелирования, технологическая характеристика электролита, приготовление электролита никелирования, отработанный электролит никелирования.

Для цитирования: Афонин Е. Г. Ацетаты никеля и ацетатные электролиты для получения покрытий никелем // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 178–186. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.022. EDN: <https://elibrary.ru/GNQLXR>.

Review article

NICKEL ACETATES AND ACETATE ELECTROLYTES FOR NICKEL PLATING

Evgeniy G. Afonin

Kaluga research institute of telemechanical devices, Kaluga, Russia
afonineg.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5457-8646>

Abstract. Electrodeposited nickel is widely used as corrosion protective decorative coating and for change of physico-mechanical characteristics of metal surfaces. Nickel films are usually produced from aqueous solutions of nickel salts or complexes. In the present work the literature data on aqueous acetate electrolytes for nickel electrodeposition are reviewed. Chemical classification, some technological characteristics of electrolytes containing nickel(+2) and acetate-ion are presented in the article. For instance hard nickel film on mild steel can be electrochemically deposited (pH 5, bath temperature 50 °C, cathode current density 4–5 A/dm²) from solution containing

100 g/dm³ nickel acetate, 30 g/dm³ nickel chloride, 20 g/dm³ sodium acetate, 30 g/dm³ boric acid, 0,1 g/dm³ sodium lauryl sulfate (cathode current efficiency 87 %, throwing power 7,6-9,6 %). Methods for preparing of nickel acetate galvanic baths with nickel metal, nickel basic carbonate, nickel chloride, nickel sulfate, nickel acetate as precursors are described in the review. Literature data on solubility of nickel acetate in water are given, solubilities of $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ in some aqueous solutions and in non-aqueous solvents (carboxylic acids, alcohols, ethers, esters, amides of carboxylic acids, hydrocarbons, chlorinated hydrocarbons and others) are experimentally estimated. Crystal structure of nickel acetate tetrahydrate, complex formation between nickel (+2)-ion and acetate-ion in the aqueous solution are described.

Keywords: nickel acetate, complex formation, solubility of nickel acetate tetrahydrate, crystal structure of nickel acetate tetrahydrate, nickel electrodeposition, nickel electroplating solution, chemical composition of nickel electrolyte, nickel acetate electrolyte, nickel acetate-chloride electrolyte, nickel chloride-acetate electrolyte, nickel acetate-formate electrolyte, nickel acetate-aminoacetate electrolyte, technological characteristic of electrolyte, nickel electrolyte preparing method, nickel spent electrolyte.

For citation: Afonin, E. G. (2025). Nickel acetates and acetate electrolytes for nickel plating. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 178-186. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.022. EDN: <https://elibrary.ru/GNQLXR>.

ВВЕДЕНИЕ

Гальванические покрытия никелем широко применяются в промышленности для защитно-декоративной отделки поверхностей стали и цветных металлов, для защиты от коррозии при повышенной температуре в щелочной среде и в растворах органических кислот, как подслой для получения покрытий другими металлами (медь, хром) на сталь, для повышения твердости и износостойкости поверхности, улучшения паяемости [1-3].

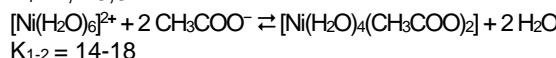
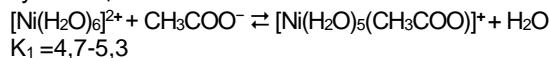
В 1916 г. Оливер П. Уоттс [4] опубликовал состав наиболее известного электролита никелирования, содержащего 240 г/дм³ сульфата никеля $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 20 г/дм³ хлорида никеля $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (или 30 г/дм³ хлорида натрия NaCl) и 20 (или 22) г/дм³ борной кислоты H_3BO_3 ($t = 70^\circ\text{C}$, $i_k = 22-33 \text{ A/dm}^2$). Сейчас термин «электролиты Уоттса» используют для чаще других применяемых в промышленности сульфатно-хлоридных электролитов никелирования с борной кислотой, которые включают 150-400 г/дм³ гексагидратасульфата никеля, 20-90 г/дм³ гексагидрата хлорида никеля (или вместо него 10-40 г/дм³ хлорида натрия), 15-50 г/дм³ борной кислоты (рН 2,0-5,2, $t = 30-80^\circ\text{C}$, $i_k = 1-11 \text{ A/dm}^2$, скорость покрытия 25-85 мкм/ч) [5, 6].

В настоящее время известны электролиты гальванического никелирования различного химического состава, в частности кислые некомплексные хлоридные, сульфатные, сульфатно-хлоридные, сульфаматные, тетрафтороборатные, гексафторосиликатные, метансульфонатные, слабощелочные комплексные дифосфатные, фосфонатные, дикарбоксилатные, глюконатные, цитратные, аминоацетатные, этилендиаминетраацетатные.

В представленной статье рассмотрены составы, способы приготовления и некоторые технологические характеристики водных электролитов никелирования, содержащих ацетат-ион, а также приведены сведения о строении и физико-химических свойствах ацетата никеля.

КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ НИКЕЛЯ(+2) С АЦЕТАТ-ИОНОМ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ

В водном растворе катион никеля(+2) образует с ацетат-ионами комплексы:



Ацетат-ион в водном растворе не образует с

катионом никеля(+2) хелатных комплексов [16], термодинамическая устойчивость ацетатных комплексов никеля(+2) невелика и недостаточна для того, чтобы удержать никель(+2) в водном растворе в нейтральной и щелочной средах; в этих условиях из раствора в осадок выпадают гидроксоацетаты или гидроксид никеля(+2). Значительная степень связывания никеля(+2) в ацетатные комплексы возможна только при высокой концентрации ацетат-ионов и высоком мольном соотношении ацетат/никель(+2) в водном растворе.

Электролиты никелирования, содержащие ацетат, по химической природе являются промежуточными между простыми и комплексными.

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ АЦЕТАТЫ НИКЕЛЯ(+2), ИХ СТРОЕНИЕ И НЕКОТОРЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Из водного раствора при комнатной температуре выделяются зеленые кристаллы $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Нагреванием тетрагидрата ацетата никеля(+2) при $t = 90-120^\circ\text{C}$ (температура начала дегидратации 60-90 °C [17-20]) можно получить безводный ацетат никеля(+2), но этот процесс осложняется пирогидролизом с выделением уксусной кислоты [17-21].

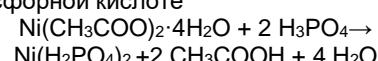
В настоящей работе для оценки растворимости использовали $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ТУ 6-09-02-516-91 марки «чда», который дополнительно очищали изотермической кристаллизацией из подкисленного уксусной кислотой водного раствора при 5-8 °C и высушивали на воздухе при комнатной температуре (рис. 1), а также химические реагенты и органические растворители марок «чда», «хч» или «кос.ч».

$\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ легко растворим в воде (табл. 1). При нагревании водного раствора ацетата никеля в осадок выпадают малорасторимые продукты его гидролиза зеленого цвета, которые растворяются после остывания раствора.

$\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ растворим в водных растворах кислот (серной, хлороводородной, азотной, разбавленных ортофосфорной или муравьиной)

$$\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 2 \text{H}^+ \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2 \text{CH}_3\text{COOH} + 4 \text{H}_2\text{O}$$

(растворы зеленого цвета), в концентрированной ортофосфорной кислоте



(раствор желто-зеленого цвета), легко растворим в водных растворах аммиака

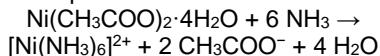
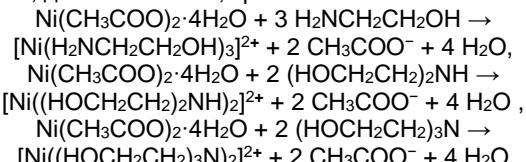


Рисунок 1 – Кристаллический $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Figure 1 – Crystalline $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

(раствор сине-фиолетового цвета), моноэтаноламина, диэтаноламина, триэтаноламина



(растворы синего цвета), этилендиамина, диэтилентриамина

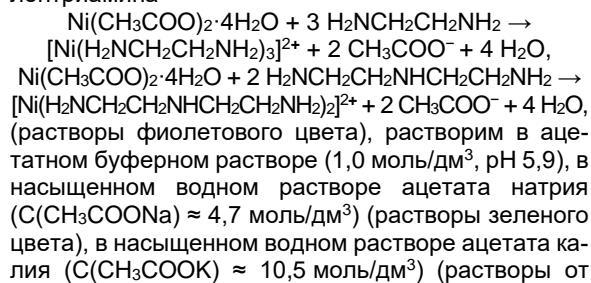


Таблица 1 – Растворимость ацетата никеля(+2) в воде [22] (в г безводной соли в 100 г воды)

Table 1 – Solubility of nickel(+2) acetate in water [22] (g anhydrous salt in 100 g of water)

Температура	5	10	20	25	30	40	50	60	70
Растворимость	10,36	11,14	12,98	14,08	14,7	16,59	20,29	25,61	35,09

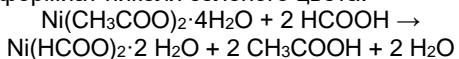
Таблица 2 – Кристаллографические параметры тетрагидрата ацетата никеля $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (монахлинная сингония, пространственная группа симметрии $\text{P}2_1/c$, число формульных единиц в элементарной ячейке (z) = 2)

Table 2 – Crystal data for nickel acetate tetrahydrate $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (monoclinic system, space group $\text{P}2_1/c$, number of formula units (z) = 2)

a, Å	b, Å	c, Å	α, град	Параметры элементарной ячейки		Температура, К	Литература
				β, град	γ, град		
4,7485	11,6933	8,2247	90	92,524	90	1,5	[30]
4,764	11,771	8,425	90	93,6	90	295	[27]
4,760(1)	11,761(4)	8,419(4)	90	93,82(3)	90	295	[28]
4,777(1)	11,777(3)	8,437(2)	90	93,81(2)	90	295	[29]
4,8319(9)	11,900(2)	8,5531(17)	90	–	90	298	[31]
4,7769	11,7809	8,4171	90	93,826	90	300	[30]
4,75	11,77	8,44	90	93,6	90	–	[26]

желтого до зелено-желтого цвета при увеличении концентрации ацетата никеля).

Тетрагидрат ацетата никеля при комнатной температуре растворим в уксусной, пропионовой, масляной кислотах, мало растворим в олеиновой кислоте; в муравьиной кислоте $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ превращается в малорастворимый кристаллический формиат никеля зеленого цвета:



Тетрагидрат ацетата никеля при комнатной температуре растворим в формамиде, диметилформамиде, диметилсульфоксиде, этиленгликоле, глицерине, умеренно растворим в метаноле, этаноле, мало растворим в пропаноле-2, бутаноле-1, 2-метилпропаноле-1, 3-метилбутаноле-1, октаноле-1, бензиловом спирте, очень мало растворим в ацетоне, циклогексаноне, ацетонитриле, этилацетате, бутилацетате, изоамилацетате, 1,4-диоксане, практически нерастворим в диэтиловом эфире, тетрахлориде углерода, трихлорметане, дихлорметане, 1,2-дихлорэтане, гексане, вазелиновом масле, бензоле.

Определены стандартные молярные энталпии образования и дегидратации $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [23].

Безводный ацетат никеля(+2) растворим в уксусной кислоте, из этого раствора кристаллизуется $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 0,5 \text{CH}_3\text{COOH}$ [24, 25]; достоверные и непротиворечивые сведения о растворимости безводной соли в других органических растворителях в литературе отсутствуют. Вещество разлагается при нагревании (по разным данным) выше 250–350 °C с образованием твердого остатка, содержащего преимущественно никель (в атмосфере H_2), карбид никеля (в инертной атмосфере) или оксид никеля(+2) (на воздухе) [17–21], а также большого числа газообразных продуктов пиролиза ацетатиона и продуктов их вторичных превращений (уксусной кислоты, ацетона, кетена, муравьиной кислоты, этанола, диоксида углерода и других) [18–20].

АЦЕТАТЫ НИКЕЛЯ И АЦЕТАТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЕМ

Таблица 3 – Химический состав и некоторые технологические характеристики водных ацетатных электролитов для получения покрытий никелем (t – рабочая температура электролита, i_k – катодная плотность тока, η_k – катодный выход по току, РС – рассеивающая способность электролита)

Table 3 – Chemical compositions and some technological characteristics of aqueous acetate electrolytes for nickel electrodeposition (t - temperature of operation, i_k - cathode current density, η_k - cathode current efficiency, РС - throwing power of electrolyte)

№	Компоненты электролита	Концентрации компонентов, г/дм ³	$t, ^\circ\text{C}$	pH	$i_k, \text{A}/\text{дм}^2$	Свойства электролита и покрытия	Литература
1	2	3	4	5	6	7	8
1	$\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ H_3BO_3	50 12	30		0,5	Блестящее никелевое покрытие на меди. $\eta_k = 96,4\%$	[66]
2	$\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ H_3BO_3 $\text{HCON}(\text{CH}_3)_2$	124 6,2 5 мол.%	35	6,6		Электроосаждение никеля на импульсном обратном токе. Блестящее или полублестящее покрытие чистым никелем	[62]
3	Ацетат никеля Ацетат натрия H_3BO_3 Лаурилсульфат натрия	100 20 30 0,1	50	5	6	Твердое никелевое покрытие на мягкую сталь. $\eta_k = 86,5\%$, РС = 7,4 %	[69]
4	$\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ CH_3COOH H_3BO_3 Желатин Толуол-4-сульфокислота	62,2 13,6 12,0 18,5 1,0 1,0	25	5,25	2	Электроосаждение никеля при наложении переменного тока на постоянный. Зеркально-блестящее покрытие никелем	[55]
5	$\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ NiCl_2	190 30	48–50	3,5–5,0	2–15	Покрытие никелем с высокой пластичностью и прочностью	[56]
6	$\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	118 6	50	4,5	50 (доп.)	Электроосаждение никеля в импульсном режиме. Полублестящее, твердое, беспористое (9–12 мкм) покрытие никелем с редким питтингом. $\eta_k = 86,7\text{--}91,6\%$,	[64]
7	Ацетат никеля Хлорид никеля Ацетат натрия H_3BO_3 Лаурилсульфат натрия	100 30 20 30 0,1	50	5	4–5	Твердое никелевое покрытие на мягкую сталь. $\eta_k = 87\%$, РС = 7,6–9,6 %	[69]
8	Ацетат никеля Хлорид никеля CH_3COOH H_3BO_3	150 45 15,7 35	40	5	1–2	Гладкое, однородное, блестящее покрытие никелем. $\eta_k = 95\%$, РС = 52 %	[65]
9	Ацетат никеля Хлорид никеля	26–37,5 30–37,5	54	4,0–5,5	1,6–21,5	Светлое, полублестящее, пластичное покрытие никелем	[35]
10	$\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ NiCl_2 CH_3COOH SeO_2	100 100 35 см ³ /дм ³ 0,1–0,3	43	3–3,5	2,6–5,2	Блестящее покрытие никелем	[34]
11	Хлорид никеля Ацетат аммония 1,2,3-Трис(β-цианэтокси)пропан	200–00 50–75 0,02–0,06	20–35	3,4–4,5	3–10	Блестящее покрытие никелем с равномерным распределением микротрещин (подслой для покрытия хромом)	[40]
12	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Ацетат натрия NaCl	142 80 25	40	5,5	1–10	Никелевое покрытие на медь, латунь, сталь	[43]
13	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_3\text{COONH}_4$	61–324 15–30	20	4,8	1–4	РС = 15–27 %	[73]
14	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_3\text{COONH}_4$	226 28	20	4,8	1–9	Электроосаждение никеля в импульсном режиме. Наноструктурированное, малопористое (до 20 мкм) покрытие никелем с хорошей адгезией к стальной основе. РС = 10–19 %	[70]

Продолжение таблицы 3 / Continuation of table 3

1	2	3	4	5	6	7	8
15	Хлорид никеля Ацетат никеля	375 100	20–25	5–5,5	10	Блестящее покрытие никелем	[36]
16	Сульфат никеля Ацетат натрия NaCl $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$	80–120 15–20 15–20 30	18–20	4–5,5	3–4	Никелевое покрытие на алюминий и его сплавы	[38]
17	NiSO ₄ ·6H ₂ O Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O NiCl ₂ ·6H ₂ O CH ₃ COOH 2-Фенил-5-бензимидазол-сульфоновая кислота или Сахаринат натрия Сополимер L-аргинина и 1,4-бутандиола диглицидилового эфира	185 или 365 25 10 1,35 0,1–1,0 0,15 0,010	60	4 или 4,6	0,1–12	Блестящее, однородное никелевое покрытие на латуни	[81, 82]
18	Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O Ni(HCOO) ₂ ·4H ₂ O H ₃ BO ₃	50 44 12	30		0,5	Блестящее никелевое покрытие на меди. $\eta_k = 99,8\%$	[66]
19	Ni(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O Ni(HCOO) ₂ ·4H ₂ O Ni(H ₂ NSO ₃) ₂ ·4H ₂ O H ₃ BO ₃	50 44 64,5 12	40		0,5	Блестящее никелевое покрытие на меди. $\eta_k = 98,3\%$	[66]
20	Ni(H ₂ NSO ₃) ₂ ·4H ₂ O NiCl ₂ ·6H ₂ O CH ₃ COOH	383 11 10		1,72	1,6		[61]
21	Ацетат никеля KCl или NiCl ₂ Цитрат калия Сахаринат натрия 2-Бутил-1,4-диол Лаурилсульфат натрия	150 40 30 0 или 0,5 0 или 0,5 0 или 0,2	50	4	1–5	Гладкое, твердое покрытие никелем, хорошо сцепленное с основой из мягкой стали. η_k высокая	[76]
22	NiCl ₂ ·6H ₂ O CH ₃ COONa·3H ₂ O H ₂ NCH ₂ COOH	19 245 15		5,0	0,5 или 5,0	Никелевое покрытие (94,57 % Ni) без отдельных зерен, но с трещинами. $\eta_k = 51,3$ или 21,8 %	[67]

Определена кристаллическая структура тетрагидрата ацетата никеля(+2) (табл. 2). В кристаллах Ni(CH₃COO)₂·4H₂O (рис. 2) имеются дискретные центросимметричные немного искаженные октаэдрические комплексы [Ni(H₂O)₄(CH₃COO)₂]²⁺, в которых центральный катион никеля(2+) связан в транс-положениях с двумя атомами кислорода двух монодентатных ацетат-ионов, а также с четырьмя атомами кислорода молекул воды.

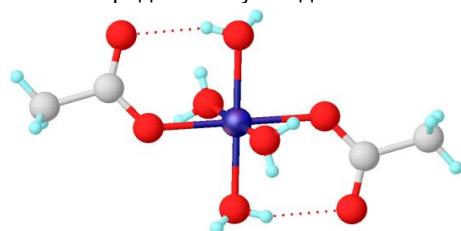


Рисунок 2 – Строение комплекса [Ni(H₂O)₄(CH₃COO)₂]²⁺

Figure 2 – Structure of complex [Ni(H₂O)₄(CH₃COO)₂]²⁺

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНЫХ АЦЕТАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЕМ

В работе [32] изучены катодное и анодное поведение никеля в водных растворах с концентрацией уксусной кислоты 0,5–13 моль/дм³, в статье

182

[33] измерена электропроводность водного раствора ацетата никеля.

Создано большое число электролитов никелирования, содержащих ацетат-ион [34–84]. Заметная часть публикаций посвящена изучению электрохимических особенностей, кинетики и механизма осаждения никеля на катодах, растворения никелевого анода и других аспектов поведения ацетатных электролитов никелирования [44, 45, 47, 51, 52, 57, 71, 80]. Установлено, что введение ацетат-ионов в электролит никелирования, например в электролит Уоттса [37], в сульфаматный электролит [39], или замена борной кислоты на ацетат щелочного металла значительно увеличивает буферную ёмкость электролитов и, что особенно важно, удерживая оптимальное значение pH в прикатодном слое электролита, предотвращает нежелательное образование гидроксида никеля(+2) и гидроксосолей никеля(+2), которые могут включаться в катодный осадок, делая его шероховатым и хрупким [5, 41, 45, 55, 59, 67, 68, 73, 75].

Известны электролиты никелирования, содержащие ацетат-ион, которые предложены для применения в промышленности (табл. 3); вероятно, первый из них разработан в 1936 г. [34].

С химической точки зрения истинным ацетатным электролитом гальванического никелирования можно считать слабокислый электролит, включающий в качестве базовых компонентов ацетат никеля(+2) и буферную систему, состоящую из ацетата щелочного металла (или аммония) и уксусной

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2025

АЦЕТАТЫ НИКЕЛЯ И АЦЕТАТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЕМ

кислоты, которая обеспечивает сохранение заданного интервала pH электролита в объеме и в прикатодном слое, а также значительную степень связывания никеля(+2) в комплекс. В электролитах никелирования этой группы значимыми частицами, влияющими на скорость электромиграции, механизм и скорость электроразряда на катоде и другие процессы, являются аква-ионы $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ и ацетатные комплексы никеля(+2) $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{CH}_3\text{COO})]^+$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{CH}_3\text{COO})_2]$. Из известных электролитов к таким можно отнести электролиты (3, 4) (табл. 3) и с большой натяжкой электролиты (1, 2) (табл. 3).

Большая часть электролитов никелирования, содержащих ацетат, является ацетатно-хлоридными (5–8) (табл. 3), хлоридно-ацетатными (9–15) (табл. 3) и сульфатно-ацетатными (16, 17) (табл. 3). Ацетатно-хлоридные электролиты содержат в высокой концентрации ацетат никеля и, в значительно меньшей, – хлорид никеля, который добавляют для облегчения растворения никелевых анодов. В хлоридно-ацетатных и сульфатно-ацетатных электролитах преобладающим по концентрации компонентом является хлорид (или сульфат) никеля, а ацетат никеля или ацетат щелочного металла играет роль буферной добавки (основные частицы $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^+$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_5\text{Cl}]^+$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}_2]$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{CH}_3\text{COO})]^+$, $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}(\text{CH}_3\text{COO})]$). Электролиты (18, 19) (табл. 3) являются ацетатно-формиатным и ацетатно-формиатно-сульфаматным соответственно. Композиции (21, 22) (табл. 3) представляют собой ацетатно-хлоридный электролит с добавкой небольшого количества цитрат-ионов или аминоуксусной кислоты, связывающих некоторую часть ионов никеля(+2) в прочный цитратный и аминоацетатные комплексы соответственно.

Разработанные электролиты никелирования, содержащие ацетат, работают при комнатной или умеренно повышенной температуре, катодной плотности тока обычно 1–5 А/дм² и обеспечивают выход покрытия по току 87–99 %, рассеивающая способность до 52 % (табл. 3).

Применение импульсного режима электролиза в электролитах никелирования, содержащих ацетат (2, 6, 14) (табл. 3) позволяет улучшить внешний вид, повысить микротвердость никелевого покрытия, увеличить до 50 А/дм² допустимую катодную плотность тока по сравнению со стационарным режимом [62, 64, 70, 72, 83].

В изобретениях [36, 40] предложены хлоридно-ацетатные электролиты для получения покрытие никелем с высоким внутренним напряжением, которые растрескиваются с образованием большого числа равномерно распределенных по поверхности микротрещин, что обеспечивает высокую коррозионную стойкость и блеск двуслойного покрытия никель-хром [3].

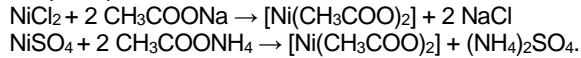
Известны водные электролиты никелирования, содержащие, кроме ацетата никеля, 5 мол. % формамида, метилформамида или диметилформамида [48, 49, 62] (2) (табл. 3), а также неводные (те же растворители и диметилсульфоксид) ацетатные электролиты никелирования [85–88]. Например, из формамидного электролита с концентрациями ацетата никеля 0,2 моль/дм³, ацетата аммония 0,2 моль/дм³, борной

кислоты 0,1 моль/дм³ при t = 40–50 °C, pH 5,4–6,4 (HCl), i_k = 0,5 А/дм² получают твердое, зеркально-блестящее, мелкокристаллическое покрытие никелем на меди и латуни (η_k = 88,7 и 86,4 %) [87].

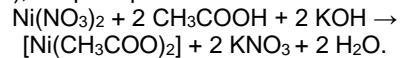
ПРИГОТОВЛЕНИЕ ВОДНЫХ АЦЕТАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ

Источником никеля(+2) при приготовлении ацетатных электролитов гальванического никелирования могут служить следующие производимые химической промышленностью вещества: $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \cdot 7(6)\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiCO}_3 \cdot m\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{H}_2\text{NSO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{BF}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{SO}_3)_2$. Источником ацетат-ионов являются: уксусная кислота CH_3COOH , ацетат натрия $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, ацетат калия CH_3COOK , ацетат аммония $\text{CH}_3\text{COONH}_4$. Источником никеля(+2) и ацетат-ионов может быть тетрагидрат ацетата никеля $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (CAS 6018-89-9, ТУ 6-09-02-516-91, M = 248,85 г/моль).

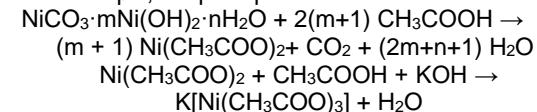
При смешивании водных растворов соли никеля(+2) и ацетата щелочного металла (или аммония) образуется электролит никелирования, содержащий кроме ацетат-иона также второй анион, например:



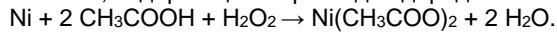
Электролиты того же состава готовят смешиванием растворов соли никеля(+2) и уксусной кислоты с последующим доведением pH до заданного значения путем добавления раствора щелочи (или аммиака), например:



Для приготовления ацетатных электролитов гальванического никелирования, не содержащих иных анионов, кроме ацетат-иона, можно сначала растворить гидроксокарбонат никеля(+2) в избытке водного раствора уксусной кислоты, а затем прибавить раствор основания до достижения заданного значения pH, например:



или растворить кристаллический ацетат никеля(+2) $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в водном растворе ацетата щелочного металла (или аммония) и, при необходимости, добавить уксусную кислоту. Электролиты того же химического состава можно приготовить, растворяя порошок металлического никеля в растворе уксусной кислоты, содержащем пероксид водорода:



ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЦЕТАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НИКЕЛИРОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ацетатные электролиты никелирования обычно устойчивы при работе и хранении и могут использоваться длительное время. Если возникает необходимость их замены на свежие, то образуются отработанные электролиты, которые

содержат ацетат никеля(+2), ацетаты щелочных металлов и некоторые другие вещества. Извлечение ценного и токсичного [89, 90] никеля(+2) из отработанных электролитов и промывных сточных вод можно осуществить, в частности, химическими [91–94] и электрохимическими [95, 96] методами. Ацетат-ион нетоксичен и не является коммерчески ценным компонентом этого класса отходов гальванического производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Никель(+2) образует с ацетат-ионами в водном растворе комплексы с невысокой термодинамической устойчивостью, поэтому ацетатные электролиты никелирования являются слабокислыми, а по химической природе занимают промежуточное положение между простыми и комплексными электролитами. Введение ацетат-ионов в традиционные электролиты никелирования значительно увеличивает их буферную ёмкость, позволяет удерживать оптимальное значение pH в прикатодном слое электролита, повышает микротвердость и внутреннее напряжение, а также влияет на скорость роста и морфологию покрытий никелем.

Хорошая растворимость в воде ацетата никеля(+2), ацетатов натрия, калия, аммония позволяет создавать ацетатные электролиты гальванического никелирования с довольно высокими концентрациями компонентов. Из слабокислых водных электролитов, содержащих ацетат никеля, ацетат щелочного металла или аммония, при добавлении облегчающих растворение анода, выравнивающих, блескообразующих, антипиттинговых и иных добавок можно получать качественные покрытия никелем на различных материалах. Значительная растворимость тетрагидрата ацетата никеля во многих органических растворителях, а также в насыщенном водном растворе ацетата калия дает возможность готовить маловодные ацетатные электролиты гальванического никелирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Di Bari, G.A. (2010). Electrodeposition of nickel // Modern electroplating. Edited Schlesinger M., Paunovich M. 5th edition. Hoboken. NJ. USA: John Wiley & sons. Inc., P. 79-114.
2. Kudryavtsev, N.T. (1979). Electrochemical metal coatings. Moscow: Chemistry publ. 352 p. (In Russ.).
3. Mamaev, V.I. & Kudryavtsev, N.T. (2014). Electrodeposition of nickel: study guide. Moscow: D.I. Mendeleev RCTU. 198 p.
4. Watts, O.P. (1916). Rapid nickel plating // Transactions of the American electrochemical society, 29, 395-403.
5. Dennis, J.K. & Such, T.E. (1993). Nickel and chromium plating. 3th edition. Cambridge. England: Woodhead publishing ltd., 449 p.
6. Rose, I., Whittington, C. & Lo, W.W. (2022). Nickel plating handbook. Toronto: Nickel institute, 103 p.
7. Fronæus, S. (1952). The equilibria between nickel and acetate ions. An ion exchange and potentiometric investigation // Acta chemica scandinavica, 6, 1200-1211. <https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.06-1200>.
8. Tanaka, N. & Kato, K. (1959). The formation constants of metal acetate complexes. I. Polarographic determination of the formation constants of acetatonickel (II) complexes // Bulletin of the chemical society of Japan, 32(5), 516-521. <https://doi.org/10.1246/bcsj.32.516>.
9. Filipović, I., Matusinović, T., Mauer, B., Piljac, I., Bach-Dragutinović, B. & Bujak, A. (1970). On the stability of formato, acetato, propionato, butirato, glycolato and chloroacetato complexes of cobalt, nickel, copper, zinc, cadmium and lead // Croatica chemica acta, 42(4), 541-549.
10. Tedesco, P.H., De Rumi, V.B. & González Quintana, J.A. (1971). Polarographic and spectrophotometric study on nickel-acetate and nickel-propionate complexes // Journal of inorganic and nuclear chemistry, 33(11), 3839-3846. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(71\)80292-0](https://doi.org/10.1016/0022-1902(71)80292-0).
11. Bonsen, A., Eggers, F. & Knoche, W. (1976). Formation of nickel acetate complexes // Inorganic chemistry, 15(5), 1212-1215. <https://doi.org/10.1021/ic50159a048>.
12. Kuzminskaya, G.E., Kublanovskaya, A.I. & Kublanovskiy, V.S. (1979). Complex formation in the nickel(II)-acetate-water system // Ukrainianchemistry journal, 45, 941-944. (In Russ.).
13. Linder, P.W., Torrington, R.G. & Seemann, U.A. (1983). Formation constants for the complexes of levulinate and acetate with manganese(II), cobalt(II), nickel(II), copper(II), zinc(II) and hydrogen ions // Talanta, 30(4), 295-298. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(83\)80069-1](https://doi.org/10.1016/0039-9140(83)80069-1).
14. Smith, R.M. & Martell, A.E. (editors) (1989). Critical stability constants. V. 6. Second supplement. New York: Springer science+business media, 643 p.
15. Bickley, R.I., Edwards, H.G.M., Rose, S.J. & Gustar, R. (1990). A raman spectroscopic study of nickel(II) acetate, $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ and its aqueous and methanolic solutions // Journal of molecular structure, 238, 15-26. [https://doi.org/10.1016/0022-2860\(90\)85002-z](https://doi.org/10.1016/0022-2860(90)85002-z).
16. Strathmann, T.J. & Myleni, S.C.B. (2004). Speciation of aqueous Ni(II)-carboxylate and Ni(II)-fulvic acid solutions: Combined ATR-FTIR and ZAFS analysis // Geochimica et cosmochimica acta, 68(17), 3441-3458. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.01.012>.
17. Naboychenko, S.S., Lebed, A.B., Haritidi, E.Z., Hudjakov, I.F., Plekhanov, K.A., Serebryakova, L.N. & Zhuravlev, V.D. (1984). Method of obtaining copper(II), nickel(II) or cobalt(II) acetates. USSR author's certificate No. 1097604. (In Russ.).
18. Mohamed, M.A., Halawy, S.A. & Ebrahim, M.M. (1993). Non-isothermal decomposition of nickel acetate tetrahydrate // Journal of analytical and applied pyrolysis, 27(2), 109-110. [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(93\)80002-H](https://doi.org/10.1016/0165-2370(93)80002-H).
19. Hussein, G.A.M., Nohman, A.K.H. & Attyia, K.M.A. (1994). Characterization of the decomposition course of nickel acetate tetrahydrate in air // Journal of the thermal analysis and calorimetry, 42, (6), 1155-1165. <https://doi.org/10.1007/BF02546925>.
20. De Jesus, J.C., González, I., Quevedo, A. & Puerta, T. (2005). Thermal decomposition of nickel acetate tetrahydrate: an integrated study by TGA, QMS and XPS techniques // Journal of molecular catalysis. A: Chemical, 228, 283-291. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2004.09.065>.
21. Kamenshchikov, O.Yu., Ketov, A.A., Korzanov, V.S. & Krasnovskikh, M.P. (2018). Synthesis of dispersed nickel by thermal decomposition of formate, acetate and oxalate of nickel(II) // Bulletin of Perm university. Chemistry, 8(3), 278-285. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2018-3-278-285>.
22. Apelblat, A. & Manzurola, E. (1999). Solubilities of magnesium, calcium, barium, cobalt, nickel, copper, and zinc acetates in water from $T = (278.15 \text{ to } 348.15 \text{ K})$ // The journal of chemical thermodynamics, 31(10), 1347-1357. <https://doi.org/10.1006/jcht.1999.0548>.
23. Ribeiro da Silva, M.A.V. & Santos, L.M.N.B.F. (2000). Standard molar enthalpies of formation of $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, and $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ in crystalline state // The journal of chemical thermodynamics, 32(10), 1327-1334. <https://doi.org/10.1006/jcht.2000.0681>.
24. Tappmeyer, W.P. & Davidson, A.W. (1963). Cobalt and nickel acetates in anhydrous acetic acid // Inorganic chemistry, 2(4), 823-825. <https://doi.org/10.1021/ic50008a039>.
25. Edwards, D.A. & Hayward, R.N. (1968). Transition metal acetates // Canadian journal of chemistry, 46(22), 3443-3446. <https://doi.org/10.1139/v68-572>.
26. van Niekerk, J.N. & Schoening, F.R.L. (1953). The crystal structure of nickel acetate, $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, and cobalt acetate, $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ // Acta crystallographica, 6(7), 609-612. <https://doi.org/10.1107/S0365110X5300171X>.

27. Downie, T.C., Harrison, W., Raper, E.S. & Hepworth, M.A. (1971). A three-dimensional study of the crystal structure of nickel acetate tetrahydrate // *Acta crystallographica. Section B*, 27(3), 706-712. <https://doi.org/10.1107/S0567740871002802>.
28. Cramer, R.E., van Doorn, W. & Dubois, R. (1975). Crystal and molecular structure and isotropic hydrogen-1 nuclear magnetic resonance shifts of hexakis(acetic acid)nickel(II) tetrafluoroborate $[\text{Ni}(\text{AcOH})_6](\text{BF}_4)_2$ // *Inorganic chemistry*, 4(10), 2462-2466. <https://doi.org/10.1021/ci50152a034>.
29. Treushnikov, E.N., Kuskov, V.I., Aslanov, L.A. & Soboleva, L.V. (1980). Investigation of the electron-density distribution in nickel acetate tetrahydrate $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ from x-ray diffraction data // *Kristallografiya*, 25(2), 287-293.
30. Nicolai, B., Kearley, G.J., Johnson, M.R., Filliaux, F. & Suard, E. (1998). Crystal structure and low-temperature methyl-group dynamics of cobalt and nickel acetates // *Journal chemical physics*, 109(20), 9062-9074. <https://doi.org/10.1063/1.477577>.
31. Tai, X.-S. (2012). Preparation and crystal structure nickel acetate tetrahydrate // *Advanced materials research*, 396-398, 1860-1863. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR. 396-398.1860>.
32. Badea, G.E. & Badea, T. (2008). Electrochemical behavior of nickel in aqueous acetic acid solutions // *Revue Roumaine de chimie*, 53(4), 291-295.
33. Dong, M., Gabe, D.R., Hart, A.C. & Crouch, P.C. (2014). Further studies of the chemistry of nickel solutions // *Transactions of the IMF*, 92(2), 71-73. <https://doi.org/10.1179/0020296714Z.000000000167>.
34. Mougey, H.C. & Wirshing, R.J. (1944). Electrodeposition of nickel. U. S. Patent № 2338529.
35. Hodaboom, G.B. (1944). Nickel depositing bath and method. U. S. Patent № 2351966.
36. De Koye de Kastalet, G. (1972). Method for producing of electrolytic multilayer coating. Patent № 346885. USSR. (In Russ.).
37. Gluck, V. (1974). The buffering action of nickel acetate in a Watt's nickel bath // *Metal finishing*, 72(5), 96-98.
38. Popilov, L.Y. (1975). Advices for factory technologist. Reference book. Leningrad: Lenizdat publ., 264 p. (In Russ.).
39. Gluck, V. (1975). The buffering action of acetate in nickel plating solution // *Plating and surface finishing*, 62(9), 865-869.
40. Vaynilavichene, M., Shirvite, R.P. & Bodnevas, A.I. (1977). Nickel plating electrolyte. USSR author's certificate. No. 541901. (In Russ.).
41. Kudryavtsev, N.T., Tsupak, T.E. & Shinkareva, G.Ja. (1977). Use of nickel acetate as buffer additive for nickel plating electrolyte // *Proceedings of Mendeleev Moscow chemical technology institute*, 95, 50-53. (In Russ.).
42. Kudryavtsev, N.T., Tsupak, T.E., Loseva, E.I. & Melnikov, V.V. (1979). The investigation of nickel electrodeposition from acetate electrolytes // *Theory and practice corrosion protection of metals*. Kuybishev. 57-58. (In Russ.).
43. Barnes, C. & Ward, J.J.B. (1979). Nickel plating. U.S. Patent № 4159926.
44. Kudryavtsev, N.T., Loseva, E.I., Tsupak, T.E. & Melnikov, V.V. (1980). The investigation of electrode processes of nickel electrodeposition from acetate electrolytes // *Bulletin of the Latvia SSR academy of sciences. Chemistry*, (3), 301-303. (In Russ.).
45. Tsupak, T.E., Bek, R.Yu., Loseva, E.I. & Borodikhina, L.I. (1982). The pH of the near-cathode layer in the electrolysis of nickel acetate-chloride solutions // *Electrochemistry*, 18(1), 86-92. (In Russ.).
46. Nguen, Z.Sh., Tsupak, T.E. & Gelfand, M.R. (1983). Properties of nickel deposits obtained from acetate chloride electrolyte // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 26(9), 1106-1109. (In Russ.).
47. Tsupak, T.E., Bek, R.Yu., Nguen, Z.Sh. & Borodikhina, L.I. (1983). Reasons for high permissible current density of nickel electrodeposition from acetate electrolyte // *Proceedings of Mendeleev Moscow chemical technology institute*, 129, 32-40. (In Russ.).
48. Sultan, S. & Tikoo, P.K. (1984). Hardness and structure of nickel electrodeposited from a nickel acetate - N,N-dimethylformamide - water bath // *Surface technology*, 21(3), 239-244.
49. Sultan, S. & Tikoo, P.K. (1984). Hardness and structure of nickel electrodeposited from its sulphate and acetate salts in a 5mol.%N-methylformamide - water mixture // *Surface technology*, 22(3), 241-244. [https://doi.org/10.1016/0376-4583\(84\)90085-2](https://doi.org/10.1016/0376-4583(84)90085-2).
50. Tsupak, T.E., Andreev, I.N., Valeev, N.N. & Nguen, Z.Sh. (1985). Influence producing conditions on microhardness and internal stress of nickel galvanic coatings obtained from acetate solutions // *Journal of applied chemistry*, 58(2), 392-394. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/YSAZFH>.
51. Bek, R.Yu., Tsupak, T.E., Nguen, Z.Sh. & Borodikhina, L.I. (1985). Features of mass transport in the nickel plating acetate solutions // *Electrochemistry*, 21(9), 1190-1193. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/YSJVTN>.
52. Bek, R.Yu., Tsupak, T.E., Nguen, Z.Sh. & Borodikhina, L.I. (1985). Influence of hydrogen evolution on mass transport and pH of near-cathode layer in electrodeposition of nickel from acetate electrolyte // *Electrochemistry*, 21(10), 1346-1349. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/YSBBAZ>.
53. Gamburg, Yu.D., Nguen, F.N. & Tsupak, T.E. (1985). Physico-mechanical properties of nickel deposited from acetate electrolytes // *Electrochemistry*, 21(10), 1400-1403. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/YSJWFB>.
54. Gamburg, Yu.D., Nguen, F.N., Vashchenko, S.V. & Tsupak, T.E. (1985). Incorporation of hydrogen into nickel electrodeposited from acetate electrolyte solution // *Electrochemistry*, 21(10), 1403-1405. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/WGDRLM>.
55. Abd El Wahaab, S.M., Abd El-Halim, A.M., Abd El Rehim, S.S. & Abd El Meguid, E.A. (1986). Effect of bath constituents and superimposed sinusoidal a. c. on nickel electroplating from acidic acetate solutions // *Surface and coating technology*, 29 (4), 313-324. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(86\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0257-8972(86)90004-6).
56. Grilikhes, S.Ja. & Tikhonov, K.I. (1990). Electrolytic and chemical coatings. Theory and practice. Leningrad: Chemistry publ., 288 p. (In Russ.).
57. Tsupak, T.E., Kopteva, N.I., Bek, R.Yu. & Shuraleva, L.I. (1991). The reasons of high cathode current densities in the diluted nickel acetate solutions // *Electrodeposition of metals and alloys: Proceedings of Mendeleev Moscow chemical technology institute*, 68-75. (In Russ.).
58. Dakhov, V.N., Tsupak, T.E., Kopteva, N.I., Kryshchenko, K.I. & Gamburg, Yu.D. (1993). Electrodeposition of nickel and nickel-phosphorus alloy from diluted acetate electrolytes // *Electro-plating and surface treatment*, 2(3), 30-33. (In Russ.).
59. Krishnan, R.M., Eleankovan, T., Aruna, A., Sriveeraghavan, S., Jayakrishnan, S. & Natarajan, S.R. (1996). Effect of organic acids in nickel plating // *Bulletin of electrochemistry*, 12(5-6), 270-273.
60. Bek, R.Yu., Tsupak, T.E., Shuraleva, L.I. & Kopteva, N.I. (1996). Low-waste environmentally friendly acetate-chloride electrolytes for nickel electrodeposition // *Chemistry for sustainable development*, 4(2), 101-105. (In Russ.).
61. Law, H.H., Schneemeyer, L.F. & Wu, T.-S. (1998). Electroplating of nickel on nickel ferrite devices. U. S. Patent No. 5779873.
62. Sultan, S. (2006). Pulse plated nickel electrodeposits // *Materials science research India*, 3(3A), 47-54. <https://doi.org/10.13005/msri/031a05>.
63. Tsupak, T.E. & Kryshchenko, K.I. (2006). Prospects for application in instrument engineering of nickel coatings obtained from nickel acetate base electrolytes // *Proceedings of scientific and practical conference «Galvanic and special coatings for electronic engineering»*. Moscow. Mendeleev Moscow chemical technology university publishing centre, 65-67. (In Russ.).
64. Peganova, N.V. & Tsupak, T.E. (2007). Electrodeposition of nickel from dilute acetate-chloride bath using pulse current // *Electroplating and surface treatment*, 15(4), 18-24. (In Russ.).
65. Marikkannu, K.R., Surya Kala, K., Paruthimal Kalaiganan, G. & Vasudevan, T. (2008). Electroplating of nickel from acetate based bath - Hull cell studies // *Transactions of the IMF*, 86(3), 172-176. <https://doi.org/10.1179/174591908X304153>.
66. Srivastav, H.K. & Aarti, Pandey. (2008). Effect of temperature on physical characteristics of nickel electrodeposited from

- nickel salts in presence 1,4-dioxane-aqueous bath // Asian journal of chemistry, 20(1), P. 37-42.
67. Zuen, W.T., Dolgikh, O.V., Sotskaya, N.V. & Kotlyarova, E.A. (2009). Kinetics of nickel electrodeposition from solution with different anions // Condensed matter and interphases, 11(1), 37-46. (In Russ.).
68. Antikhovich, I.V., Chernik, A.A. & Zharskiy, I.M. (2011). Electrodeposition of nickel coatings from acetate electrolytes // Proceedings of BSTU, (3), 20-23. (In Russ.).
69. Srinivasan, R. & Bapu, G.N.K.R. (2011). Characterisation of nickel deposits from nickel acetate bath // Transactions of the IMF, 89(5), 275-280. <https://doi.org/10.1179/174591911X13123681387603>.
70. Antikhovich, I.V., Krupnik, S.M., Chernik, A.A. & Zharskiy, I.M. (2012). Electrochemical deposition of nickel coatings from acetate-chloride electrolyte in pulse regime // Proceedings of BSTU, (3), 8-12. (In Russ.).
71. Srinivasan, R. & Bapu, G.N.K.R. (2013). Effect of additives on electrodeposition of nickel from acetate bath: cyclic voltammetric study // Transactions of the IMF, 91(1), 52-56. <https://doi.org/10.1179/0020296712Z.00000000062>.
72. Antikhovich, I.V., Chernik, A.A. & Zharskiy, I.M. (2013). Influence of pulse regime electrolysis on properties of nickel coatings obtained from low concentrated acetate-chloride electrolyte // Bulletin of StPbSIT (TU), 20(46), 30-34. (In Russ.).
73. Antikhovich, I.V., Chernik, A.A. & Zharskiy, I.M. (2014). Electrochemical deposition of nickel from acetate-chloride electrolytes with ammonium acetate // Bulletin of BSU. Section 2, (1), 15-20. (In Russ.). <https://elib.bsu.by/handle/123456789/108979>.
74. Krasikov, A.V. & Ezhev, A.A. (2015). Water-based electrolyte for nickelising products from steel, aluminium, titanium, copper and their alloys. Patent № 2543584 Russian Federation. (In Russ.).
75. Antikhovich, I.V., Chernik, A.A., Zharskii, I.M. & Bolvako, A.K. (2015). Electrodeposition of a nickel coating from a low-temperature acetate-chloride nickel-plating electrolyte // Russian journal of electrochemistry, 51(3), 281-285. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1023193515030027>.
76. Sekar, R., Jagadese, K.K. & Bapu, G.N.K.R. (2015). Microstructure and corrosion behaviour of electrodeposited nanocrystalline nickel prepared from acetate bath // Korean journal of chemical engineering, 32(6), 1194-1200. <https://doi.org/10.1007/S11814-014-0289-7>.
77. Ivshin, Ja.B. (2016). Copper electrodeposition on pre-nickel steel from acid sulfate electrolytes // Herald of technological university, 19(9), 105-107. (In Russ.).
78. Ivshin, Ja.V., Shaykhutdinova, F.N. & Sycoev, V.A. (2017). Electrodeposition of copper on mild steel. Process features // Electronic processing of materials, 53(4), 20-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1053749>.
79. Mech, K. (2017). Influence of organic ligands on electrodeposition and surface properties of nickel film // Surface and coating technology, 315, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.042>.
80. Makarova, I.V., Kurilo, I.I. & Chernik, A.A. (2017). Mechanism of nickel ions reduction from acetate electrolytes // Herald of technological university, 20(24), 18-21. (In Russ.).
81. Lipschutz, M. (2019). Environmentally friendly nickel electroplating compositions and methods. U. S. Patent No. 10508348.
82. Lipschutz, M. (2019). Nickel electroplating compositions with copolymers of arginine and bisepoxides and method of electroplating nickel. Eur. Patent No. 3428322.
83. Kireev, S.Yu. & Frolov, A.M. (2021). Electrodeposition of nickel coatings from acetate-chloride electrolyte using galvanostatic pulse electrolysis // Protection of metals and physical chemistry of surfaces, 57(7), 1375-1379. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2070205121070078>.
84. Frolov, A.M. & Kireev, S.Yu. (2021). Reversible galvanostatic mode of deposition of nickel coatings from an acetate-chloride electrolyte // Advances in chemistry and chemical technology, 35(5), 57-59 (In Russ.). eLIBRARY ID:46633674. EDN://elibrary.ru/RNKPWA.
85. Sultan, S. & Tikoo, P.K. (1984). Electrodeposition of nickel from formamide // Surface technology, 21(3), 233-238. [https://doi.org/10.1016/0376-4583\(84\)90084-0](https://doi.org/10.1016/0376-4583(84)90084-0).
86. Srivastava, H.K. & Tikoo, P.K. (1987). Effect of cobalt, cadmium and ammonium ions on the electrodeposition of nickel pour dimethylsulfoxide/nickel acetate // Plating and surface finishing, 74(2), 67-70.
87. Srivastava, H.K. & Tikoo, P.K. (1988). Bright and hard electrodeposits of nickel from nickel acetate-formamide bath // Materials science and technology, 4(9), 836-843. <https://doi.org/10.1179/mst.1988.4.9.836>.
88. Srivastava, H.K. (1989). Physico-mechanical properties of nickel electrodeposited from nickel acetate-amide baths // Materials science and technology, 5(12), 1229-1235. <https://doi.org/10.1179/mst.1989.5.12.1229>.
89. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Chromium, nickel and welding, (1990). (49), 257-445.
90. Barceloux, D.G. & Barceloux, D. (1999). Nickel // Journal of toxicology: clinical toxicology, 37(2), 239-258. <https://doi.org/10.1081/CLT-100102423>.
91. Afonin, E.G. (2005). Method for preparing nickel oxalate. Patent № 2256647. Russian Federation. (In Russ.).
92. Afonin, E.G. (2014). Method of obtaining nickel(II)-ammonium phosphates. Patent No. 2535834. Russian Federation. (In Russ.).
93. Afonin, E.G. (2014). Nickel(+2) recovery from spent nickel electroplating and electroless plating solutions in the form of ammonium nickel phosphates // Science intensive technologies, 15(6), 34-40. (In Russ.).
94. Afonin, E.G. (2015). Nickel(+2) recovery from spent nickel electroplating and electroless plating solutions by chemical reagents treatments // Proceedings of the 14th Russian scientific and technical conference «New information technologies in communication and control systems». Kaluga, Noosfera publ., 374-382. (In Russ.).
95. Avci, E. (1989). Electrolytic recovery of nickel from dilute solutions // Separation science and technology, 24(3-4), 317-324. <https://doi.org/10.1080/01496398908049770>.
96. Coman, V., Robotin, B. & Ilea, P. (2013). Nickel recovery/removal from industrial wastes: a review // Resources, conservation and recycling, 73, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.019>.

Информация об авторе

Е. Г. Афонин – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств.

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 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК 669

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.023

EDN: HNJCCF

ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА AL-2CU-2MN

Алина Александровна Левагина¹, Евгений Владимирович Арышенский²,
Сергей Валерьевич Коновалов³, Александр Михайлович Дриц⁴,
Максим Сергеевич Тептерев⁵

^{1, 2, 3} Сибирский государственный индустриальный университет, Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

¹ aline.levagina@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7270-6008>

² arishenskiy_ev@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>

³ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

^{4, 5} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия

⁴ dritsam@gmail.com, 0000-0002-9468-8736

⁵ tepterev.ms@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9018-1188>

Аннотация. В работе исследовано формирование микроструктуры и физико-механических свойств при производстве холоднокатанной ленты из алюминиевого сплава Al-2Cu-2Mn. В частности, изучено влияние деформационной (горячая и холодная прокатка) и термической обработки на механические свойства и удельную электропроводность сплавов. Показано, что полученное изделие сохраняет структуру нерекристаллизованной до температуры отжига 450 °C, а также имеет в составе мелкодисперсные вторичные выделения $Al_{20}Cu_2Mn_3$, образующиеся при данной температуре и повышающие прочность. Кроме того, данный сплав после отжига имеет также высокие значения электропроводности, что подтверждает возможность его применения в качестве электротехнической ленты. Предел прочности и удельная электропроводность изготовленной ленты, отожженной при температуре 400 °C, 3 часа составили 294 МПа и 29,3 МСм/м соответственно. Кроме того, установлено положительное влияние горячей прокатки на прочностные свойства, а именно на их термостабильность.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, АЛТЭК, предел прочности, микроструктура, удельная электропроводность.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00064, <https://rscf.ru/project/24-19-00064/>.

Для цитирования: Исследования формирования микроструктуры и свойств при производстве ленты из сплава Al-2Cu-2Mn / А. А. Левагина [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 187–196. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.023. EDN: <https://elibrary.ru/HNJCCF>.

Original article

STUDIES OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES FORMATION DURING PRODUCTION OF AL-2CU-2MN ALLOY STRIP

Alina A. Levagina¹, Evgenii V. Aryshenski², Sergei V. Konovalov³,
Alexander M. Drits⁴, Maksim S. Tepterev⁵

^{1, 2, 3} Siberian State Industrial University, Kirova str., 42, 654007, Novokuzneck, Russia

¹ aline.levagina@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7270-6008>

² arishenskiy_ev@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3875-7749>

³ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

^{4, 5} Samara National Research University, Moskovskoe shosse, 34, 443086, Samara, Russia

⁴ dritsam@gmail.com, 0000-0002-9468-8736

⁵ tepterev.ms@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9018-1188>

Abstract. The paper investigates microstructure as well as physical and mechanical properties formation during production of cold-rolled strip from Al-2Cu-2Mn aluminum alloy. Specifically, the effect of deformation (hot

© Левагина А. А., Арышенский Е. В., Коновалов С. В., Дриц А. М., Тептерев М. С., 2025

and cold rolling) and heat treatment on alloys mechanical properties and electrical conductivity has been studied. It is demonstrated, that the produced article retains its non-recrystallized structure up to the annealing temperature of 450°C, and also contains finely dispersed secondary $Al_{20}Cu_2Mn_3$ precipitates, formed at this temperature and increasing alloy strength. In addition, this alloy has high electrical conductivity value after annealing, justifying its application as EC grade material. The produced strip, annealed during 3 hours at 400°C, has ultimate strength and electrical conductivity of 294 MPa and 29.3 MS/m, respectively. In addition, it was established, that hot rolling had positive effect on strength properties, thermal stability, specifically.

Keywords: aluminum alloys, ALTEK, ultimate strength, microstructure, electrical conductivity.

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-19-00064, <https://rscf.ru/project/24-19-00064/>.

For citation: Levagina, A. O., Aryshenskii, E. V., Konovalov, S. V., Drits, A. M. & Tepterev, M. S. (2025). Studies of microstructure and properties formation during production of $Al-2Cu-2Mn$ alloy strip. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 187-196. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.023. EDN: <https://elibrary.ru/HNJCCF>.

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника играет важную роль в различных сферах жизни страны, начиная от промышленности и энергетики, заканчивая повседневным бытом. В контексте увеличения потребления электроэнергии [1–2] и повышенного спроса на легкие и прочные материалы возникает необходимость разработки новых алюминиевых сплавов, отвечающих требованиям электротехнической промышленности. В том числе они требуются для проводов и обмоток трансформаторов, которые должны иметь не только высокую удельную электропроводность, но также и механическую прочность [3–6]. Это объясняется тем, что провода и кабели часто подвергаются внешним механическим нагрузкам ввиду воздействия внешних факторов, например, таких как погодные явления (ветровые нагрузки, гололедные образования) [7–9]. Такие нагрузки приводят к возникновению вибраций и галопированию [8] проводов, которое можно описать как колебание проводника в вертикальной плоскости, что может привести к обрыву жил или разрушению арматуры. Возникновение колебаний может быть также связано с увеличением силы притяжения между проводами вследствие воздействия переходных процессов при подаче напряжения в линию или скачкообразного изменения нагрузки. Однако такое явление имеет, как правило, разовый эффект и встречается реже, чем колебания, возникающие под действием воздушного потока [8].

Для обмоток трансформаторов механическая прочность также является важным аспектом, поскольку она обеспечивает сохранность обмотки при возникновении короткого замыкания. Механические силы в обмотках возникают вследствие взаимодействия тока с магнитным полем устройства [10].

Как известно, в электротехнической промышленности в качестве проводников применяются медь и алюминий, а также их сплавы. Обычно в обмотках трансформаторов используют алюминий с гарантированными электрическими свойствами марки АЕ и медь марок М00, М0, М1 [9, 11–14]. Алюминиевую катанку для проводов и кабелей также изготавливают из металлов высокой и технической чистоты, а также из высокопрочных сплавов на основе системы $Al-Si-Mg$ (АВЕ, 6101, 6201), $Al-Fe$ (8030, 8176), $Al-Zr$ (АЦЕ) [12]. При сравнении меди и алюминия следует отметить, что медь обладает более высокой прочностью и меньшим электросопротивлением. Одна-

ко в последние годы наблюдается тенденция замещения меди алюминием, что обусловлено несколькими важными факторами. Алюминий значительно дешевле меди, что делает его более привлекательным для массового производства проводов и кабелей. Кроме того, алюминий обладает низким удельным весом, что является важным преимуществом для многих устройств и конструкций. Алюминиевые сплавы, по сравнению с чистым алюминием, обладают меньшей удельной электропроводностью из-за содержания легирующих элементов, но при этом обладают повышенной прочностью. В то же время большинство алюминиевых сплавов, за исключением алюминиево-циркониевых, не обладают достаточной термостойкостью [15–16]. Это обстоятельство негативно сказывается на сроке службы изделий, так как проводники под длительным воздействием высоких температур теряют свою удельную электропроводность и становятся менее надёжными. Таким образом, разработка новых термостойких алюминиевых сплавов для электротехнической промышленности является актуальной задачей.

Материалами для электротехники, которые могли бы совмещать в себе высокую прочность, удовлетворительную удельную электропроводность и термостабильность, являются недавно разработанные проф. Н.А. Беловым сплавы $Al-Cu-Mn$, получившие также название АЛТЭК [17–34]. Уникальные свойства системы объясняются правильно подобранными химическими концентрациями элементов, образующие равновесную, почти двухфазную структуру [30]. Так, при концентрациях до 2 %Cu и до 2 %Mn возможно сформировать вторичные выделения фазы $Al_{20}Cu_2Mn_3$ (T), которые более термостабильны по сравнению с выделениями фазы Al_2Cu (θ), характерных для других жаропрочных медесодержащих сплавов. Они затрудняют рекристаллизацию, сохраняя деформационное упрочнение до 400 °C. Выделения имеют небольшой размер – 100–500 нм. Так, при термической обработке сплавов возрастает удельная электропроводность благодаря выпадению марганецодержащих частиц из твердого пересыщенного раствора. В то же время термостойкие частицы начинают препятствовать движению дислокаций, затрудняя процессы рекристаллизации и возврата, благодаря чему прочность сплавов повышается до температуры отжига 400 °C.

Существующие исследования сплавов АЛТЭК

ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА AI-2Cu-2Mn

в основном посвящены вариациям химических составов, в которых содержание меди составляет 1,5–2 % а марганца 1,5 % [17–23, 25–34]. Кроме того, в этих сплавах могут использоваться добавки других легирующих элементов [19–22, 25, 33–34]. Последние исследования показали, что весьма перспективными являются сплавы с содержанием меди и марганца 2 % [17–18, 25, 29–30, 34].

Проведенные исследования показали, что структура сплавов типа АЛТЭК сильно зависит от параметров термодеформационной обработки [17–18, 25, 29–30, 34]. С учетом особенностей промышленной технологии, которая, как правило, преду-

Таблица 1 – Химические составы модельных сплавов
Table 1 – Chemical compositions of model alloys

Шифр плавки	Cu, %	Mn, %	Fe, %	Si, %	Al, %	кокиль
1						стальной
2	2,01	2,06	0,07	0,04	95,82	медный

Было отлито 2 слитка размерами: 40x120x450 мм в стальном кокиле № 1 и 12x50x200 мм в медном № 2. Скорость охлаждения сплава в стальном 2 °C/c; для медного кокиля – 10 °C/c [39]. Для приготовления расплава использовался алюминий марки A85Si, медь М1, таблетки Mn90, лигатура Zr5. Для плавки

Таблица 2 – Режимы деформации / Table 2 – Deformation modes

№	Операция	Условия	Единичное обжатие, %	Полученное изделие
1	Горячая прокатка	–	–	
1.1	Слиток из стального кокиля	С 40 мм до 2 мм, температура 380–420 °C	93	Лист толщиной 2 мм
1.2	Слиток из медного кокиля	С 12 мм до 2 мм, температура 380–420 °C	83	
2	Промежуточный отжиг	30 мин, 350 °C	–	Отожженный лист
3	Холодная прокатка	С 2 мм до 1 мм,	50	Лист толщиной 1 мм

Промежуточный отжиг проводился в муфельной печи THERM CONCEPT KM 70/06/A при температуре 350 °C, 30 минут. Исследовалось изменение механических свойств (предел прочности, условный предел текучести, относительное удлинение) в зависимости от температуры отжига (300...500 °C с шагом 50 °C).

Для измерения удельной электрической проводимости в зависимости от этапа деформационной обработки использовался вихревоковый измеритель для цветных металлов ВЭ-27НЦ/4-5 согласно ГОСТ 27333-87. Точность измерений составляла ± 2 % при температуре в диапазоне от 25 до 30 °C.

Были проведены испытания алюминиевых сплавов на универсальной испытательной машине Zwick / Roell Z050 для определения их механических свойств методом одноосного растяжения в соответствии с ISO 6892-1 при комнатной температуре. Расчеты предела текучести, предела прочности и относительного удлинения по результатам испытаний были выполнены согласно ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 11150-84.

Также исследовалась зеренная структура и микроструктура (наличие частиц, их состав, размер и форма) сплавов в процессе деформационной обработки. Исследование зеренной структуры образцов проводилось с использованием оптического микроскопа «Axiovert-40 MAT» (Carl Zeiss, Германия).

Исследование размеров и распределения дисперсий, а также более крупных интерметаллидных частиц проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ)

сматривает многостадийную горячую прокатку [35–36], формирование структуры в промышленных и лабораторных условиях может достаточно сильно различаться [37–38]. Целью данной статьи является изучение влияния технологической схемы, включающей в себя как холодную, так и горячую прокатку на формирование микроструктуры и механических свойств в сплаве Al-2%Mn-2%Cu.

МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования были разработаны химические составы системы АЛТЭК (табл. 1).

использовалась плавильная печь Xtoki. Далее слитки подвергались деформированию прокатным станом DIMA 300 до толщины 1 мм. Такая толщина была выбрана связи с тем, что толщина ленты для обмотки трансформаторов составляет 0,22–2 мм [3]. Режимы деформации представлены в таблице 2.

модели JEOL 6390A (Япония). Микроскоп оснащен электронно-зондовыми приставками для локально-го микроанализа (EDS, WDS). Для изучения химического состава интерметаллидов применялся энергодисперсный спектрометр (EDS, OXFORDINSTRUMENTS) с точностью до 0,01 %. Подготовка образцов включала несколько этапов: вырезку, механическое шлифование, полирование и электрополирование в фтороборном электролите, состав которого был следующим: борная кислота – 11 г, фтористоводородная кислота – 30 мл, дистиллированная вода – 2200 мл. Электрополирование осуществлялось при температуре 85–110 °C и напряжении 10–30 В в электролите, состоящем из: H₃PO₄ – 500 мл, H₂SO₄ – 300 мл, CrO₃ – 50 г и H₂O – 50 мл. Для каждого образца было выполнено 10 снимков, что позволило собрать статистические данные, необходимые для более точного определения размеров частиц. Чтобы обеспечить точность подсчета количества частиц, изображения подвергались повышению контрастности до тех пор, пока не начали проявляться "шумовые" точки. Для обработки изображений и достижения оптимального контраста алюминиевой матрицы и вторичных фаз использовалась программа Image J.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Микроструктура новых сплавов в литом состоянии представлена на рисунке 1.

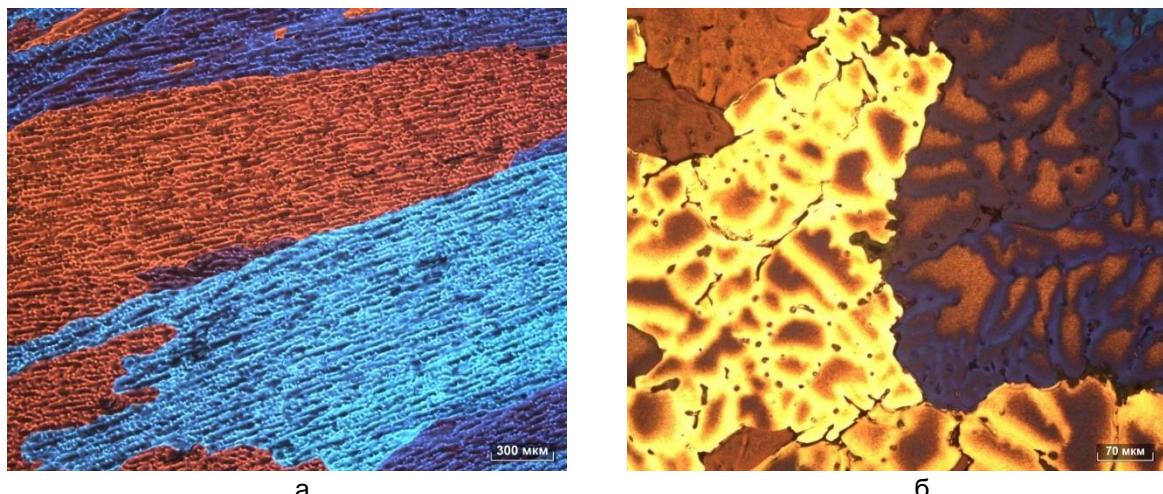


Рисунок 1 – Микроструктура вариаций сплава АЛТЭК в литом состоянии: а – № 1; б – № 2
Figure 1 – Microstructure of variations of the ALTEK alloy in the cast state: a - No. 1; b - No. 2

При двух разных скоростях кристаллизации наблюдается дендритная структура (рис. 1 а, б). Однако в случае литья в стальной кокиль она более крупная, с зернами размером до 3 мм, а медный – более мелкая, до 200 мкм. Такой размер зерна в несколько миллиметров в целом характерен для низколегированных алюминиевых сплавов при их литье в стальной кокиль [40]. В то же время повышение скорости охлаждения за счет литья в медный кокиль, как и в большинстве описанных в литературе случаях [41], способствует уменьшению размера зерна.

Согласно данным оптической микроскопии, после горячей прокатки дендритная структура становится деформированной (рис. 2, а). В процессе обработки зерна вытягиваются в направлении прокатки. Стоит заметить, что после отжига (рис. 2, б) структура не рекристаллизуется. После холодной прокатки зерно продолжает вытягиваться и деформироваться. Таким

образом, при всем процессе производства сплава АЛТЭК рекристаллизации не происходит. Эти данные соотносятся с результатами, полученными в исследованиях [17–18, 31, 34], в которых также наблюдается деформированная структура после холодной прокатки. Также стоит отметить, что в данном исследовании показано, что нерекристаллизованная текстура наблюдается и после горячей прокатки. Это говорит о том, что при нагреве до температуры горячей прокатки и непосредственно в ходе этой операции происходит выделение мелкодисперсных частиц, затрудняющих процесс рекристаллизации. Это коррелирует с данными, полученными в [21, 42–43] для сплавов Al–2Cu–1.5Mn–1Mg–1Zn, согласно которым определенное количество частиц уже формируется на данной стадии термической обработки.

Результаты сканирующей электронной микроскопии литьих образцов и химический состав частиц представлены на рисунке 3 и в таблице 3.

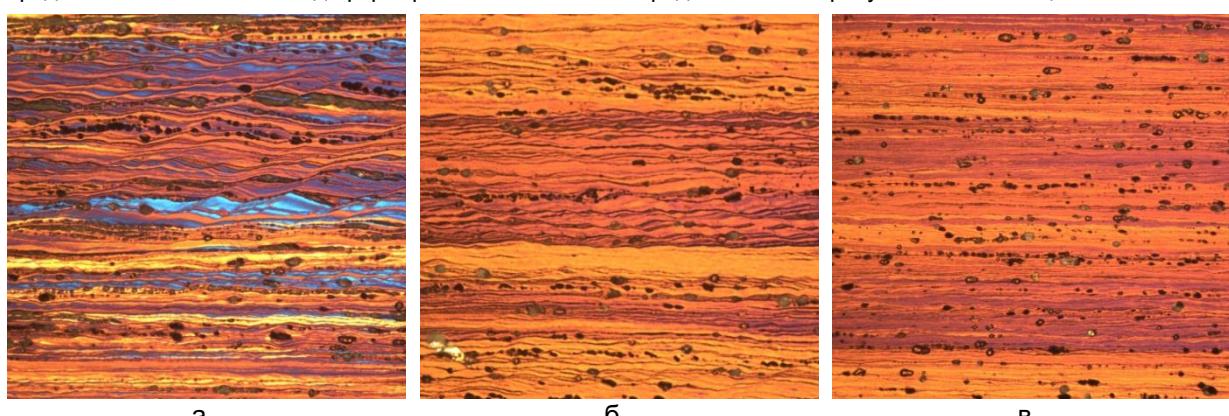


Рисунок 2 – Микроструктура сплавов АЛТЭК на этапах обработки: а – после горячей прокатки, 2 мм; б – после горячей прокатки и отжига, 2 мм; в – после холодной прокатки, 1 мм

Figure 2 – The microstructure of ALTEK alloys at the processing stages: a - after hot rolling, 2mm; b - after hot rolling and annealing, 2mm; c - after cold rolling, 1 mm

Таблица 3 – Химический состав частиц Al_2Cu , (ат.%)

Table 3 – Chemical composition of the particles Al_2Cu , (at. %)

Al, %	Cu, %	Mn, %	Fe, %	Si, %
78,84	15,91	3,64	1,25	0,32

ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА Al-2Cu-2Mn

В литом состоянии в основном присутствуют частицы, близкие по химическому составу Al_2Cu (рис. 3, таблица № 3). Присутствие марганца в частицах можно объяснить высокой концентрацией элемента в матрице. В данном случае частицы имеют различную морфологию, в том числе в виде шарообразной, каплевидной, а также в виде прожилок. Изменение скорости литья практически не влияет как на химическую композицию частиц, так на их линейные размеры. Согласно данным сканирующей микроскопии,

средний размер интерметаллидов в литом состоянии в слитке из стального кокиля – 9 мкм, в слитке из медного – 10,88 мкм. Данные частицы эвтектического происхождения образовались в результате неравновесной кристаллизации [17–18]. В целом, полученные в данном исследовании результаты коррелируются с исследованиями [17–18, 31, 34], согласно которым частицы Al_2Cu в литом состоянии также имеют шарообразную и иногда каплевидную формы размером около 3–10 мкм.

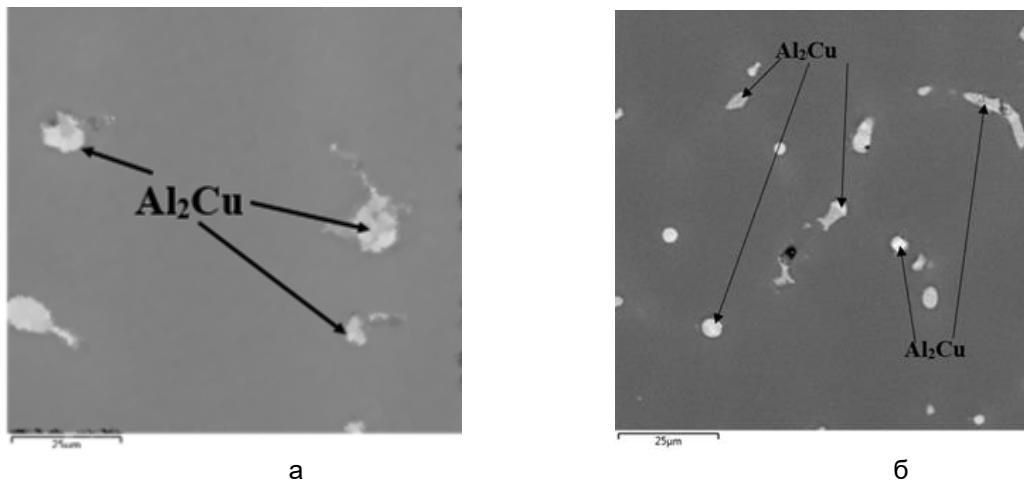


Рисунок 3 – Частицы в литом состоянии: а – стальной кокиль; б – слиток медный кокиль

Figure 3 – Particles in the cast state: a - steel coquille; b - copper coquille ingot

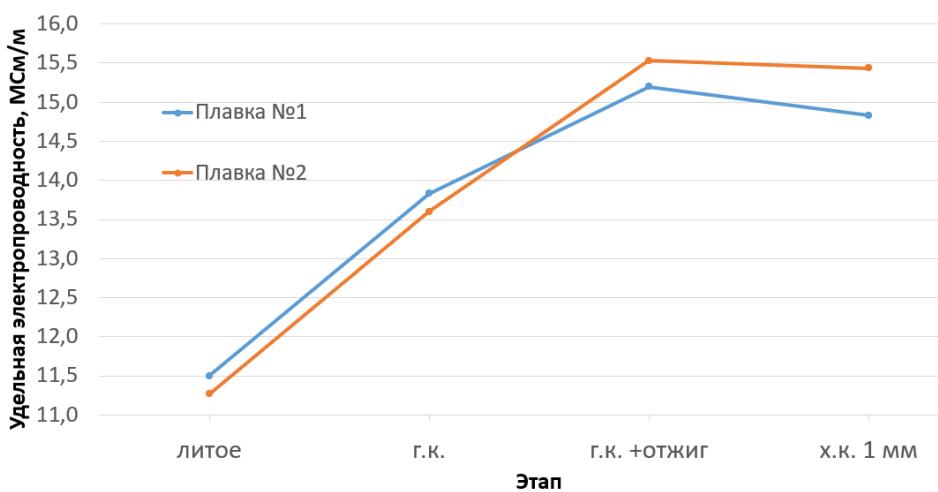


Рисунок 4 – Изменение электропроводности во время деформационной обработки

Figure 4 – Change in electrical conductivity during deformation treatment

В литом состоянии наблюдается минимальная удельная электропроводность (рисунок 4). Это объясняется тем, что большинство легирующих элементов находится в пересыщенном твердом растворе. Данные соотносятся с результатами сканирующей микроскопии: согласно наблюдается лишь небольшое количество крупных интерметаллидов типа Al_2Cu , а все остальные элементы находятся в твердом растворе. Полученные значения близки к тем, что имеют сплавы Al-2% Cu-2 wt.% Mn с небольшими добавками Fe и Si. В ходе горячей прокатки удельная электропроводность повышается до

13,6 и 13,8 МСм/м для № 1 и № 2 соответственно. После промежуточного отжига удельная электропроводность вновь возрастает и достигает 15,5 МСм/м 15,2 МСм/м для № 1 и № 2 соответственно. Повышение электропроводности вместе с отсутствием рекристаллизации при горячей прокатке говорит начале о распаде пересыщенного твердого раствора и появления мелкодисперсных частиц. Для сплавов системы АЛТЭК характерно увеличение электропроводности после проведения термической обработки выше 300 °C [31]. В то же время говорить о полном распаде пересыщенного твердо-

го раствора в данном случае нельзя, т. к., на завершающем этапе процесса данного процесса удельная электропроводность может повышаться и до 29 МСм/м [31]. Основным типом формирующихся частиц являются мелкодисперстные $Al_{20}Cu_2Mn_3$ [17–18, 31, 34]. При холодной деформации удельная электропроводность незначительно снижается, что может быть объяснено влиянием деформационной обработки, увеличивающей плотность дислокаций [37–38].

Согласно рисунку 5, на котором представлена зависимость электропроводности от режима отжига, разная скорость охлаждения незначительно влияет на удельную электропроводность.

При отжиге до 300 °C продолжается распад пересыщенного твердого раствора, сопровождающийся повышением электропроводности (рис. 5). При температуре отжига 400 °C распад активизируется, что можно объяснить выделение вторичных наноразмерных частиц $Al_{20}Cu_2Mn_3$ [17–18, 31].

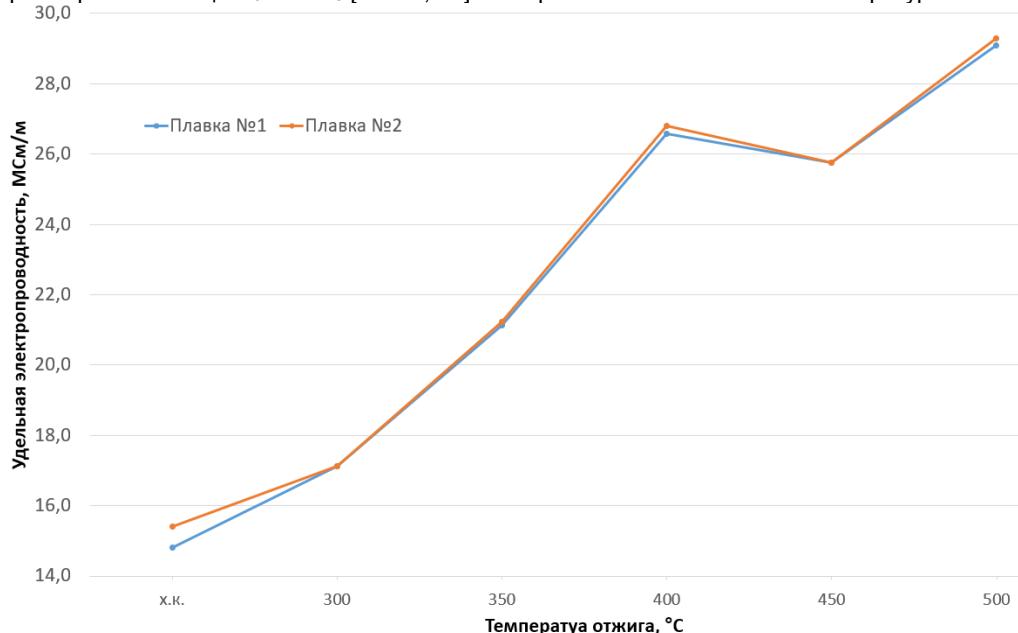


Рисунок 5 – Изменение электропроводности в зависимости от температур отжига

Figure 5 – Change in electrical conductivity depending on annealing temperatures

Согласно графикам, разная скорость охлаждения также незначительно повлияла на изменение механических свойств. Отжиги с температурой 400 °C лишь незначительно снижают предел прочности. Это означает, что процессы рекристаллизации и возврата блокируются мелкодисперстными частицами. Это еще раз подтверждает, что в процессе горячей прокатки выделяется достаточно частиц $Al_{20}Cu_2Mn_3$ для блокирования процессов рекристаллизации и возврата. При отжиге при температуре 450 °C начинают проходить процессы возврата, что и обуславливает снижение прочностных свойств изделия.

Условный предел текучести имеет практически идентичную зависимость: значения незначительно снижаются при температурах отжига 300–400 °C и более резко при температуре 450 °C. Далее предел текучести повышается до 210 МПа для плавки

При 450 °C наблюдается некоторое уменьшение электропроводности, что может быть связано с растворением частиц Al_2Cu . Частицы начинают расти при температуре отжига 500 °C, после которого увеличение электропроводности и механических свойств наблюдаться не будет. При отжиге 500 °C происходит максимальное повышение электропроводности, что может быть связано с продолжением распада пересыщенного твердого раствора и формированием выпадением частиц $Al_{20}Cu_2Mn_3$. На данном этапе удельная электропроводность и составляет 29,3 МСм/м и 29,2 МСм/м для № 2 и № 1 соответственно.

Структура остается деформированной с зернами, вытянутыми в направлении прокатки, если температура меньше, чем 500 °C (рис. 6). При достижении данной температуры происходит процесс рекристаллизации с образованием нового зерна.

Рассмотрим изменение механических характеристик в зависимости от температуры отжига (рис. 7).



№ 2 и до 200 МПа для № 1 соответственно. Стоит отметить, что некоторое повышение прочностных свойств при отжиге с температурами 500 °C может быть связано с двумя факторами. Необходимо отметить, что рост механических свойств при отжиге 500 °C может объясняться растворением крупных интерметаллидов типа Al_2Cu , способствующих твердо растворному упрочнению. Еще одной причиной роста прочностных свойств может быть процесс измельчения зерна, связанный с рекристаллизацией.

Относительное удлинение, в отличие от прочностных свойств, растет при повышении отжига (рис. 7, в).

В целом, характер изменения механических свойств, полученных в данной работе, коррелирует с характером изменения микротвердости, представленных в работах [17–18, 22, 31–32].

ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА Al-2Cu-2Mn

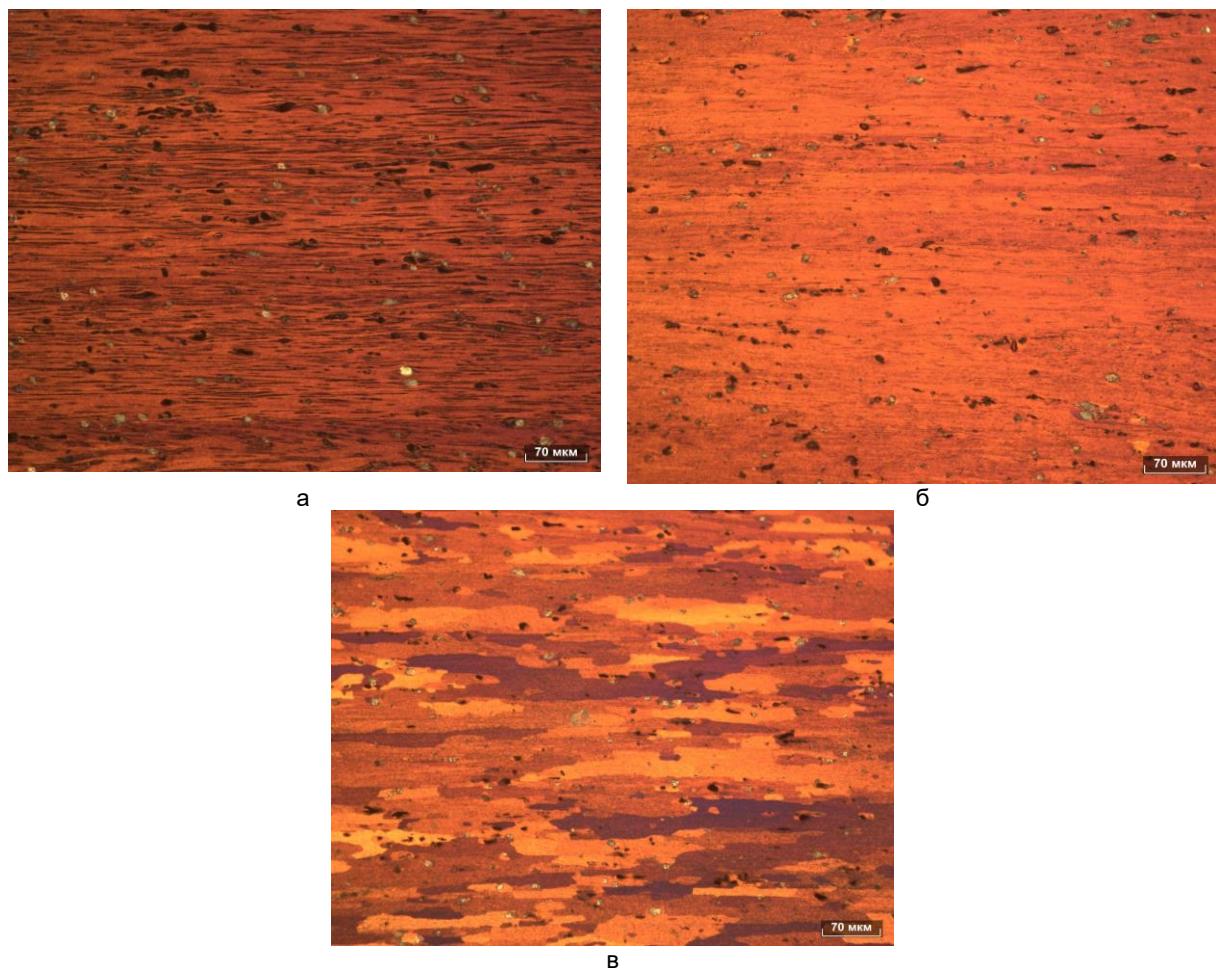


Рисунок 6 – Микроструктура плавки № 1: а – отжиг 300 °C, 3 часа; б – отжиг 450 °C, 3 часа; в – отжиг 500 °C, 3 часа

Figure 6 – Microstructure floatplates No. 1: a - annealing 300 °C, 3 hours; b-annealing 450 °C, 3 hours; c-annealing 500 °C, 3 hours

ОБСУЖДЕНИЕ

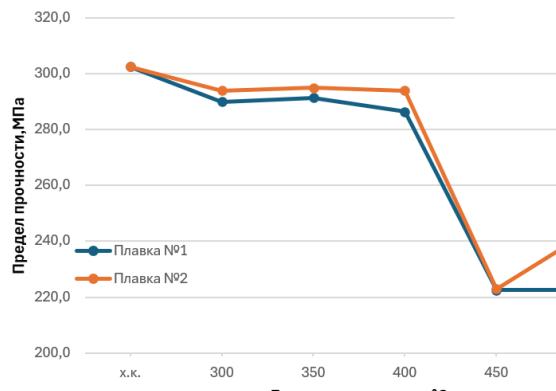
Основное отличие данной работы от других исследований [17–18, 22, 31–32], посвященных формированию микроструктуры и механических свойств в сплавах системы АЛТЭК, заключается в наличии операции горячей прокатки. Как видно из анализа механических свойств, электропроводности и данных оптической микроскопии, горячая прокатка позволяет в достаточном количестве получить термостойкие частицы для сохранения прочности при отжиге до 400 °C. Добавление горячей прокатки позволило получить более высокий уровень механических свойств, чем в работе [17]. В ней были исследованы механические свойства сплавов АЛТЭК (Al-2Cu-1,75%Mn (2Cu) и 3%Cu-2%Mn 1,73% (3Cu)), полученных с помощью холодной прокатки из слитков листов с толщиной 0,5 мм. Предел прочности для сплавов 2Cu и 3Cu соответственно равен 277 МПа и 274 МПа при температуре отжига 400 °C продолжительностью 3 часа. Однако в настоящем исследовании после данной температурной обработки наблюдается более высокой предел прочности, равный 294 МПа. Стоит отметить, что для листов из сплава АЛТЭК, при получении которых применяется только холод-

ная прокатка, наблюдается тенденция снижения прочности после отжига температурой 200 °C и выше. Например, в исследованиях [17, 32] изучались сплавы с химическим составом, близкими к рассматриваемому в данной работе. При отжиге в диапазоне температур 300–400 °C сплав Al-Cu-Mn-Zr продемонстрировал уменьшение твердости примерно на 5,6 %, а сплав Al-Cu-Mn показывал снижение твердости около 4,3 %. В тоже время рассматриваемые в данной работе плавки № 1 и № 2 показали уменьшение прочностных свойств на 1,2 % и 0 % соответственно. Составы с 1,5 % содержанием Cu и Mn 1,5 % п [17, 31–32], деформированные только холодной прокаткой, также имеют тенденцию к снижению твердости после 200 °C.

Как говорилось выше, в трансформаторах применяется отечественная фольга технической чистоты А5Е, А7Е, а также зарубежная фольга 1050, 1060, 1070, 1350. Сплавы АЛТЭК обладают меньшей удельной электропроводностью по сравнению с применяемыми сплавами, чья удельная электропроводность составляет не менее 35–36 МСм/м, в то время как для данного сплава АЛТЭК в отожженном состоянии – 29,3 МСм/м. Однако сплавы АЛТЭК обладают большей прочностью,

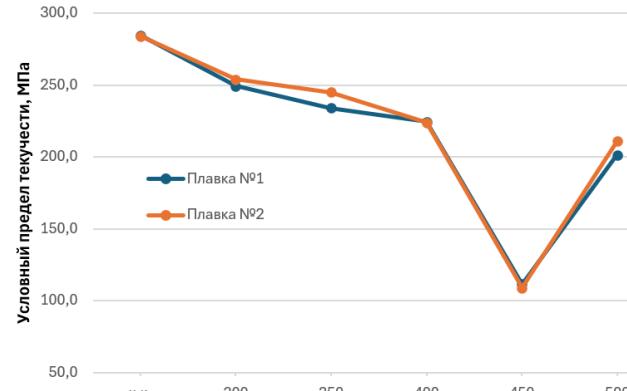
что может увеличить надежность и сроки применения электротехники.

Предел прочности отечественных сплавов

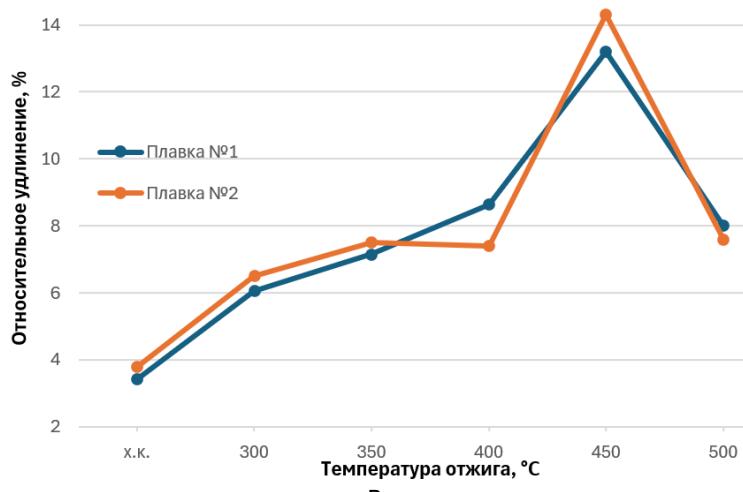


а

составляет 40–60 МПа, зарубежных – 60–95 МПа, в то время как сплавов АЛТЭК при той же толщине – 294 МПа.



б



в

Рисунок 7 – Изменение механических свойств прокатанных листов толщиной 1 мм в зависимости от температуры отжига: а – предел прочности, б – условный предел текучести, в – относительное удлинение

Figure 7 – Changes in the mechanical properties of rolled sheets with a thickness of 1 mm depending on the annealing temperature: а 0 tensile strength, б 0 conditional yield strength, в 0 elongation

ВЫВОДЫ

1. После термодеформационной обработки исследуемый сплав Al-2Cu-2Mn демонстрирует высокие прочностные показатели. Предел прочности сплава в холоднокатаном состоянии для второй плавки составил 303 МПа и незначительно снизился после отжига 300°C до 294 МПа. Значения предела прочности не снижались при режимах отжига 350 °C, 400 °C 3 часа, что указывает на термостабильность состава. Кроме того после отжига исследуемые в данной работе сплав имеет достаточно высокие показатели электропроводности, достигающие 29,3 МСм/м. Сравнение прочностных свойств, применяемых в трансформаторах иностранных сплавов (отожжённые 1050, 1060, 1070, 1350, имеющие предел прочности 60–95 МПа при толщине 0,2 мм) показывает что предел прочности исследуемого в данной работе сплава превышает из значения в 3 раз.

2. Горячая прокатка сплавов АЛТЭК способ-

ствует большей термостабильности составов и росту механических свойств при отжигах до 400 °C. Плавки сплава № 1 и № 2 показали уменьшение прочностных свойств на 1,2 % и 0 % соответственно, что меньше, чем у холоднокатанных (без предшествующей горячей прокатки – около 4,3 %) сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Shulginov, N. "The Russian fuel and energy complex in 2023 continued to reliably provide consumers" Ministry of Energy of the Russian Federation (2024). Retrieved from [https://minenergo.gov.ru/press-center/news-and-events?news-item=nikolay-shulginov-rossiyskiy-tek-v-2023-godu-prodolzhil-nadyezhno-obespechivat-potrebiteley. \(In Russ.\).](https://minenergo.gov.ru/press-center/news-and-events?news-item=nikolay-shulginov-rossiyskiy-tek-v-2023-godu-prodolzhil-nadyezhno-obespechivat-potrebiteley. (In Russ.).)

2. Shulginov, N. "Growth of electricity consumption in the autumn-spring period" Ministry of Energy of the Russian Federation. (2024). Retrieved from [https://minenergo.gov.ru/press-center/news-and-events?news-item=nikolay-shulginov-rossiyskiy-tek-v-2023-godu-prodolzhil-nadyezhno-obespechivat-potrebiteley. \(In Russ.\).](https://minenergo.gov.ru/press-center/news-and-events?news-item=nikolay-shulginov-rossiyskiy-tek-v-2023-godu-prodolzhil-nadyezhno-obespechivat-potrebiteley. (In Russ.).)

ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА AI-2Cu-2Mn

- center/news-and-events?news-item=nikolay-shulginov-v-proshedshem-osenne-zimnem-sezone-elektropotreblenie-vyroslo-na-3-5- (In Russ.).
3. Kislysyn, A.L. (2001). Transformers: a textbook on the course "electromechanics". (In Russ.).
4. 8. Conductive conductors for cables, wires and cords. (2021). (HOST 22483-2021).
5. Non-insulated wires for overhead power lines. (2019). (HOST 839-2019).
6. . Wires for overhead power lines twisted from profiled wires with concentric coils. (2014). (HOST 62219-2014).
7. Mustyats, A.V., Serokhvostov, A.A., Myakushko, R.V. & Ovchelupova, A.V. (2023). Methods of reducing the accident rate of overhead power lines by eliminating icy-frost deposits. *Energynet*, (1-2(1)), 43. (In Russ.). DOI: 10.57112/E231-957.
8. Tsarev, I.B. (2024). Galloping wires of overhead power lines and the fight against it. Scientific aspect - Electrical Engineering, (5), 3123. (In Russ.).
9. Fursanov, M.I., Farino, A.A. & Gorudko, P.S. (2017). Icy accidents at power lines are the causes and ways to prevent them. Energy and management, (2), 25-29. (In Russ.).
10. Tikhomirov, P.M. (1986). Calculation of transformers: Textbook for universities. (In Russ.).
11. Nemontov, V.A. (2021). Electrical engineering materials in mechatronics: a textbook. (In Russ.).
12. Loparev, V.V. (2022). Aluminum and its alloys for the domestic cable industry. Cables and wires, (6), 12-25. (In Russ.). DOI: 10.52350/2072215X_2022_6_12.
13. Filina, A.V. & Morozov, I.S. (2019). On the influence of the properties of electrical materials on the efficiency of electrical devices. In prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. 281-284. (In Russ.).
14. Filina, A.V. & Nosovets, A.A. (2019). Electrical materials as a means of improving the efficiency of electrical equipment. In Modern Tool Systems, Information technology and Innovation. 205-208. (In Russ.).
15. Antipov, V.V., Senatorova, O.G., Tkachenko, E.A. & Vakhromov, R.O. (2012). Aluminum deformable alloys. *Aviation Materials and Technologies*, (5), 167-182. (In Russ.).
16. Kaufman, J.G. (2000). Introduction to aluminum alloys and tempers. ASM international.
17. Belov, N.A., Korotkova, N.O., Shurkin, P.K. & Aksenov, A.A. (2020). Substantiation of copper concentration in heat-resistant deformable aluminum alloys containing 2 wt% Mn. *Physics of Metals and Metallography*, (121(12)), 1315-1323. (In Russ.).
18. Korotkova, N.O., Shurkin, P.K., Cherkasov, S.O., Aksenov, A.A. & Finogeev, A.S. (2022). Influence of copper concentration and annealing temperature on the structure and mechanical properties of ingots and cold-rolled sheets of al-2% mn alloy. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*, (28(1)), 67-78. (In Russ.). DOI: 10.17073/0021-3438-2022-1-67-78.
19. Belov, N.A., Korotkova, N.O., Akopyan, T.K. & Pesin, A.M. (2019). Phase composition and mechanical properties of Al-1.5% Cu-1.5% Mn-0.35% Zr (Fe, Si) wire alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, (782), 735-746. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.240.
20. Petrova, A.N., Rasposienko, D.Y., Astafyev, V.V. & Yakovleva, A.O. (2023). Structure and strength of Al-Mn-Cu-Zr-Cr-Fe ALTEC alloy after radial-shear rolling. *Letters on Materials*, (13(2)), 177-182. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-2-177-182.
21. Belov, N., Akopyan, T., Tsydenov, K., Cherkasov, S. & Avxentieva, N. (2023). Effect of Fe-Bearing Phases on the Mechanical Properties and Fracture Mechanism of Al-2wt.% Cu-1.5 wt.% Mn (Mg, Zn) Non-Heat Treatable Sheet Alloy. *Metals*, (13(11)), 1911. DOI: 10.3390/met13111911.
22. Belov, N., Korotkova, N., Akopyan, T. & Tsydenov, K. (2019). Simultaneous increase of electrical conductivity and hardness of Al-1.5 wt.% Mn alloy by addition of 1.5 wt.% Cu and 0.5 wt.% Zr. *Metals*, (9(12)), 1246. DOI: 10.3390/met9121246.
23. Belov, N.A. (2011). Economically alloyed heat-resistant aluminum alloys: principles of optimization of phase composition. *Aviation materials and technologies*, (2 (19)), 6-11. (In Russ.).
24. Chirkov, E.F. (2002). On the nature of the effects of Cu and Mg on the evolution of the structure and heat resistance of aluminum alloys of the Al-Cu-Mg system. *Technology of light alloys*, (4), 64-68. (In Russ.).
25. Glukhikh, Ya.M. (2023). The effect of annealing on the mechanical properties of sheets and welded joints of the alloy Al-2% Cu-2% Mn-2% Mg. SMIs-2023. Quality Management Technology=SMaC 2023. Quality management technology: materials of the International, 242. (In Russ.).
26. Zupanič, F. & Bončina, T. (2022). Heat-Resistant Al-Alloys with Quasicrystalline and L12-Precipitates. *Solid State Phenomena*, (327), 26-32. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ SSP.327.26.
27. Toleuova, A., Balbekova, B. & Erakhtina, I. (2019, March). Optimization of the Composition and Structure of Deformable Heat Resistant Aluminum Alloy. In Materials Science Forum (Vol. 946, pp. 156-161). *Trans Tech Publications Ltd.* DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.156.
28. Dar, S.M. & Liao, H. (2019). Creep behavior of heat resistant Al-Cu-Mn alloys strengthened by fine (θ') and coarse ($Al_{20}Cu_2Mn_3$) second phase particles. *Materials Science and Engineering: A*, (763), 138062. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138062.
29. Belov, N., Cherkasov, S., Korotkova, N. & Tsydenov, K. Manufacturability and structure evolution of cylindrical ingots of al-2% cu-2% mn alloy during pressure treatment. *Non-ferrous metals*, (1), 77-82. (In Russ.). DOI: 10.17580/ tsm.2023.01.10.
30. Korotkova, N.O., Shurkin, P.K., Cherkasov, S.O., Aksenov, A.A. & Finogeev, A.S. (2022). Influence of copper concentration and annealing temperature on the structure and mechanical properties of ingots and cold-rolled sheets of al-2% mn alloy. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*, 28(1), 67-78. (In Russ.). DOI: 10.17073/0021-3438-2022-1-67-78.
31. 35. Belov, N.A., Korotkova, N.O., Cherkasov, S.O. & Aksenov, A.A. (2020). Electrical conductivity and hardness of Al-1.5% Mn and Al-1.5% Mn-1.5% Cu (wt.%) cold-rolled sheets: comparative analysis. *Tsvetnye Metally*, (4), 70-76. (In Russ.). DOI:

- 10.17580/tsm.2020.04.0.
- 32.Belov, N.A. & Alabin, A.N. (2013, September). Energy efficient technology for Al-Cu-Mn-Zr sheet alloys. In Materials Science Forum (Vol. 765, pp. 13-17). Trans Tech Publications Ltd. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ MSF.765.13.
33. Tsydenov, K., Belov, N. (2023). Investigation of the effect of magnesium and zinc on the structure and mechanical properties of al-2% cu-1.5% mn alloy sheets. Llc "Zanevskaya site", a company for the production of modern high-entropy materials, 153-154.
- 34.Belov, N.A. (2022). Substantiation of the composition and structure of deformable alloys based on the Al-Cu-Mn (Zr) system, which do not require homogenization and quenching. In Mashtech 2022. Innovative technologies, equipment and material blanks in mechanical engineering, 10-13. (In Russ.).
- 35.Naizabekov, A.B., Lezhnev, S.N., Ainabekova, S.S., Koinov, T.A. & Yordanova, R.M. (2019). Technology of processing non-ferrous metals and alloys.
- 36.Mallesham, P. & Babu, V.R. (2016). Cold rolling mill for aluminium sheet. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 3(2), 257728.
- 37.Hirsch, J. (2011). Aluminium sheet fabrication and processing. In fundamentals of aluminium metallurgy (pp. 719-746). Woodhead Publishing. DOI: 10.1533/9780857090256.3.719.
- 38.Hirsch, Yu., Grechnikova, A.F., Aryshensky, E.V. & Drits, A.M. (2018). Features of the evolution of microstructure and crystallographic texture in the manufacture of aluminum tapes for the production of food containers. Part 2. *Non-ferrous metals*, (11), 62-69. (In Russ.). DOI: 10.17580/ tsm.2018.11.09.
- 39.Aryshenskii, E., Lapshov, M., Konovalov, S., Hirsch, J., Aryshenskii, V. & Sbitneva, S. (2021). The casting rate impact on the microstructure in Al-Mg-Si alloy with silicon excess and small Zr, Sc additives. *Metals*, 11(12), 2056. DOI: 10.3390/met11122056.
- 40.Aryshenskii, E., Lapshov, M., Hirsch, J., Konovalov, S., Bazhenov, V., Drits, A. & Zaitsev, D. (2021). Influence of the small Sc and Zr additions on the as-cast microstructure of Al-Mg-Si alloys with excess silicon. *Metals*, 11(11), 1797. DOI: 10.3390/met11111797.
- 41.Aryshenskii, E., Lapshov, M., Konovalov, S., Hirsch, J., Aryshenskii, V. & Sbitneva, S. (2021). The casting rate impact on the microstructure in Al-Mg-Si alloy with silicon excess and small Zr, Sc additives. *Metals*, 11(12), 2056. DOI: 10.3390/met11122056.
- 42.Belov, N., Akopyan, T., Tsydenov, K., Cherkasov, S. & Avxentieva, N. (2023). Effect of Fe-
Bearing Phases on the Mechanical Properties and Fracture Mechanism of Al-2wt.% Cu-1.5 wt.% Mn (Mg, Zn) Non-Heat Treatable Sheet Alloy. *Metals*, 13(11), 1911. DOI: 10.3390/met13111911.
- 43.Belov, N., Akopyan, T., Tsydenov, K., Letyagin, N. & Fortuna, A. (2023). Structure evolution and mechanical properties of sheet Al-2Cu-1.5 Mn-1Mg-1Zn (wt.%) alloy designed for $Al_{20}Cu_2Mn_3$ dispersoids. *Metals*, 13(8), 1442. DOI: 10.3390/met13081442.

Информация об авторах

А. А. Левагина – младший научный сотрудник Управления научных исследований СибГИУ.

Е. В. Арышенский – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Управления научных исследований СибГИУ.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Управления научных исследований, профессор по научной и инновационной деятельности СибГИУ.

А. М. Дриц – кандидат технических наук, директор по развитию бизнеса и новых технологий АО “СМЗ”.

М. С. Тептерев - кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОНИЛ № 4 Самарского университета.

Information about the authors

A.A. Levagina - Junior Researcher of the SibGIU Research Department.

E.V. Aryshensky - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of the SibGIU Research Department.

S.V. Konovalov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Research Department, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities of SibGIU.

A.M. Drits - Candidate of Technical Sciences, Director of Business Development and New Technologies of JSC “SMZ”.

M.S. Tepterev - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at ONIL No. 4 of Samara University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК 621.785.539

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.024

EDN: HSLCXM

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА, МАРГАНЦА И КРЕМНИЯ В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ НА ПАРАМЕТРЫ ДИФФУЗИИ ПРИ БОРИРОВАНИИ

Сергей Геннадьевич Иванов¹, Михаил Алексеевич Гурьев²,
Сергей Анатольевич Земляков³, Михаил Николаевич Зенин⁴,
Алексей Михайлович Гурьев⁵

¹ Инновационный центр современных текстильных технологий (Лаборатория Цзяньху) (Шаосин, КНР),

¹ Ключевая лаборатория цифрового текстильного оборудования в провинции Хубэй, Уханьский текстильный университет (Ухань, КНР)

^{1, 2, 4, 5} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

² Zhejiang Briliant Refrigeration Equipment Co., Ltd (Синчан, КНР).

^{3, 5} Уханьский текстильный университет (Ухань, КНР)

¹ i@ivanovserg.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

² gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

³ kobalt_20@mail.ru,

⁴ mikhail.zenin.96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3772-0987>

⁵ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

Аннотация. В работе приведены систематизированные статистические данные о влиянии содержания углерода и основных легирующих элементов (кремний и марганец) на параметры диффузии и толщину боридного слоя для большинства используемых в промышленности марок углеродистых сталей, начиная с малоуглеродистой стали 15 и заканчивая заэвтектоидными инструментальными сталью до У10 включительно. Насыщение поверхности сталей бором проведено при температурах 850, 950 и 1050 °С в ранее разработанной и запатентованной оригинальной насыщающей среде. Показано, что повышение содержания углерода в реальных сталях приводит к снижению энергии активации диффузии бора. Согласно проведенному исследованию, снижение энергии активации носит не монотонный характер и зависит прежде всего от содержания углерода, максимальная скорость снижения энергии активации диффузии бора наблюдается в интервале концентраций углерода от 0,45 до 0,60 масс. %. Сравнение полученных данных с данными других исследователей показало высокую сходимость полученных значений энергии активации. Определенный в этой работе «коридор» возможных значений, которые может принимать функция энергии активации на различных марках углеродистой стали в зависимости от содержания углерода, кремния и марганца, имеет перспективы использования в практической работе с целью прогнозирования толщины диффузионного боридного слоя. Это позволит прогнозировать эксплуатационные характеристики борированных деталей, а также подбирать материал детали и оптимизировать процесс борирования с целью получения оптимального соотношения «цена–качество» применительно к готовым упрочненным деталям.

Ключевые слова: сталь, борирование, энергия активации, диффузия, углерод, бор, коэффициент диффузии, химико-термическая обработка.

Для цитирования: Оценка влияния содержания углерода, марганца и кремния в углеродистых сталях на параметры диффузии при борировании / С. Г. Иванов [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 197–202. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.024. EDN: <https://elibrary.ru/HSLCXM>.

Original article

EFFECT OF THE CARBON, MANGANESE AND SILICON CONTENT IN CARBON STEELS ON THE DIFFUSION PARAMETERS OF THE DIFFUSION BORONIZING LAYER

Sergey G. Ivanov¹, Mikhail A. Guriev², Sergey A. Zemljakov³,
Mikhail N. Zenin⁴, Aleksey M. Guriev⁵

¹ Innovative Center of Modern Textile Technologies (Jianhu Laboratory), Shaosing, China

¹ Key Laboratory of Digital Textile Equipment in Hubei Province, Wuhan Textile University (Wuhan, China)

© Иванов С. Г., Гурьев М. А., Земляков С. А., Зенин М. Н., Гурьев А. М., 2025

^{1, 2, 4, 5} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

^{3, 5} Wuhan Textile University (Wuhan, China)

¹ i@ivanovserg.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

² gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

³ kobalt_20@mail.ru, Wuhan Textile University, Wuhan, China

⁴ mikhail.zenin.96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3772-0987>

⁵ gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

Abstract. The paper presents systematic statistical data on the effect of the content of carbon and the main alloying elements (silicon and manganese) on the diffusion parameters and the thickness of the boride layer for most grades of carbon steels used in industry, starting with low-carbon steel 15 and ending with hypereutectoid tool steels up to including U10. The saturation of the steel surface with boron was carried out at temperatures of 850, 950 and 1050 °C in a previously developed and patented original saturating medium. It is shown that an increase in the carbon content in real steels leads to a decrease in the activation energy of boron diffusion. According to the study, the decrease in the activation energy is not monotonous and depends primarily on the carbon content, the maximum rate of decrease in the activation energy of boron diffusion is observed in the range of carbon concentrations from 0.45 to 0.60 wt. %. A comparison of the obtained data with the data of other researchers showed a high convergence of the obtained activation energy values. The range of values defined in this work, which the activation energy function can take for various grades of carbon steel, depending on the content of carbon, silicon and manganese, has prospects for use in practical work to predict the thickness of the diffusion boride layer. This will make it possible to predict the performance characteristics of borated parts, as well as to select the material of the part and optimize the boronizing process in order to obtain an optimal price-quality ratio in relation to finished hardened parts.

Keywords: steel, boronizing, activation energy, diffusion, carbon, boron, carbon steel.

For citation: Ivanov, S. G., Guriev, M. A., Zemljakov, S. A., Zenin, M. N. & Guriev, A. M. (2025). Effect of the carbon, manganese and silicon content in carbon steels on the diffusion parameters of the diffusion boronizing layer. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 197-202. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.024. EDN: <https://elibrary.ru/HSLCXM>.

ВВЕДЕНИЕ

При работе большая часть инструмента, рабочих органов и деталей машин в процессе эксплуатации подвергается воздействию различных факторов износа, которые сопряжены с трением, термической и химической коррозией. Воздействие этих факторов приводит к деградации поверхности и геометрических параметров изделий в результате износа, окисления, трещинообразования и деформации, наблюдается выход из строя как детали, так и механизма в целом. Для повышения эксплуатационных характеристик материалов и защиты металлических поверхностей от воздействия факторов износа широко используются покрытия. При этом продолжжающийся поиск новых и оптимизация уже известных способов повышения эксплуатационных свойств инструмента, рабочих органов и деталей машин с целью продления срока их службы представляют собой одну из важных задач [1–3].

Для улучшения производительности и продления срока службы широко применяются методы объемного и поверхностного упрочнения: объемная и поверхностная закалка (в том числе на вторичную твердость), нанесение покрытий методами термического, лазерного и плазменного напыления и т.д. Вышеуказанные методы поверхностной обработки могут повысить твердость и устойчивость к износу инструмента, рабочих органов и деталей машин, однако все они имеют некоторые ограничения, включая плохое сцепление покрытия с основой, сложность управления параметрами процесса и часто – невозможность поверхностного упрочнения сложно-профильных деталей (в том числе внутренних полостей в таких деталях) в целом. Химико-термическая обработка поверхности является альтернативой методам поверхностного упрочнения напылением и наплавкой [3–6]. Повышение характеристик поверхности за счет образования различных соединений

(оксидов, карбидов, боридов, нитридов, интерметаллидов и т.д.) в результате поверхностного диффузионного насыщения кислородом, углеродом, бором, азотом и другими элементами широко применяется в промышленности. Одним из перспективных методов поверхностного упрочнения является диффузионное борирование. Однако на настоящий момент в литературе имеются разрозненные данные о применении борирования к некоторым конкретным сталям [7–9]. Ведутся попытки систематизировать накопленные данные и вывести определенные зависимости влияния химического состава насыщаемой стали на механические и эксплуатационные свойства боридных покрытий на них. При использовании таких данных можно с определенной степенью точности прогнозировать результат, получаемый на различных сталях.

МЕТОДЫ

В настоящей работе предложена систематизация данных о влиянии содержания углерода в стали на параметры диффузии и толщину боридного слоя для большинства используемых в промышленности углеродистых сталей (таблица 1), начиная с углеродистой стали 15 и заканчивая заэвтектоидными инструментальными сталями вплоть до У10 включительно. Все использованные в работе образцы сталей были подобраны таким образом, чтобы они имели сопоставимый химический состав по другим легирующим элементам (кремний, марганец, сера, фосфор, хром, никель, медь и т.д.).

Подбор соответствующих плавок сталей стал возможен благодаря более чем десятилетнему сотрудничеству с предприятиями на базе Центра коллективного пользования и Инжинирингового Центра «ХимБиоМаш» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (АлтГТУ), в результате которого удалось найти и отобрать соответствующие образцы промышленно произведенных

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2025

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА, МАРГАНЦА И КРЕМНИЯ В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ НА ПАРАМЕТРЫ ДИФФУЗИИ ПРИ БОРИРОВАНИИ

сталей с требуемым химическим составом.

Насыщение поверхности сталей бором проводили в камерной печи типа СНОЛ, оснащенной ПИД-регулятором «Термодат 16Е3», при температурах 850, 950 и 1050 °С разработанным и запатентованным составом [10], выдержку при данных температурах осуществляли в течение 2 ч. После окончания выдержки контейнеры с упакованными

образцами извлекали из печи и охлаждали на спокойном воздухе до комнатной температуры, после чего осуществляли выбивку образцов. Использовали образцы КСУ тип 1 по ГОСТ 9454-78. Количество одинаковых образцов для каждой экспериментальной точки – 3 шт. После извлечения из контейнера образцы промывали в теплом мыльном растворе и высушивали в этиловом спирте.

Таблица 1 – Химический состав сталей / Table 1 – Chemical composition of Steels

Образец	Марка стали	Содержание основных легирующих элементов, масс. %					
		Содержание по ГОСТ*			Реальный хим. состав**		
		C	Si	Mn	C	Si	Mn
1	Сталь 15	0,155±0,035	0,270±0,100	0,500±0,150	0,155±0,028	0,253±0,081	0,484±0,130
2	Сталь 20	0,205±0,035	0,270±0,100	0,500±0,150	0,207±0,031	0,266±0,089	0,493±0,135
3	Сталь 35	0,360±0,040	0,270±0,100	0,650±0,150	0,358±0,035	0,268±0,090	0,495±0,134
4	Сталь 45	0,460±0,040	0,270±0,100	0,650±0,150	0,460±0,027	0,260±0,082	0,643±0,126
5	Сталь 50	0,510±0,040	0,270±0,100	0,650±0,150	0,511±0,023	0,259±0,082	0,641±0,087
6	Сталь 60	0,610±0,040	0,270±0,100	0,650±0,150	0,607±0,025	0,261±0,086	0,649±0,095
7	У7А	0,695±0,045	0,250±0,080	0,225±0,055	0,699±0,023	0,260±0,052	0,225±0,049
8	У8А	0,795±0,045	0,250±0,080	0,225±0,055	0,795±0,032	0,246±0,069	0,221±0,043
9	У9А	0,895±0,045	0,250±0,080	0,225±0,055	0,900±0,028	0,245±0,067	0,218±0,044
10	У10А	1,020±0,070	0,250±0,080	0,225±0,055	1,021±0,063	0,250±0,071	0,225±0,044

*содержание остальных примесей оценивалось по фактическим данным, полученным методами оптико-эмиссионной спектрометрии:

содержание Cr, Ni и Cu в большинстве исследованных сталей находилось в пределах соответственно 0,083±0,033; 0,118±0,022 и 0,067±0,034 масс. %;

содержание S и P во всех исследованных сталях находилось в пределах соответственно 0,0114±0,0067 и 0,0128±0,0013 масс. %

**Реальный хим. состав – результат статистической обработки состава реальных сталей, определенного на оптико-эмиссионном спектрометре «G.N.R. Solaris CCD Plus». Стали для анализа предоставлялись предприятиями Алтайского края в рамках проведения НИОКР на базе ЦКП АлтГТУ и ИЦ «ХимБиоМаш» АлтГТУ в период с 2015 по 2024 гг.

Размер статистической выборки по разным маркам сталей, накопленный в период времени с января 2015 г. по сентябрь 2024 г., перечисленный в таблице 1, составлял:

- для сталей – Сталь 15, Сталь 20 (Образец 1 и Образец 2 соответственно), по 650 уникальных образцов (плавок) по каждой марке стали;
- для сталей – Сталь 35, Сталь 45, Сталь 50 и Сталь 60 (Образцы с 3 по 6 соответственно), по 820 уникальных образцов (плавок) по каждой марке стали;
- сталей У7А, У8А, У9А, У10А (образцы с 7 по 10 соответственно), не менее 120 уникальных образцов (плавок) по каждой марке стали.

Диффузионные процессы могут быть ускорены путем использования различных приемов, основным из которых является повышение температуры процесса диффузионного насыщения. Однако чем выше температура процесса диффузионного насыщения, тем сильнее проявляются такие негативные эффекты, как рост зерна и вероятность формирования неблагоприятной макро- и микроструктуры, что, в свою очередь, приводит к увеличению коробления изделия, а также снижению эксплуатационных характеристик упрочняемых изделий за счет снижения, прежде всего, таких важных характеристик, как усталостная прочность, пластичность и ударная вязкость. Вторым способом повышения скорости диффузии можно считать подбор состава упрочняемой стали и взаимосвязанная с составом стали оптимизация химического состава насыщающей среды за счет добавок в борирующую смесь небольших количеств соединений элементов, которые способ-

ствуют образованию большего количества активных атомов бора, например соединения церия и других редкоземельных металлов, либо за счет высокой растворимости в насыщаемом материале (как, например, хром в железе) способны формировать большее количество дефектов кристаллической решетки. Оба приведенных выше способа ускоряют диффузию, в том числе и бора, увеличивая толщину борированного слоя, не приводя к негативным последствиям [11–16]. При этом химический состав большинства коммерческих сталей в зависимости от степени легирования может иметь значительный разброс по содержанию химических элементов, который может изменяться от сотых долей процента до нескольких процентов.

Научная школа д.т.н., профессора А.М. Гурьева известна своими работами в области термической и химико-термической обработки металлов и сплавов, разработки технологий и насыщающих сред для борирования, начиная с 2000 года [17]. За прошедшие четверть века накоплен весьма значительный объем как теоретических, так и экспериментальных данных, который позволяет с достаточной степенью достоверности интерпретировать полученные данные в попытках создания полуэмпирических моделей процессов диффузионного борирования с целью оценки влияния параметров процесса борирования на структурно-фазовое состояние, толщину, механические и эксплуатационные характеристики получаемых боридных покрытий на сталях и сплавах с целью прогнозирования свойств готовых упрочненных деталей, инструмента и рабочих органов машин.

Оценку диффузионного потенциала проводят согласно уравнению Аррениуса, связь между вре-

менем борирования, толщиной борированного слоя и коэффициентом роста выражается следующим уравнением [14–16]:

$$h^2 = 2D\tau, \quad (1)$$

где h – толщина борированного слоя, мкм; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2\cdot\text{с}$; τ – время борирования, с.

Из уравнения Аррениуса, с учетом коэффициента диффузии D , абсолютной температуры T , К, активационной энергии диффузии Q , Дж/моль, газовой постоянной $R = 8,314$ Дж/(моль·К) и константы диффузии D_0 , $\text{м}^2\cdot\text{с}$, можно получить следующее уравнение:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{RT}. \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В предыдущей работе [18] нами для оценки диффузационного потенциала были использованы специально подобранные углеродистые стали, в которых изменялось лишь содержание углерода, тогда как в данной работе предпринята попытка оценить корреляцию между «оптимальным» химическим составом насыщаемых сталей и многими коммерческими составами сталей с целью оценки влияния разброса относительно среднего процентного содержания химических элементов в стали согласно соответствующих ГОСТ, на значение коэффициента диффузии бора в стали. Это необходимо в промышленном производстве с целью наиболее полного прогнозирования таких параметров, как толщина диффузионных боридных покрытий, а также ресурс их работы и износостойкость.

Из уравнения 1, зная толщину диффузионного боридного слоя, которую можно измерить металлографическим способом на поперечных шлифах, параметры процесса насыщения (температуру и продолжительность высокотемпературной выдержки), можно определить коэффициент диффузии бора D :

$$D = h\sqrt{2\tau}. \quad (3)$$

Используя выражение (2), подставив в которое вычисленные по выражению (3) значения коэффициента диффузии D , мы имеем возможность построить график зависимости натурального лога-

рифма коэффициента диффузии от обратной температуры ($\ln D$ от $1/T$). Этот график позволяет достаточно легко оценить константу диффузии D_0 и энергию активации Q . Энергия активации Q может быть найдена из выражения [11–13, 18–22]:

$$Q = -R \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – тангенс угла наклона графика коэффициента диффузии от обратной температуры ($\ln D$ от $1/T$).

Анализ данных по диффузии и энергии активации процесса диффузии, имеющихся в доступной литературе [5, 16–34], показал, что наиболее часто применяемой характеристикой является показатель энергии активации диффузии, который в меньшей степени зависит от температурно-временных параметров процесса диффузионного борирования, однако в большей степени отражает влияние химического состава насыщаемого материала и насыщающей среды на параметр диффузии, а, следовательно, – на кинетику процесса диффузии и, как следствие, – на толщину и другие характеристики боридного слоя. Так, в работах [5, 16–29] указывается, что энергия активации процесса диффузии бора в малоуглеродистых сталях составляет от 118 до 228 кДж/моль, при этом с ростом содержания углерода в стали вплоть до значений приблизительно 0,45–0,5 масс. % энергия активации диффузии бора демонстрирует рост, что в целом также хорошо согласуется с данными, представленными нами в предыдущей нашей работе [18]. Далее, по мере увеличения содержания углерода в стали выше значений 0,45–0,5 масс. % исследования указывают на некоторое снижение энергии активации диффузии бора вплоть до значений 148 кДж/моль при борировании серого чугуна [29].

В целом, для средне- и высокоуглеродистых сталей данных по параметрам диффузии бора значительно меньше, чем для низко- и среднеуглеродистых сталей. Наиболее вероятно, это объясняется тем, что борированию наиболее часто подвергают углеродистые стали с содержанием углерода в интервале 0,2–0,5 масс. %, что опять же объяснимо тем, что данные марки стали наиболее распространены в современном мире благодаря отличному сочетанию их цены и конструкционных характеристик.

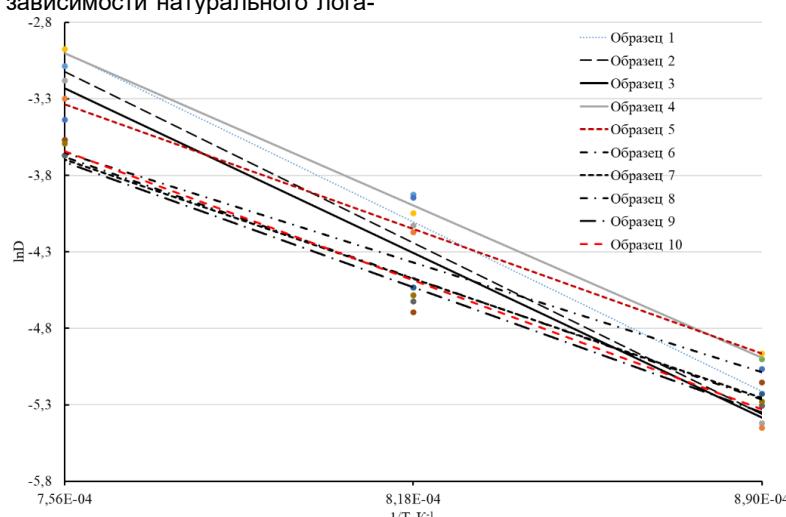


Рисунок 1 – Зависимости $\ln D$ от обратной температуры $1/T$ для образцов, приведенных в таблице 1
Figure 1 – The dependences of $\ln D$ on the return temperature of $1/T$ for the samples shown in Table 1

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА, МАРГАНЦА И КРЕМНИЯ В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ НА ПАРАМЕТРЫ ДИФФУЗИИ ПРИ БОРИРОВАНИИ

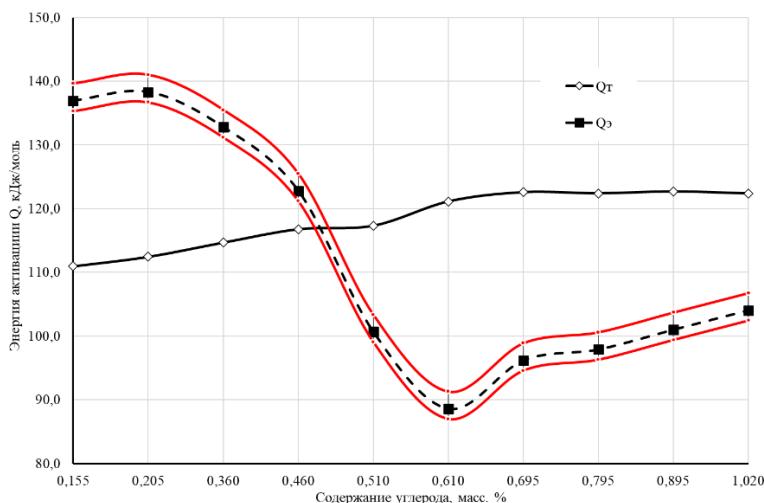


Рисунок 2 – Зависимость энергии активации диффузии Q от содержания углерода в стали, где Q_T – кривая зависимости энергии активации от содержания углерода при практически одинаковом содержании прочих легирующих элементов (более подробно – см. [18]), Q_3 – кривая зависимости энергии активации диффузии бора, построенная по экспериментальным данным, полученным на коммерческих сталях. Красные линии – границы допустимых значений, которые принимает энергия активации

Figure 2 – The dependence of the activation energy of diffusion Q on the carbon content in steel, where Q_T is the curve of the dependence of the activation energy on the carbon content with almost the same content of other alloying elements (for more details, see [18]), Q_3 is the curve of the dependence of the activation energy of boron diffusion, constructed according to experimental data, produced on commercial steels. The red lines are the boundaries of the permissible values that the activation energy takes

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из представленных графиков 1 и 2, кривая энергии активации, построенная только с учетом влияния углерода, имеет вид плавно возрастающей с плато в районе содержаний углерода 0,45–0,52 масс. %, относительно резким подъемом при содержании углерода от 0,52 до 0,61 масс. % и далее – опять практически прямая линия, параллельная оси ОХ. В случае построения кривой энергии активации на реальных коммерческих сталях, то есть с учетом содержания кремния и марганца, вид кривой приобретает более сложный характер: незначительный плавный подъем энергии активации в интервале концентраций углерода от 0,155 до 0,200 масс. % сменяется относительно плавным ее снижением в интервале концентраций углерода от 0,200 до 0,450 масс. %. И далее процесс снижения энергии активации ускоряется вплоть до значения минимального экстремума при концентрации углерода порядка 0,610 масс. %, после чего опять следует подъем энергии активации.

Исходя из того, что построение кривой энергии активации Q_3 осуществляли по данным экспериментальных исследований, а также учитывая, что на каждую марку стали (т.е. точку, или условный образец) приходилось по десять образцов реальных сталей, два из которых гарантированно имели крайние значения показателей концентрации углерода, кремния и марганца.

Определенный в данной работе «коридор» возможных значений, которые может принимать функция энергии активации на различных марках углеродистой стали в зависимости от содержания углерода, кремния и марганца, возможно использовать в практической работе с целью прогнозирования толщины диффузионного боридного слоя. Кроме того, возможно дальнейшее развитие направления компьютерного моделирования процесса диффузионного насыщения различных (конструкционных, инструментальных, специальных и др.) сталей, имеющих возможно более широкий химический состав. Что, в свою очередь,

позволит сэкономить огромное количество трудовых, временных и энергетических затрат на определение оптимального режима борирования реальных изделий. Дальнейшее расширение модели, помимо прогнозирования физических характеристик диффузионных боридных покрытий, позволит производить также расчеты и некоторых механических характеристик боридного слоя, что, в свою очередь, позволит прогнозировать эксплуатационные характеристики борированных деталей, а также подбирать материал детали и оптимизировать процесс борирования с целью получения наиболее оптимального соотношения «цена–качество» применительно к готовым упрочненным деталям. То есть оптимизировать как материал детали, так и технологические параметры процесса ее борирования с целью получения наиболее высокого ресурса работы при возможно наименьших затратах на процесс изготовления такой детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davis J.R. Bonding. Surface Hardening of Steels - Understanding the Basics, 1st ed. ASM International: Novelty, OH, USA, 2002. 349 p.
2. Ghalehbandi S.M., Biglari F. Predicting damage and failure under thermomechanical fatigue in hot forging tools // Engineering Failure Analysis. 2020. V. 113. P. 104545. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104545>.
3. Advances in Ceramic Armor XI: A Collection of Papers Presented at the 39th International Conference on Advanced Ceramics and Composites / Editor: Jerry C. La Salvia, 15.10.2015. 147 p. DOI: 10.1002/9781119211549.
4. Ворошин Л.Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Минск : Наука и техника, 1981. 296 с.
5. ASM International Handbook Comitee. ASM Handbook. Volume 5. Surface Engineering. 1994. 2535 p.
6. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / Г.В. Борисенок, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошин [и др.]. Москва : Металлургия, 1981. 424 с.
7. Ворошин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. Минск : Наукова думка, 1981. 205 с.
8. Kulka M., Pertek A., Klimek L. The influence of carbon

- content in the borided Fe-alloys on the microstructure of iron borides // Materials Characterization. 2006. Vol. 56. № 3. P. 232–240. DOI: 10.1016/j.matchar.2005.11.013.
9. Мельник П.И. Диффузионное насыщение железа и твердофазные реакции в сплавах. Москва : Металлургия, 1993. с128.
10. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей: пат. 2345175 Рос. Федерации №20070403, заявл. 03.04.2007; опубл. 27.01.2009. Бюл. № 3. 7 с.
11. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. М. : Металлургия, 1978. 248 с.
12. Пригожин И., Дефэй Р. Химическая термодинамика. Пер. с англ. Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2010. 533 с.
13. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А. Введение в физику поверхности. Москва : Наука, 2006. 490 с.
14. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. 3-е изд. Москва : Высшая школа, 2000. 494 с.
15. Родгурин В.И. Физикохимия поверхности. Долгопрудный: ИД "Интеллект", 2008. 568 с.
16. ASM International Handbook Committee. ASM Handbook. Volume 4. Heat Treating. 1991. 2173 р.
17. Физические основы термоциклического борирования сталей / Гурьев А.М. [и др.]. Барнаул, АлГТУ, 2000. 216 с.
18. Влияние содержания улерода в стали на параметры диффузии бора и толщину диффузионного покрытия при борировании / Гурьев М. А. [и др.] // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2024. Т. 49. № 3. С. 95–106.
19. Pack-boriding of low alloy steel: microstructure evolution and migration behaviour of alloying elements / A. K. Litoria [et al.] // Philosophical Magazine. 2019. DOI: 10.1080/14786435.2019.1680890.
20. Guerri Y.EI., Mebarek B., Keddam M. Confrontation of linear versus nonlinear approach in Fe_2B boridelayer thickness predictions // Zastita Materijala 2024. V. 65. № 1. P. 97–109.
21. Bouarour B., Keddam M., Boumaali B. Growth kinetics of diiron boride (Fe_2B) layer on a carbon steel by four approaches // Koroze a Ochrana Materialu. 2022. Vol. 66. № 1. P. 1–6.
22. EI G.Y., Mebarek B., Keddam M. Impact of the diffusion coefficient calculation on predicting Fe_2B boride layer thickness // Koroze a Ochrana Materialu. 2022. Vol. 66. № 1. P. 25–35.
23. Evaluating the Corrosion Behaviour of Borided Carbon Steel C35 / Kaouka A. [et al.] // Materials Research. 2022. V. 25. P. 37–44.
24. Türkmen I., Yalamaç E., Boumaali B. Investigation of tribological behaviour and diffusion model of Fe_2B layer formed by pack-boriding on SAE 1020 steel // Surface and Coatings Technology. 2019. V. 377. p. 124888.
25. Türkmen I., Yalamaç E. Growth of the Fe_2B layer on SAE 1020 steel employed a boron source of H_3BO_3 during the powder-pack boriding method // Journal of Alloys and Compounds. 2018. V. 744. P. 658–666.
26. Kaouka A., Allaoui O., Keddam M. Growth kinetics of the boride layers formed on SAE 1035 steel // Materiaux et Techniques. 2014. V. 101. № 7. P. 705.
27. Şen S., Şen U., Bindal C. An approach to kinetic study of borided steels // Surface and Coatings Technology. 2005. V. 191. № 2–3. P. 274–285.
28. Brakman C.M., Gommers A.W.J., Mittemeijer E.J. Boriding of Fe and Fe–C, Fe–Cr, and Fe–Ni alloys: Boride-layer growth kinetics // Journal of Materials Research. 1989. V. 4. № 6. P. 1354–1370.
29. Kinetic Analysis of Pack-Borided Gray Cast Iron / Azouani O. [et al.] // Materials Performance and Characterization. 2021. V. 10. № 1. P. 20200176.
30. Boronizing mechanism of cemented carbides and their wear resistance / Lin G. [et al.] // Intern. J of Refractory Metals and Hard Materials. 2013. V. 41. P. 351–355. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2013.05.008.
31. Delai O., Xia C., Shiqiang L. Growth kinetics of the
- Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*
The authors declare that there is no conflict of interest.
- Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.
- The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.
- FeB/ Fe_2B boride layer on the surface of 4Cr5MoSiV1 steel: experiments and modelling // J. of Materials Research and Technology. 2021. V. 11. P. 1272–1280.
32. Mathew M., Rajendrakumar P. Optimization of process parameters of boro-carburized low carbon steel for tensile strength by Taguchi method with grey relational analysis // Materials & Design. 2011. V. 32. P. 3637–3644.
33. Pertek A., Kulka M. Two-step treatment carburizing followed by boriding on medium-carbon steel // Surface and Coatings Technology. 2003. V. 173. P 309–314. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.01.016.
34. FeB/ Fe_2B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics / Yu L. [et al.] // Acta Materialia. 2005. V. 53. P. 2361–2368. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.01.043.

Информация об авторах

С. Г. Иванов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник направления материаловедения и упрочнения металлов и сплавов, Инновационный центр современных текстильных технологий (Лаборатория Цзяньху) (КНР), Ключевая лаборатория цифрового текстильного оборудования в провинции Хубэй, Уханьский текстильный университет (Ухань, КНР), профессор Уханьского текстильного университета (КНР); заведующий ЛМИ ИЦ «ХимБиоМаш», ведущий научный сотрудник научного управления Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, технический директор, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd (КНР), доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

С. А. Земляков – кандидат технических наук, профессор Уханьского текстильного университета (КНР).

М. Н. Зенин – аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. М. Гурьев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой начертательной геометрии и графики Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова; профессор Уханьского текстильного университета (КНР); главный научный сотрудник Zhejiang Pinuo Machinery Co., Ltd. (КНР).

Information about the authors

S.G. Ivanov - Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher in the field of materials science and strengthening of metals and alloys, Innovative Center for Modern Textile Technologies (Jianhu Laboratory) (China), Key Laboratory of Digital Textile Equipment in Hubei Province, Wuhan Textile University (Wuhan, China); Head of the LMI IC "Khimbiomash", Leading Researcher at the Scientific Department of the Polzunov Altai State Technical University.

M.A. Guryev - Candidate of Technical Sciences, Technical Director, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd (China), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment at the Polzunov Altai State Technical University.

S.A. Zemlyakov - Candidate of Technical Sciences, Professor of Wuhan Textile University (China).

M.N. Zenin - PhD student at Polzunov Altai State Technical University.

A.M. Guryev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Descriptive Geometry and Graphics, Polzunov Altai State Technical University, Professor, Wuhan Textile University (China); Chief Researcher, Zhejiang Pinuo Machinery Co., Ltd. (China).

Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК 669

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.025

[EDN: ICIJUA](#)

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ AI-15%Si – Y₂O₃ ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Юлия Андреевна Шлярова ¹, Виталий Владиславович Шляров ²,
Ирина Алексеевна Панченко ³, Иванов Юрий Федорович ⁴,
Дмитрий Валерьевич Загуляев ⁵, Александр Николаевич Прудников ⁶

^{1, 2, 3, 5, 6} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

⁴ Институт сильноточного электроники СО РАН, Томск, Россия

¹ rubannikova962mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

² shlyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

³ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

⁴ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

⁵ zagulyaev_dv@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>

⁶ a.prudnikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4150-7428>

Аннотация. Сплавы Al–Si незаменимы в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая и автомобильная, благодаря высокому соотношению прочности и веса, отличной теплопроводности и коррозионной стойкости. Эти сплавы часто содержат такие элементы, как Si, Cu, Mg и Zr, улучшающие их свойства, а специальные составы позволяют повысить прочность, износостойкость и улучшить зернистую структуру. В работе описано комплексное модифицирование поверхностного слоя заэлектрического сплава Al-15%Si, сочетающее электровзрывное легирование системой Al-Y₂O₃ с последующим облучением импульсным электронным пучком. Установлено, что комплексная обработка приводит к кратному увеличению износостойкости модифицированного слоя силумина ~ в 7.6 раз. Выявлено формирование многослойной многоэлементной многофазной структуры модифицированного объема образца толщиной до 35 мкм, упрочненного наноразмерными частицами оксидов. Установлено, что облучение импульсным электронным пучком поверхности образца силумина, подвергнутого электровзрывному легированию, не приводит к растворению порошка оксида иттрия; на поверхности образца присутствуют области, обогащенные атомами иттрия. Высказано предположение, что комбинированная обработка силумина приводит к многократному увеличению его износостойкости. Это происходит благодаря образованию наноразмерных частиц оксидной фазы в поверхностном слое материала.

Ключевые слова: силумин заэлектрического состава, электровзрывное легирование, облучение, импульсный электронный пучок, элементный состав, структура, трибология.

Благодарности: Получение образцов сплава, комбинированная обработка и работы по изучению тонкой структуры материала (ПЭМ-анализ) выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>. Исследования методами сканирующей электронной микроскопии выполнены при поддержке Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №075-00087-2401.

Для цитирования: Эволюция поверхностного слоя системы Al-15%Si – Y₂O₃ после комбинированной обработки / Ю. А. Шлярова [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 203–211. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.025. EDN: <https://elibrary.ru/ICIJUA>.

Original article

EVOLUTION OF THE SURFACE LAYER OF THE AI-15%Si – Y₂O₃ SYSTEM AFTER COMBINED TREATMENT

Yulia A. Shliarova ¹, Vitaly V. Shlyarov ², Irina A. Panchenko ³,
Ivanov Y. Fedorovich ⁴, Dmitry V. Zaguliaev ⁵, Alexander N. Prudnikov ⁶

^{1, 2, 3, 5, 6} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

⁴ Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

¹ rubannikova962mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

© Шлярова Ю. А., Шляров В. В., Панченко И. А., Иванов Ю. Ф., Загуляев Д. В., Прудников А. Н., 2025

²shlyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

³i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

⁴yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

⁵zagulyaev_dv@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9859-8949>

⁶a.prudnikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4150-7428>

Abstract. *Al-Si alloys are indispensable in various industries such as aerospace and automotive due to their high strength-to-weight ratio, excellent thermal conductivity and corrosion resistance. These alloys often contain elements such as Si, Cu, Mg and Zr, which improve their properties, and special compositions can increase strength, wear resistance and improve the grain structure. The paper describes a complex modification of the surface layer of the hypereutectic Al-15% Si alloy, combining electroexplosive alloying with the Al-Y₂O₃ system followed by irradiation with a pulsed electron beam. It was found that the complex treatment leads to a multiple increase in the wear resistance of the modified silumin layer by ~ 7.6 times. The formation of a multilayer multielement multiphase structure of the modified sample volume up to 35 μm thick, strengthened by nanosized oxide particles, was revealed. It has been established that irradiation of the surface of a silumin sample subjected to electroexplosive alloying with a pulsed electron beam does not lead to dissolution of yttrium oxide powder; the surface of the sample contains areas enriched with yttrium atoms. It is suggested that the combined treatment of silumin leads to a multiple increase in its wear resistance. This is due to the formation of nanoscale particles of the oxide phase in the surface layer of the material.*

Keywords: hypereutectic silumin, electroexplosive alloying, irradiation, pulsed electron beam, elemental composition, structure, tribology.

Acknowledgements: *Obtaining alloy samples, combined processing and studying the fine structure of the material (TEM analysis) were carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>. Studies using scanning electron microscopy methods were carried out with the support of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-00087-2401.*

For citation: Shliarova, Yu. A., Shlyarov, V. V., Panchenko, I. A., Ivanov, Yu. F., Zaguliaev, D. V. & Prudnikov, A. N. (2025). Evolution of the surface layer of the Al-15%Si - Y₂O₃ system after combined treatment. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 203-211. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.025. EDN: <https://elibrary.ru/ICIJUA>.

ВВЕДЕНИЕ

Конструкционные материалы, характеризующиеся отличительными функциональными, физическими и механическими характеристиками (включая легкость, пластичность, электропроводность, коррозионную стойкость, теплопроводность и т. д.), находят широкое применение в промышленности, особенно в следующих отраслях: автомобилестроении, авиации и аэрокосмической промышленности. К таким материалам относятся сплавы Al-Si [1-5]. Сплавы Al-Si уже длительное время завоевывают признание в качестве высокоеффективных материалов в области машиностроения, особенно для таких применений, как производство поршней ДВС, где эксплуатационная эффективность имеет решающее значение. Классификация этих сплавов зависит от содержания в них Si: сплавы с долей Si менее 12 мас.% классифицируются как доэвтектические, эвтектические сплавы, содержащие Si в диапазоне от 12 до 13 мас.%, и заэвтектические сплавы с содержанием кремния более 13 мас.%; примечательно, что спрос и популярность последней категории в последние годы значительно возросли. Тем не менее, важно признать, что растворимость Si в алюминиевой решетке ограничена, что приводит к появлению значительных частиц Si в микроструктуре заэвтектических силуминов. Эти частицы могут служить очагами повышенных внутренних напряжений на межфазных границах, что в конечном итоге приводит к разрушению материала и значительному снижению износостойкости изготовленных компонентов. Следовательно, существует неотложная необходимость в изучении и разра-

ботке инновационных стратегий, направленных на улучшение микроструктурных характеристик заэвтектических сплавов с уделением особого внимания к обработке как структурных компонентов смеси, так и первичных кристаллов Si.

В процессе измельчения кристаллов кремния используется множество методологий, при этом значительное внимание уделяется использованию специализированных легирующих элементов, которые играют решающую роль в изменении свойств материала и повышении общих характеристик [6-8].

Изучение методов обработки поверхности алюминия и его различных сплавов неизменно являлось важной областью научных исследований, характеризующихся изучением многочисленных методологий, направленных на улучшение их свойств. Например, в одном известном исследовании Qianlian Bao [9] удалось добиться нанесения покрытий на подложки из чистого алюминия с помощью процесса электроосаждения Ni-Mo, что подчеркивает инновационные подходы, применяемые в этой области. Кроме того, Tjokorda Gde Tirta Nindhia et al. [10] провели комплексное исследование гальванического нанесения никеля на алюминий, что способствовало расширению знаний о методах отделки металлов. Кроме того, Zarka M. [11] добился значительных успехов в области технологии твердого анодирования, которая оказалась основным методом улучшения поверхностных характеристик алюминиевых сплавов. Если говорить более современно, то Yiming Chi [12] исследовал применение легирования поверхности лазерным лучом. Это современный и слож-

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ AI-15%Si – Y₂O₃ ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

ный метод, представляющий собой значительный шаг вперед в области материаловедения. Кроме того, Tao Liu [13] провел обширное исследование процесса лазерного легирования поверхности, уделив особое внимание интеграции различных элементов в поверхности поршней дизельных двигателей, тем самым рассмотрев практическое применение этих методов обработки поверхности в реальных инженерных сценариях. В совокупности эти исследования подчеркивают динамичный и развивающийся характер исследований, направленных на улучшение поверхностных свойств алюминия и его сплавов с помощью разнообразных инновационных методов обработки.

Сегодня в области обработки поверхностей металлов и сплавов наиболее прогрессивным подходом считается комбинированная технология, объединяющая различные технологии обработки, включая электровзрывное легирование с последующей обработкой электронным лучом. Выдвинуто предположение, что измельчение первичных кристаллов Si можно эффективно проводить в заэвтектическом силумине с помощью высоконергетических импульсных плазменных потоков, которые вызывают плавление в приповерхностном слое и затем способствуют направленной высокоскоростной кристаллизации. Таким образом, результаты этих исследований могут способствовать прогрессу в материаловедении, особенно в том, что касается разработки высококачественных металлических сплавов, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками благодаря тщательному управлению их микроструктурными особенностями с помощью этой технологии обработки.

Цель данной работы – изучить структуру и трибологические характеристики поверхностного слоя силумина после комбинированной обработки (электровзрывное легирование с последующим облучением импульсным электронным пучком субмиллisecondной длительности воздействия).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования были использованы образцы силумина Al-15%Si. Элементный состав силумина (прибор Shimadzu XRF-1800): Si – 15,9; Fe – 0,24; Cu – 0,07, Mn – 0,005; Ni – 0,005; Ti – 0,006; Cr – 0,001; V – 0,013; Mg < 0,001; S – 0,032; Pb < 0,001; Zn – 0,021, ост. Al в мас. %. Образцы силумина имели размеры 15x15x10 мм. Электровзрывное легирование поверхности образцов осуществляли порошком Y₂O₃ на установке ЭВУ 60/10 (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк) [14] при следующих параметрах: m(Al) = 0,0589 г; m(Y₂O₃) = 0,0589; U = 2,8 кВ.

Облучение модифицированных электровзрывным методом образцов осуществляли на установке «СОЛО» [15]. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 25 Дж/см² при длительности импульсов воздействия 150 мкс (количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹), давление рабочего газа (argon) в рабочей камере 0,02 Па.

Тонкую структуру модифицированного слоя силумина изучали с помощью двух методов: сканирующей электронной микроскопии (использовался прибор Philips SEM-515 с микронализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (прибор JEOL JEM-2100F) [16–19]. Подготовку образцов (фольги толщиной 0,2–0,3 мкм) для просвечивающей электронной микроскопии осуществляли в два этапа. На первом этапе вырезали из объемного образца пластинки с помощью Isomet Low Sped Saw, после чего утоняли за счет бомбардировки поверхности пластинок ионами и нейтральными атомами аргона на установке Ion Slicer (EM-09100IS). Пластинки вырезали в сечении, перпендикулярном модифицированной поверхности образца. Это позволяло на одной фольге исследовать изменение структуры материала при контролируемом удалении от модифицированной поверхности в объем образца на расстояние 200–300 мкм. Состояние кристаллической решетки и фазовый состав модифицированного слоя изучали методами рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000). Трибологические свойства исследуемого материала характеризовали параметром износа и коэффициентом трения (трибометр Pin on Disc and Oscillating TRIBO tester). Испытания проводили при следующих условиях: шарик – из Al₂O₃ диаметром 6 мм, радиус дорожки трения – 2 мм, скорость вращения образца – 25 мм/с, нагрузка на индентор – 10 Н, время испытаний – 4000 сек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Трибологические испытания, которые проводились при комнатной температуре в условиях сухого трения, продемонстрировали, что параметр износа к уменьшается (увеличением износостойкости) после электровзрывного легирования и последующего облучения легированного слоя импульсным электронным пучком. Установлено, что параметр износа силумина в литом состоянии $k = 14 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м; после электровзрывного легирования $k = 6,5 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м; дополнительное облучение импульсным электронным пучком приводит к снижению параметра износа до $k = 1,85 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м. Одновременно с этим использованная обработка сопровождается постепенным незначительным увеличением коэффициента трения от $\mu = 0,51$ для литого силумина до $\mu = 0,60$ после электровзрывного легирования и $\mu = 0,66$ для силумина после дополнительного облучения импульсным электронным пучком.

Очевидно, что многократное увеличение износостойкости силумина, подвергнутого комплексной обработке, обусловлено состоянием структуры и фазового состава модифицированного слоя. На рис. 1 и 2 представлены характерные изображения структуры шлифа силумина в литом состоянии. На рис. 1 (б–в) видно, что главные химические элементы этого материала – алюминий и кремний. Атомы Fe (примесного элемента) содержатся в незначительном количестве (рис. 1, г).

Структурное состояние данного материала характеризуется зернами эвтектики Al-Si (рис. 2,

обл. 1), кристаллами первичного кремния (рис. 2, область 2), включениями пластинчатой (ленточной) формы, обогащенными атомами железа (рис. 2, область 3) и зернами твердого раствора на основе алюминия (рис. 2, область 4). Соотношение химических элементов в данных структурных составляющих силумина приведено в табл. 1. Методами рентгенофазового анализа установлено, что относительное содержание фаз Al и Si в литом состоянии силумина составляет 51 мас.% и 49 мас.%.

Структурное состояние данного материала характеризуется зернами эвтектики Al-Si (рис. 2, обл. 1), кристаллами первичного кремния (рис. 2, обл. 2), включениями пластинчатой (ленточной) формы, обогащенными атомами железа (рис. 2, обл. 3) и зернами твердого раствора на основе алюминия (рис. 2, обл. 4). Соотношение химических элементов в данных структурных составляющих силумина приведено в табл. 1. Методами рентгенофазового анализа установлено, что относительное содержание фаз Al и Si в литом состоянии силумина составляет 51 мас.% и 49 мас.%.

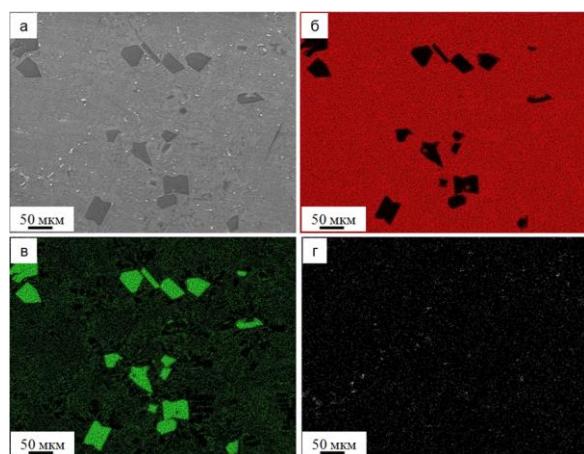


Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина в литом состоянии (а); б-г – изображения, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов алюминия (б), кремния (в) и железа (г)

Figure 1 – Electron microscopic image of the structure of silumin in the cast state (a); b-g - images obtained in the characteristic X-ray radiation of aluminum atoms (b), silicon (c) and iron (d)

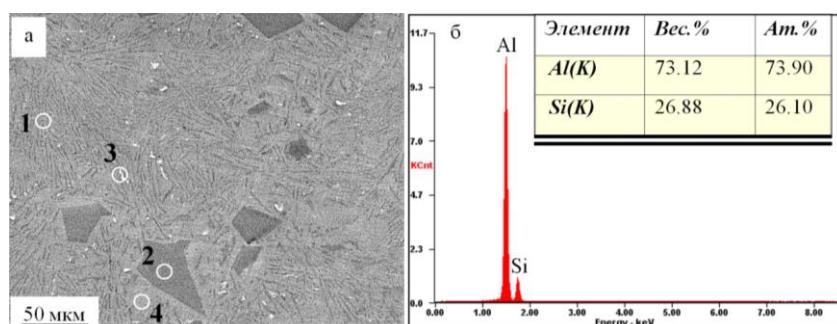


Рисунок 2 – Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина Al-15%Si в литом состоянии (а); б – энергетические спектры, полученные с площади образца, изображение которой представлено на (а)

Figure 2 – Electron microscopic image of the structure of Al-15%Si silumin in the cast state (a); b - energy spectra obtained from the area of the sample, the image of which is shown in (a)

Таблица 1 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа участка образца силумина в литом состоянии, представленного на рис. 2, а.

Table 1 – Results of micro-X-ray spectral analysis of a section of a silumin sample in the cast state, shown in Fig. 2, a.

Элемент, вес. %	Область анализа			
	1	2	3	4
Al(K)	74,8	1,4	83,6	95,2
Si(K)	25,2	98,6	7,6	4,3
Fe(K)	0,0	0,0	8,8	0,5

Комбинированная обработка образцов силумина, сочетающая электровзрывное легирование с последующим импульсным электронным излучением, приводит к значительным изменениям элементного и фазового состава, а также состояния дефектной субструктуры в поверхностном слое материала.

Эта комбинированная обработка характеризуется развитием рельефной структуры, отличи-

тельная морфология которой изображена на рисунках 3, а, б. При относительно большом увеличении раскрывается субструктура поверхностного слоя, характеризующаяся зернами с размерами в пределах (0,4–0,7) мкм (рис. 3, в). Примечательной особенностью поверхностного слоя являются сферические частицы размером от (0,6–9) мкм (рис. 3, б, в). Можно предположить, что данные образования являются частицами порошка Y_2O_3 .

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ AI-15%Si – Y2O3 ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

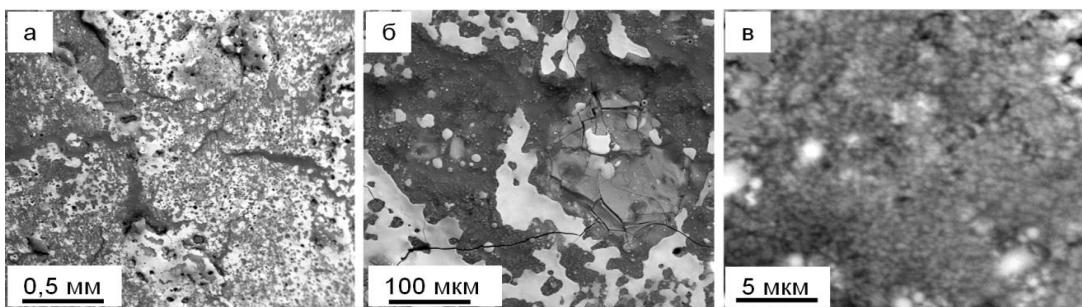


Рисунок 3 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке

Figure 3 – Electron microscopic image of the surface structure of a silumin sample subjected to combined treatment

Методом «картирования» осуществлена визуализация распределения химических элементов в поверхностном слое силумина (рис. 4). Отчетли-

во видно, что основную площадь анализируемой поверхности занимает область, обогащенная атомами алюминия (рис. 4, б) и иттрия (рис. 4, г).

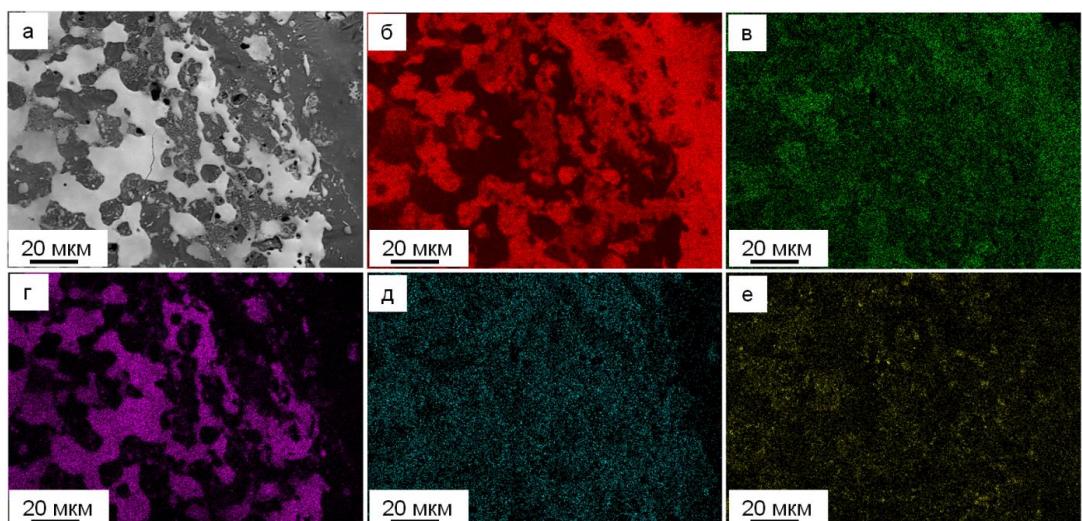


Рисунок 4 – Электронная микрофотография структуры поверхностного слоя образца силумина после комбинированной обработки (а); б-е – изображение участка (а) в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (б), Si (в), Y (г), O (д), Ti (е)

Figure 4 – Electronic micrography of the structure of the surface layer of a silumin sample after combined treatment (a): b-e is an image of the site (a) in the characteristic X-ray radiation of Al (b), Si (c), Y (d), O (e), Ti (e) atoms

Относительное содержание выявленных химических элементов в поверхностном слое модифицированного силумина определяли методами микрорентгеноспектрального анализа (методы «по точкам» и «по площадям»). Исследования, результаты которых отражены на рис. 5 и в табл. 2, показывают, что в поверхностном слое присутствуют области с высокой концентрацией атомов Y (обл. 1 на рис. 5), атомов Ti (обл. 2 на рис. 5) и атомов Ti и Al (обл. 3 на рис. 5).

Таблица 2 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа образца силумина, электронно-микроскопическое изображение структуры которого приведено на рис. 5

Table 2 – The results of the micro-X-ray spectral analysis of the silumin sample, the electron microscopic image of the structure of which is shown in Fig. 5

Данные исследования подтверждают результаты распределения химических элементов в поверхностном слое силумина, полученные методами «картирования» (рис. 4). Следует отметить, что наиболее избирательным химическим элементом является иттрий, который располагается преимущественно в областях различной формы, имеющих сравнительно светлый контраст (рис. 5).

Элемент	Область анализа							
	1		2		3		С площади	
	вес. %	ат. %		вес. %	ат. %		вес. %	ат. %
O K	28,69	68,59		47,73	67,28		17,54	32,35
Al K	0,55	0,78		22,21	18,57		40,2	43,95
Si K	0	0		0	0		7,86	8,25
Ti K	0,51	0,41		30,06	14,15		14,17	8,73
Y L	70,25	30,22		0	0		20,23	6,71

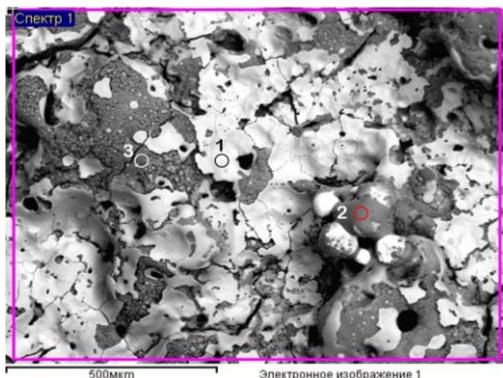


Рисунок 5 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке

Figure 5 – Electron microscopic image of the surface structure of a silumin sample subjected to combined treatment

С помощью микрорентгеноспектрального анализа было установлено (рис. 5, табл. 2), что после комбинированной обработки на поверхности образцов силумина имеются области (далее – области 1), насыщенные преимущественно атомами Y и O (рис. 5, область 1). В меньшем количестве присутствуют области, обогащенные преимущественно атомами Ti и O (рис. 5, область 2) и области с высокой концентрацией атомов Al и Si (рис. 5, область 3).

Методами рентгенофазового анализа установлено, что комбинированная обработка приводит к формированию в поверхностном слое многофазной структуры, а именно: Al (тв. р-р на осн. Al, 34 масс. %), TiAl (31 масс. %), Y_2O_3 (26 масс. %), $YAlO_3$ (9 масс. %).

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии с использованием фольги проведены исследования структуры силумина в зависимости от расстояния от поверхности модификации. На рис. 6 приведено STEM

Таблица 3 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа образца силумина, электронно-микроскопическое изображение структуры которого приведено на рис. 6, а.

Table 3 – The results of micro-X-ray spectral analysis of a silumin sample, the electron microscopic image of the structure of which is shown in Fig. 6, a.

Элемент						
	O	Al	Si	Ti	Fe	Y
вес. %	4,72	42,43	7,6	26,67	4,48	14,09
ат. %	10,06	53,6	9,22	18,98	2,74	5,4

Фазовый состав участка фольги, структура которого приведена на рис. 6, изучали методами дифракционной электронной микроскопии. Анализ микроэлектронограммы (рис. 8, б), полученной с участка, обозначенного на рис. 8, а окружностью, дает основание заключить, что, во-первых, слой 1 (рис. 6) находится в аморфном состоянии. Во-вторых, слой содержит наноразмерные (20–60 нм) включения округлой формы (рис. 8, а, в). Индикация микроэлектронограммы (рис. 8, б) позволяет заключить, что данные включения являются оксидом иттрия. К аморфному слою примыкает слой 2 (рис. 6), выделенный на рис. 8, а фигурной скобкой. Анализ микроэлектронограммы показыва-

изображение структуры поперечного сечения области 1, указанной на рис. 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа данного участка фольги представлены на рис. 7.

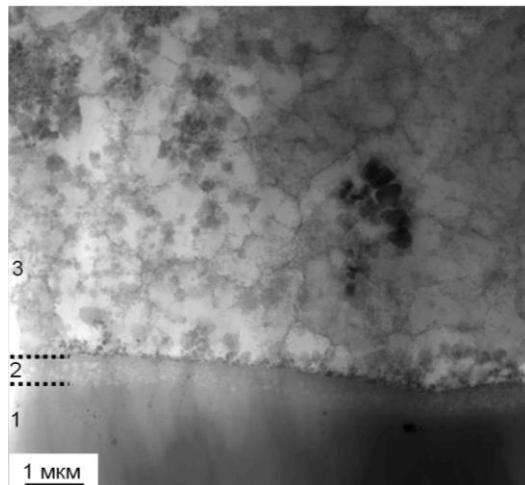


Рисунок 6 – STEM изображение структуры поперечного сечения области 1

Figure 6 – STEM image of cross-sectional structure of region 1

Анализируя результаты, представленные на рис. 6 и 7, можно отметить формирование многослойной структуры, представленной слоем, обогащенным атомами иттрия (рис. 6, слой 1, рис. 7, б). Данный слой обогащен атомами кислорода (рис. 7, б). Далее следует слой 2 (рис. 6), содержащий включения, обогащенные атомами титана (рис. 7, г) и атомами алюминия (рис. 7, а). Слой 3 (рис. 6) сформирован атомами алюминия (рис. 7, а) и содержит включения, обогащенные атомами титана, кремния и железа (рис. 7, г–е). В количественном соотношении элементный состав представленного на рис. 6 участка фольги приведен в табл. 3.

ет, что данный слой сформирован наноразмерными (80–100 нм) оксидами состава Al_2SiO_5 , $YTiO_3$, TiO .

Электронно-микроскопическое изображение слоя 3, непосредственно примыкающего к слою 2 (рис. 6), представлено на рис. 9. Этот слой обладает поликристаллической структурой, состоящей из субзёрен (или зёрен) твёрдого раствора на основе алюминия (рис. 9, в). Размеры субзёрен варьируются в диапазоне от 0,3 до 0,5 мкм. В объеме субзёрен располагаются наноразмерные (10–15 нм) частицы оксида алюминия Al_2O_3 (рис. 9, в, частицы указаны стрелками). Данный слой содержит включения оксидов субмикронных (0,3–0,4 мкм) размеров состава SiO_2 , $Y_2Si_2O_7$ и YTi_2O_6 .

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ AI-15%Si – Y2O3 ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

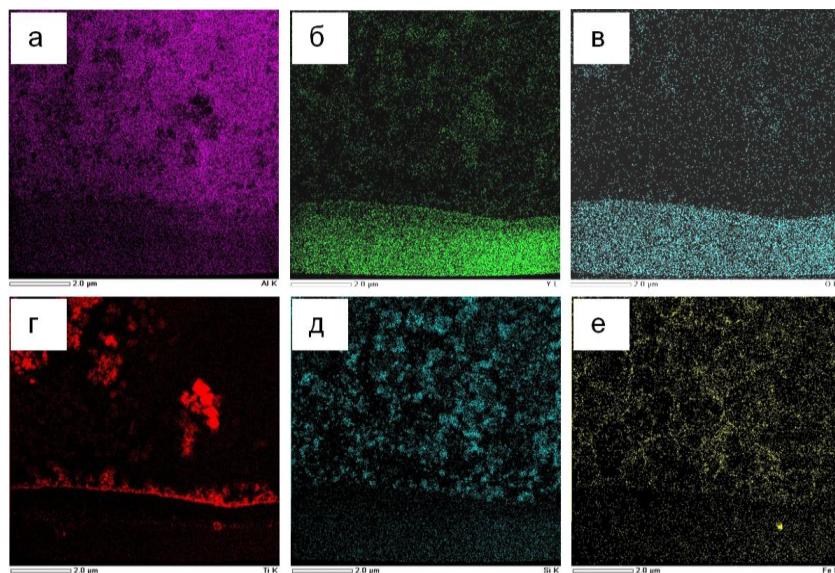


Рисунок 7 – Изображение участка фольги, электронно-микроскопическое изображение которого приведено на рис. 6, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (а), Y (б), O (с), Ti (д), Si (е), Fe (е)
 Figure 7 – An image of a section of foil, the electron microscopic image of which is shown in Fig. 6, obtained in the characteristic X-ray radiation of atoms of Al (a), Y (b), O (c), Ti (d), Si (d), Fe (e)

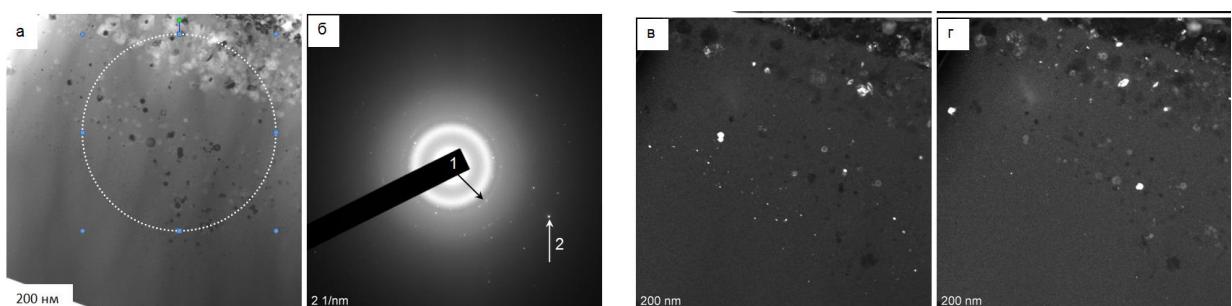


Рисунок 8 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина, модифицированного комбинированным методом: а – светлое поле; б – микроэлектронограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах [511]Y₂O₃ (в) и [442]Al₂SiO₅ + [043]YTiO₃ + [224]TiO (г); на (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в), 2 – для (г)

Figure 8 – Electron microscopic image of the structure of the surface layer of silumin modified by the combined method: a - bright field; b - microelectron diffraction pattern; c, d - dark fields obtained in the reflections [511]Y₂O₃ (c) and [442]Al₂SiO₅ + [043]YTiO₃ + [224]TiO (d); in (b) the arrows indicate the reflections in which the dark fields were obtained: 1 - for (c), 2 - for (d)

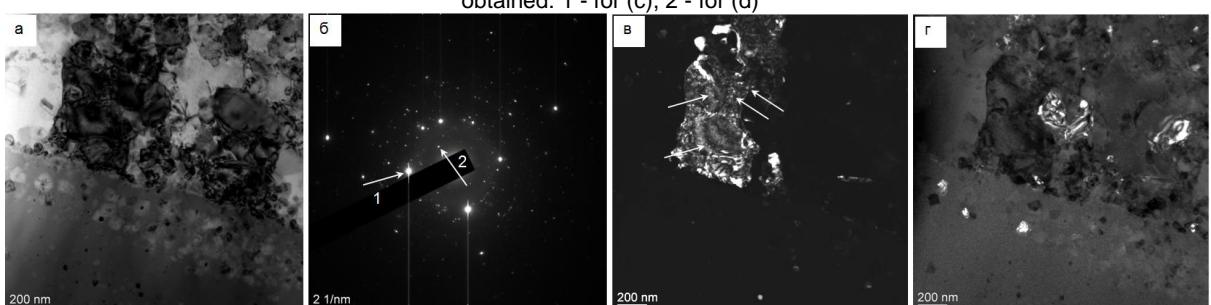


Рисунок 9 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина, модифицированного комбинированным методом: а – светлое поле; б – микроэлектронограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах [111]Al (в) и [120]YTi₂O₆ + [220]SiO₂ + [012]Y₂Si₂O₇ (г); на (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: для (в) – 1, для (г) – 2

Figure 9 – Electron microscopic image of the structure of the surface layer of silumin modified by the combined method: a - bright field; b - microelectron diffraction pattern; c, d - dark fields obtained in reflections [111]Al (c) and [120]YTi₂O₆ + [220]SiO₂ + [012]Y₂Si₂O₇ (d); in (b) the arrows indicate the reflections in which dark fields were obtained: for (c) - 1, for (d) - 2

При удалении от поверхности модификации размеры субзерен увеличиваются до

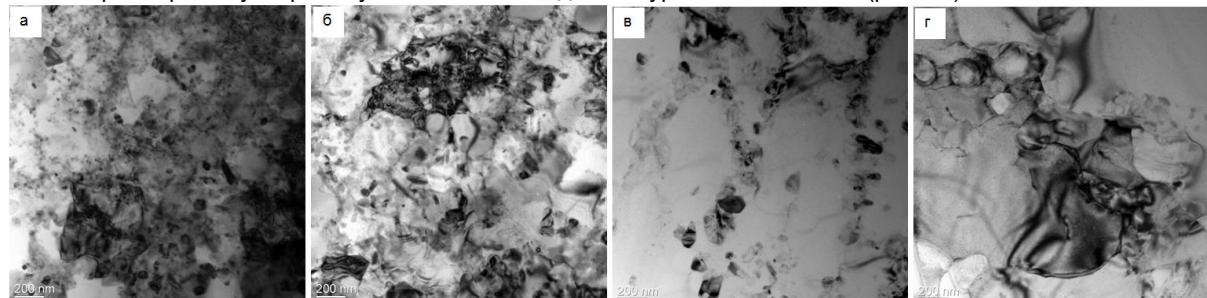


Рисунок 10 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина, модифицированного комбинированным методом на расстоянии 15 (а), 25 (б), 45 (в) и 60 мкм от поверхности обработки

Figure 10 – Electron microscopic image of the structure of the surface layer of silumin modified by a combined method at a distance of 15 (a), 25 (b), 45 (c) and 60 μm from the treatment surface

Одновременно с преобразованием субзерено-зеренной структуры с увеличением расстояния от поверхности модификации изменяется и фазовый состав частиц. Если в слое толщиной до

0,7 мкм и на глубине \approx 40 мкм субзеренная структура не выявляется (рис. 10).

20 мкм преобладали частицы оксидов, то на большем расстоянии преобладающей фазой являются частицы кремния (рис. 11).

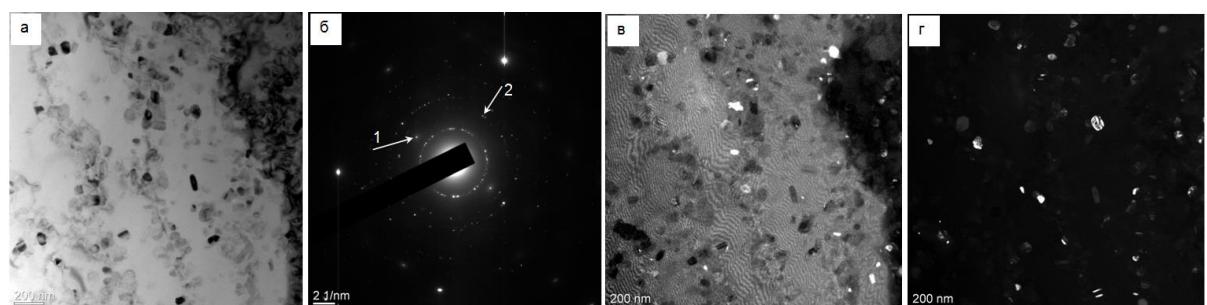


Рисунок 11 – Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя силумина, модифицированного комбинированным методом, расположенного на глубине 35 мкм: а – светлое поле; б – микроэлектронограмма; в, г – темные поля, полученные в рефлексах [111]Al + [102]TiSi + [002]Ti (в) и [220]Si (г); на (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: для (в) – 1, для (г) – 2

Figure 11 – Electron microscopic image of the structure of the silumin layer modified by the combined method, located at a depth of 35 μm : a - bright field; b - microelectron diffraction pattern; c, d - dark fields obtained in reflections [111]Al + [102]TiSi + [002]Ti (c) and [220]Si (d); in (b) the arrows indicate the reflections in which dark fields were obtained: for (c) - 1, for (d) - 2

Таким образом, основываясь на эмпирических данных, полученных с помощью просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, можно обоснованно предположить, что значительное улучшение износостойких свойств силумина, подвергшегося сложному комбинированному процессу обработки, который объединяет электровзрывное легирование с последующим процессом облучения импульсным электронным пучком, в основном связано с образованием наноразмерных частиц оксидной фазы в поверхностном слое материала, толщина до 35 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что комплексная обработка приводит к кратному (в 7,6 раз) увеличению износостойкости модифицированного слоя силумина. С помощью рентгенофазового анализа установлено, что в результате комбинированной обработки образуется многофазный поверхностный слой, основными фазами которого являются тв. р-р на основе Al, TiAl, Y_2O_3 и YAlO_3 . Установлено, что облучение импульсным электронным пучком поверхности образца силумина, подвергнутого элек-

тровзрывному легированию, не приводит к растворению порошка оксида иттрия; на поверхности образца присутствуют области, обогащенные атомами иттрия. Выявлено формирование многослойной структуры модифицированного объема образца. Показано, что поверхностный слой, обогащенный атомами иттрия и кислорода, находится в аморфном состоянии. Слой, примыкающий к аморфному слою, сформирован наноразмерными (80–100 нм) оксидами состава Al_2SiO_5 , YTiO_3 и TiO . Следующий за ним слой толщиной (30–35) мкм, имеет субзерено-зеренную структуру и содержит включения оксидов субмикронных (0,3–0,4 мкм) размеров состава SiO_2 , $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ и YTi_2O_6 . На большем удалении от поверхности модификации субзеренная структура не выявляется, преобладающей упрочняющей фазой являются частицы кремния. Высказано предположение о том, что выявленное кратное увеличение износостойкости силумина, подвергнутого комбинированной обработке, сочетающей электровзрывное легирование и последующее облучение импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности,

ЭВОЛЮЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ AI-15%Si – Y2O3 ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

обусловлено формированием в поверхностном слое толщиной до 35 мкм наноразмерных частиц оксидной фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Choudhary, C., Sahoo, K.L. & Mandal, D. (2018). Microstructure and mechanical properties of AlSi alloys processed by strain induced melt activation. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 5. P. 27107-27111. doi: 10.1016/j.matpr.2018.09.017.
2. Jeon, J.H., Shin, J.H. & Bae, D.H. (2019). Si phase modification on the elevated temperature mechanical properties of Al-Si hypereutectic alloys / *Materials Science and Engineering A*. Vol. 748. P. 367-370. doi: 10.1016/j.msea.2019.01.119.
3. Yan, W., Chen, W., Zhang, S., Li, B. & Li, J. (2019). Evolution of solidification structures and mechanical properties of high-Si Al alloys under permanent magnetic stirring. *Materials Characterization*. Vol. 157. P. 109894. doi: 10.1016/j.matchar.2019.109894.
4. Sigworth, G.K., Campbell, J. & Jorstad, J. (2009). The modification of Al-Si casting alloys: important practical and theoretical aspects. *International Journal of Metalcasting*. Vol. 3. № 1. P. 65-78. doi: 10.1007/BF03355442.
5. Kaufman, J.G. & Rooy, E.L. (2004). *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. 340 p.
6. Mao, G., Yan, H., Zhu, C., Wu, Z. & Gao, W. (2019). The varied mechanisms of yttrium (Y) modifying a hypoeutectic Al-Si alloy under conditions of different cooling rate. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 806. P. 906-916. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.07.107.
7. Shi, W.X., Gao, B., Tu, G. & Li, S. (2010). Effect of Nd on microstructure and wear resistance of hypereutectic Al-20%Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 508. P. 480-485. doi: 10.1016/j.jallcom.2010.08.098.
8. Jiang, B., Ji, Z., Hu, M., Xu, H. & Xu, S. (2019). A novel modifier on eutectic Si and mechanical properties of Al-Si alloy. *Materials Letters*. Vol. 239. P. 13-16.
9. Bao, Q., Zheng, W., Chen, L., Xu, Z., Han, J. & Zhu, C. Optimization of plating process and corrosion behavior of nanocrystalline Ni-Mo coatings on pure aluminum. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. Vol. 636. P. 128128. doi: 10.1016/j.matlet.2018.12.045.
10. Nindhia, T.G.T., Negara, D.K.P., Saputra, I.W.A. & Sharma, P.Kr. (2020). Development Method for Nickel Electroplating on Aluminium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1007. P. 012105.
11. Zarka, M., Dikici, B., Niinomi, M., Ezirmik, K.V., Nakai, M. & Kaseem, M. (2021). The Ti3.6Nb1.0Ta0.2Zr0.2 coating on anodized aluminum by PVD: A potential candidate for short-time biomedical applications. *Vacuum*. Vol. 192. P. 110450. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110450.
12. Chi, Y., Gu, G., Yu, H. & Chen, C. Laser surface alloying on aluminum and its alloys: A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018. Vol. 100. P. 23-37. doi: 10.1016/j.optlaseng.2017.07.006.
13. Liu, T., Li, A., Zhu, C. & Yuan, W. Effect of alloying elements on surface temperature field of aluminum piston in diesel engine. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 134. P. 106020. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.106020.
14. Romanov, D.A., Budovskikh, E.A., Zhmakin, Y.D. & Gromov, V.E. (2011). Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system. *Steel in Translation*. Vol. 41. No. 6. P. 464-468. doi: 10.17073/0368-0797-2016-10-679-687.
15. Akhmadeev, Yu.Kh., Denisov, V.V., Ivanov, Yu.F. & etc. (2016). Electron-ion-plasma modification of the surface of

non-ferrous metals and alloys / edited by N.N. Koval and Yu.F. Ivanov. Tomsk : NTL Publishing House. 312 p.

16. Egerton, F.R. (2016). *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing. 196 p.

17. Kumar, C.S.S.R. (2014). *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer. 717 p.

18. Carter, C.B. & Williams, D.B. (2016). *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing. 518 p.

19. Hirsch, P., Howie, A., Nicholson, P., Pashley, D. & Whelan, M. (1968). *Electron Microscopy of Thin Crystals*. Moscow : Mir. 574 p.

Информация об авторах

Ю. А. Шлярова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМиОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

В. В. Шляров – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМиОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

И. А. Панченко – кандидат технических наук, доцент кафедры менеджмента качества и инноваций, заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Сильноточной электроники СО РАН.

Д. В. Загуляев – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

А. Н. Прудников – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры обработки металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК Сибирского государственного индустриального университета.

Information about the authors

Yu.A. Shliarova - post-graduate student of the Department of Natural Sciences named prof. V.M. Finkelya, Researcher of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.

V.V. Shlyarov - post-graduate student of the Department of Natural Sciences named prof. V.M. Finkelya, Researcher of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.

I.A. Panchenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Quality Management and Innovation, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.

Y.F. Ivanov - Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

D.V. Zaguljaev - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel of the Siberian State Industrial University.

A.N. Prudnikov - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Metal Forming and Materials Science. EVRAZ ZSMK of the Siberian State Industrial University.

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

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 678.6

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.026

EDN: IFFBWZ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ СВЧ-ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

Антон Сергеевич Сивак ¹, Светлана Геннадьевна Калганова ²,
Юлия Александровна Кадыкова ³, Сергей Викторович Тригорлы ⁴,
Татьяна Павловна Сивак ⁵, Екатерина Юрьевна Васинкина ⁶

АО «НПП «Контакт», ул. Спицына, 1, Саратов, Россия

¹pktrial@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3302-4670>

²s.kalganowa2016@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2155-3192>

³79053818212@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5581-0970>

⁴trigorly55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6591-7624>

⁵tata.sivak@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9780-4265>

⁶vasinkina1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4247-9262>

Аннотация. В настоящее время высокоэнергетические радиопоглощающие композиты применяются для задач оборонно-промышленного комплекса и гражданской промышленности, актуальной проблемой является создание таких материалов с заданными функциональными свойствами, а также разработка технологии внешнего электромагнитного воздействия для интенсификации диссипации энергии в объеме композита. В данном исследовании предложена методика математического моделирования нагрева высокоэнергетических радиопоглощающих композитов при воздействии СВЧ-энергии с использованием программной среды COMSOL Multiphysics®, что позволяет решать систему уравнений электродинамики и теплопереноса в трехмерной постановке и моделировать процессы СВЧ-нагрева композитов с учетом изменения свойств материалов матрицы и наполнителя при СВЧ-воздействии.

В результате исследования процесса диссипации на основе проведенного математического моделирования определены оптимальные геометрические размеры радиопоглощающего наполнителя из карбида кремния и его расположение в матрице из фторопласта Ф-4 и эпоксидной смолы ЭД-20. Установлено, что для высокоэнергетических радиопоглощающих композитов с матрицей из эпоксидной смолы с плоским наполнителем из карбида кремния толщиной 1–4 мм, расположенным в волноводной СВЧ-камере перпендикулярно вектору Пойнтинга и параллельно вектору напряженности электрического поля, при СВЧ-мощности 600 Вт и времени воздействия 60 с достигается скорость нагрева 10–17 °С / с равномерностью температурного поля в наполнителе.

Ключевые слова: высокоэнергетический радиопоглощающий композит, диссипация энергии, СВЧ-излучение, эпоксидная смола, фторопласт, поглощающий наполнитель, численное моделирование.

Для цитирования: Математическое моделирование процесса диссипации СВЧ-энергии при термообработке высокоэнергетических радиопоглощающих композитов / А. С. Сивак [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 212–219. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.026. EDN: <https://elibrary.ru/IFFBWZ>.

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF MICROWAVE ENERGY DISSIPATION DURING HEAT TREATMENT OF HIGH-ENERGY RADIO-ABSORBING COMPOSITES

Anton S. Sivak ¹, Svetlana G. Kalganova ², Yulia A. Kadykova ³,
Sergey V. Trigorly ⁴, Tatyana P. Sivak ⁵, Ekaterina Yu. Vasinkina ⁶

JSC " SPE "Kontakt", Spitsyna str., 1, Saratov, Russia

¹pktrial@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3302-4670>

²s.kalganowa2016@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2155-3192>

© Сивак А. С., Калганова С. Г., Кадыкова Ю. А., Тригорлы С. В., Сивак Т. П., Васинкина Е. Ю., 2025

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ СВЧ-ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

³79053818212@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5581-0970>

⁴trigorly55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6591-7624>

⁵tata.sivak@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9780-4265>

⁶vasinkina1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4247-9262>

Abstract. Nowadays high-energy radio-absorbing composites are used for the tasks of defense-industrial complex and civil industry, and the actual problem is the creation of such materials with specified functional properties, as well as the development of the technology of external electromagnetic influence to intensify the dissipation of energy in the composite volume. In this study the methodology of mathematical modeling of heating of high-energy radio-absorbing composites under microwave energy exposure using COMSOL Multiphysics® software environment is proposed, which allows solving the system of equations of electrodynamics and heat transfer in three-dimensional formulation and modeling the processes of microwave heating of composites taking into account the change of properties of matrix and filler materials under microwave exposure. As a result of investigation of the dissipation process on the basis of mathematical modeling, the optimum geometrical dimensions of silicon carbide radio-absorbing filler and its location in the matrix made of fluoroplastic F-4 and epoxy resin ED-20 have been determined. It is established that for high-energy radio-absorbing composites with a matrix of epoxy resin with a flat silicon carbide filler 1-4 mm thick, located in a waveguide microwave chamber perpendicular to the Poynting vector and parallel to the vector of electric field strength, at a microwave power of 600 W and exposure time of 60 s the heating rate of 10-17 °C/s with uniformity of the temperature field in the filler is achieved.

Keywords: high-energy radio-absorbing composite, energy dissipation, microwave radiation, epoxy resin, fluoroplastic, absorbing filler, numerical modeling.

For citation: Sivak, A. S., Kalanova, S. G., Kadykova, Y. A., Trigorly, S. V., Sivak, T. P. & Vasinkina, E. Y. (2025). Mathematical modeling of the process of microwave energy dissipation during heat treatment of high-energy radio-absorbing composites. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 212-219. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.026. EDN: <https://elibrary.ru/IFFBWZ>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полимерные композиционные материалы находят широкое применение в изделиях и конструкциях для различных отраслей промышленности. Развитие новых технологий в военной и гражданской промышленности требует создания новых композиционных материалов, обладающих улучшенными функциональными свойствами. Одним из видов таких композитов являются высокозергетические радиопоглощающие композиты (ВРК), которые состоят из полимерной матрицы и поглощающего электромагнитную энергию наполнителя. При воздействии на ВРК внешнего электромагнитного излучения в объеме композита выделяется большое количество тепловой энергии, и его температура повышается с большой скоростью. В связи с этим ВРК находят применение в качестве инициирующего или первичного вещества для зажигания топлива, для возбуждения взрывчатого превращения других веществ в устройствах двойного назначения в оборонно-промышленном комплексе, в горнодобывающей промышленности и других отраслях [1–5].

Актуальной проблемой является создание высокозергетических радиопоглощающих композитов с заданными функциональными свойствами и разработка технологии внешнего электромагнитного воздействия для интенсификации диссипации энергии в объеме композита. При создании ВРК важной задачей является исследование и прогнозирование их свойств с использованием информационных технологий [6, 7]. Среди электрофизических методов воздействия на композиционные материалы применение энергии сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний получает все большее распространение [8–11]. Это связано с тем, что в случае СВЧ-воздействия на высокозергетические материалы происходит объемный нагрев композита при избирательной диссипации СВЧ-энергии, которая обусловлена

различием электрофизических свойств материалов матрицы и наполнителя. При этом СВЧ-нагрев обеспечивает заданную высокую скорость и требуемую равномерность нагрева композита.

За последние годы были проведены исследования в области нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ-электромагнитном поле [8], разработаны СВЧ-установки для нагрева протяженных диэлектрических объектов полем поверхностного волновода [9], проведено численное моделирование и оптимизация процессов сверхвысокочастотной обработки диэлектриков [10], рассмотрены вопросы повышения равномерности нагрева диэлектриков в СВЧ-установках резонаторного типа с распределенными системами возбуждения [11].

Следует отметить, что в литературе имеется ограниченное число работ, посвященных физическим и термодинамическим моделям взаимодействия дипольных частиц в композитах с полимерным связующим. Отсутствуют данные о результатах исследования нагрева высокозергетических радиопоглощающих композитов различной структуры в электромагнитном поле сверхвысоких частот.

Целью данной работы является проведение математического моделирования процесса диссипации СВЧ-энергии при термообработке высокозергетических радиопоглощающих композитов для получения ВРК с заданными функциональными свойствами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются модельные образцы ВРК с матрицами из ЭД-20 и Ф-4 и радиопоглощающими наполнителями из карбида кремния, а предмет исследования – электродинамические и тепловые процессы при взаимодействии СВЧ электромагнитного поля с ВРК.

Для материала матрицы использовались полимерные материалы: эпоксидная смола марки ЭД-20 [12–14] и политетрафторэтилен (фторопласт-4) [15, 16]. Выбор этих материалов обусловлен тем, что их

электрофизические и теплофизические свойства существенно отличаются (табл. 1). Это позволяет в процессе математического моделирования СВЧ-нагрева исследовать влияние связующего материала на диссипацию энергии, распределение температурного поля в композите и скорость его нагрева.

Выбор карбида кремния SiC [17, 18] в качестве наполнителя объясняется тем, что данный наполнитель обладает высокими значениями тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и относительной диэлектрической проницаемости ϵ' (табл. 1), что приводит к эффективной диссипации энергии при воздействии электромагнитных колебаний в диапазоне СВЧ. Кроме того, карбид кремния выдерживает высокие температуры без химического разрушения.

Основными задачами исследования являются: разработка методики математического моделирования взаимосвязанных процессов электродинамики и теплопроводности при СВЧ-нагреве ВРК; определение оптимальных геометрических

Таблица 1 – Физические свойства материалов матрицы и радиопоглощающего наполнителя

Table 1 – Physical Properties of Matrix Materials and Radio-Absorbing Filler

Наименование материала	Электрофизические свойства			Теплофизические свойства		
	$\text{tg}\delta$	ϵ'	ϵ''	Коэффициент теплопроводности λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	Удельная теплопроводность c , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	Плотность ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$
Эпоксидная смола ЭД-20	0,01–0,03	3–5	0,03–0,15	0,19–0,22	723	1190–1280
Фторопласт Ф-4	0,0002–0,0003	1,9–2,2	0,00038–0,00066	0,25	1040	2150–2224
Карбид кремния SiC	0,5–1,1	7,5–12	3,75–13,2	31	670	3200

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе математического моделирования исследовалось СВЧ-воздействие на образцы ВРК, расположенные в СВЧ-камере на базе прямоугольного волновода с поперечным сечением 45×90 мм. СВЧ-камера подключалась к СВЧ-генератору, работающему на частоте 2450 МГц. Для определения оптимальных геометрических размеров радиопоглощающих наполнителей и их расположения в матрице композита моделирование выполнялось при следующем расположении ВРК и плоского наполнителя:

- образец ВРК помещался в СВЧ-камеру волноводного типа в середине широкой стенки так, чтобы средняя плоскость ВРК находилась в зоне максимума напряженности электрического поля;
- плоский наполнитель располагался в объеме матрицы относительно векторов Пойнтинга \mathbf{S} и напряженности \mathbf{E} электрического поля в соответствии со схемами, приведенными на рис. 1.

Определение оптимального расположения поглощающего наполнителя в матрице

Критерием оптимальности расположения плоского слоя в матрице является достижение заданной максимальной температуры и скорости нагрева. Для решения данной задачи с помощью математического моделирования исследовано влияние расположения плоского наполнителя в объеме матрицы относительно векторов Пойнтинга \mathbf{S} и напряженности электрического поля \mathbf{E} . Приняты следующие исходные данные для плоского поглотителя из карбида кремния: толщина поглотителя $h = 3$ мм; максимальный

размеров радиопоглощающих наполнителей и их расположение в матрице композита; определение режима СВЧ-воздействия для достижения требуемой равномерности и скорости нагрева ВРК.

Первым этапом моделирования СВЧ-нагрева композиционных материалов в СВЧ-рабочих камерах является математическое описание процессов, происходящих в рассматриваемых образцах, которое включает систему взаимосвязанных уравнений электродинамики и теплопереноса с соответствующими граничными и начальными условиями [10]. Совместное решение указанных уравнений выполнялось с помощью метода конечных элементов, который был реализован в программе COMSOL Multiphysics® [19, 20]. Данный подход позволяет решать уравнения электродинамики и теплопереноса в трехмерной постановке и моделировать процессы СВЧ-нагрева ВРК с учетом свойств материалов матрицы и наполнителя и их изменения в процессе СВЧ-воздействия.

Таблица 1 – Физические свойства материалов матрицы и радиопоглощающего наполнителя

Table 1 – Physical Properties of Matrix Materials and Radio-Absorbing Filler

коэффициент диэлектрических потерь $\epsilon'' = 13,2$ (максимум поглощения СВЧ-энергии).

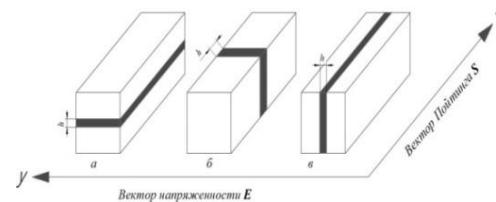


Рисунок 1 – Вид размещения плоского наполнителя в объеме матрицы: а – параллельно \mathbf{S} и \mathbf{E} ; б – перпендикулярно \mathbf{S} и параллельно \mathbf{E} ; в – параллельно \mathbf{S} и перпендикулярно \mathbf{E}

Figure 1 – Arrangement of the flat filler within the matrix volume: a – parallel to \mathbf{S} and \mathbf{E} ; b – perpendicular to \mathbf{S} and parallel to \mathbf{E} ; c – parallel to \mathbf{S} and perpendicular to \mathbf{E}

Рассматривалась полимерная матрица из материала фторопласт Ф-4 при минимальных значениях коэффициента диэлектрических потерь $\epsilon'' = 0,00038$. В результате расчетного моделирования установлена требуемая СВЧ-мощность $P = 300$ Вт и время воздействия $t = 60$ с, соответствующие предельным максимальным температурам фторопластовой матрицы. Результаты численного моделирования представлены в табл. 2 в виде температуры и скорости нагрева плоского наполнителя при различном расположении в объеме матрицы композита. На рис. 2–4 показаны также температурные поля в ВРК с различными вариантами расположения плоских наполнителей в соответствии с рис. 1.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2025

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ СВЧ-ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

Таблица 2 – Результаты моделирования температуры и скорости нагрева плоского наполнителя при различном расположении в объеме матрицы композита

Table 2 – Simulation results of temperature and heating rate of the flat filler with different arrangements within the composite matrix

Вид размещения плоского наполнителя в объеме матрицы	T_{\max} , °C	T_{\min} , °C	ΔT , °C	Скорость нагрева v , °C/c
В соответствии с рис. 1, а	581	102	479	9,4
В соответствии с рис. 1, б	336	309	27	5,2
В соответствии с рис. 1, в	36	33	3	0,2

Как видно из приведенных в табл. 1 данных и температурных полей в ВРК на рис. 2–4, расположение плоского поглощающего наполнителя в матрице ВРК относительно векторов Пойнтинга \mathbf{S} и напряженности электрического поля \mathbf{E} существенно влияет на максимальную температуру, ее распределение в композите и скорость нагрева. Это объясняется тем, что в зависимости от расположения плоского наполнителя разные его части находятся в зоне максимума напряженности электрического поля, величина которой влияет на интенсивность нагрева. При расположении плоского наполнителя в соответствии со схемой на рис. 1, а образец композита нагревается до более высокой температуры и с большей скоростью по сравнению с другими вариантами расположения в матрице. Максимальная температура наполнителя достигает 581 °C при скорости нагрева 9,4 °C/c, но при этом разница температуры в объеме поглотителя и матрицы получилась наибольшая $\Delta T = 102$ °C (рис. 2).

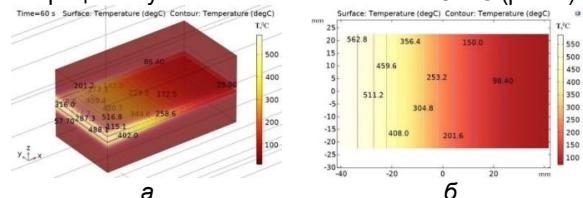


Рисунок 2 – Температурное поле в композите с плоским наполнителем (схема на рис. 1, а): а – в объеме композита; б – в сечении ух

Figure 2 – Temperature field in the composite with a flat filler (scheme in Fig. 1a): a - within the volume of the composite; b - in the yx cross-section.

При расположении плоского наполнителя по схеме, показанной на рис. 1, б, образец композита нагревается до максимальной температуры наполнителя 336 °C при скорости нагрева 5,2 °C/c, разница температуры в объеме поглотителя и матрицы составляет $\Delta T = 27$ °C (рис. 3).

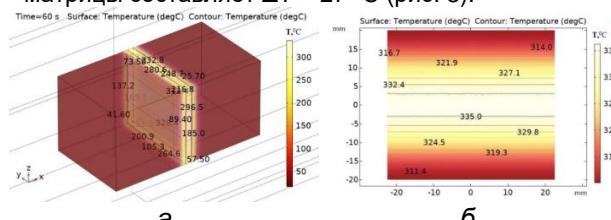


Рисунок 3 – Температурное поле в композите с плоским наполнителем (схема на рис. 1, б) а – в объеме композита; б – в сечении ух

Figure 3 – Temperature field in the composite with a flat filler (scheme in Fig. 1b): a - within the volume of the composite; b - in the yx cross-section

Для случая расположения плоского наполнителя по схеме, показанной на рис. 1, в, наблюдается минимальный нагрев образца композита при максимальной температуре наполнителя 36 °C, скорости нагрева 0,2 °C/c и разнице температуры в объеме поглотителя и матрицы $\Delta T = 3$ °C (рис. 4). Низкая эффективность нагрева обусловлена тем, что большая часть плоского поглощающего наполнителя находится вне зоны максимальной напряженности электрического поля волноводной СВЧ-камеры.

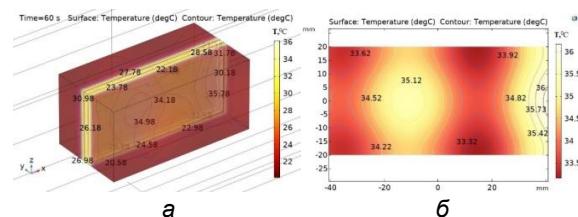


Рисунок 4 – Температурное поле в композите с плоским наполнителем (схема на рис. 1, б): а – в объеме композита; б – в сечении ух

Figure 4 – Temperature field in the composite with a flat filler (scheme in Fig. 1b): a - within the volume of the composite; b - in the yx cross-section.

По результатам моделирования установлен оптимальный вариант расположения плоского поглощающего наполнителя в матрице в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, б.

Влияние физических свойств матрицы, толщины плоского наполнителя и СВЧ-мощности на эффективность нагрева композита. При проведении исследования влияния физических свойств матрицы и СВЧ-мощности на диссиацию СВЧ-энергии и нагрев композита использовались следующие исходные данные:

– коэффициент диэлектрических потерь ϵ'' и плотность ρ материалов матрицы фторопласта Ф-4 и эпоксидной смолы (табл. 1) изменялись от минимальных до максимальных значений;

– СВЧ-мощность воздействия на образцы композитов изменялась в диапазоне от 300 Вт до 1200 Вт, время воздействия – 60 с;

– принят оптимальный вариант расположения плоского поглощающего наполнителя в матрице в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, б.

Результаты проведенного моделирования сведены в табл. 3 и табл. 4, в которых приведены данные о максимальных температурах нагрева поглотителя, температурах на границе раздела фаз наполнитель–матрица (Н/М) при различной СВЧ-мощности воздействия и при изменении коэффициента диэлектрических потерь ϵ'' и плотности ρ от минимальных до максимальных значений для материалов матриц из фторопласта и эпоксидной смолы. На рис. 5, 6, 7, 8 пока-

заны графики изменения температуры от времени в центральной точке композита с матрицами из фторопластика и эпоксидной смолы при различных СВЧ-мощностях. Для оценки влияния СВЧ-мощности и физических свойств материалов матрицы на распределение температуры в продольном сечении образца вдоль оси x построены соответствующие графические зависимости на рис. 9, 10, 11, 12, 13.

На основе проведенного анализа полученных результатов для образцов композитов с матрицей из фторопластика установлено следующее. При СВЧ-мощности 300 Вт за время нагрева 60 с температура поглотителя изменяется от 329 °C до 332 °C при минимальных и максимальных значениях коэффициента диэлектрических потерь и плотности соответственно (табл. 3). При мощности СВЧ-воздействия от 600 Вт и выше максимальная температура на границе раздела наполнитель–матрица равна 644 °C и выше, что превышает температуру деструкции фторопластовой матрицы. В диапазоне изменения СВЧ-мощности от 300 Вт до 1200 Вт максимальная температура поглотителя выше на 3–13 °C для ВРК с фторопластовой матрицей при максимальных значениях коэффициента диэлектрических потерь ϵ'' и плотности ρ (табл. 3).

Определена глубина нагрева фторопластовой матрицы в зависимости от СВЧ-мощности и физических свойств матрицы (рис. 9, 11). При минимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ фторопластовой матрицы в случае СВЧ-воздействия мощностью 600 Вт и 1200 Вт температура матрицы превышает 500 °C на расстоянии соответственно 0,8 мм и 2,3 мм от границы раздела фаз наполнитель–матрица. При максимальных значениях коэффициента потерь и плотности фторопластовой матрицы СВЧ-мощностей 600 Вт и 1200 Вт температура матрицы превышает 500 °C на расстоянии соответственно 0,5 мм и 2 мм от границы раздела фаз наполнитель–матрица. Таким образом, для образцов ВРК с фторопластовой матрицей изменение коэффициента диэлектрических потерь и плотности материала в рассматриваемом диапазоне от минимальных до максимальных значений существенно не влияет на распределение температуры в композите.

Для образцов композитов с матрицей из эпоксидной смолы установлено, что при СВЧ-мощности 300 Вт за время 60 с температура изменяется от 384 °C до 197 °C (табл. 3) при

Таблица 3 – Влияние физических свойств фторопластовой матрицы и СВЧ-мощности на максимальную температуру и скорость нагрева композита

Table 3 – Influence of the physical properties of the fluoroplastic matrix and microwave power on the maximum temperature and heating rate of the composite

СВЧ- мощность P , Вт	При минимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ			При максимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ		
	T_{\max} в объеме поглотителя, °C	T_{\max} на границе Н/М, °C	Скорость нагрева v , °C/c	T_{\max} в объеме поглотителя °C	T_{\max} на границе Н/М, °C	Скорость нагрева v , °C/c
300	329	28	5,2	332	331	5,2
600	645	644	10,4	651	650	10,5
900	985	963	15,8	974	972	15,9
1200	1282	1280	21,0	1295	1292	21,3

минимальных и максимальных значениях коэффициента диэлектрических потерь и плотности соответственно. При мощности СВЧ-воздействия от 600 Вт и выше максимальная температура на границе раздела наполнитель–матрица составляет от 381 °C до 756 °C, что превышает температуру деструкции матрицы из эпоксидной смолы. Определена глубина нагрева матрицы из эпоксидной смолы (рис. 10, 12). При минимальных значениях коэффициента потерь и плотности материала матрицы из эпоксидной смолы в случае СВЧ-воздействия мощностью 600 Вт и 1200 Вт температура матрицы превышает 500 °C на расстоянии соответственно 1,5 мм и 3,5 мм от границы раздела фаз наполнитель–матрица. При максимальных значениях коэффициента потерь и плотности матрицы при СВЧ-мощностях 900 Вт и 1200 Вт температура матрицы превышает 500 °C на расстоянии соответственно 0,5 мм и 1,4 мм от границы раздела фаз наполнитель–матрица.

Следовательно, для образцов ВРК с матрицей из эпоксидной смолы изменение коэффициента диэлектрических потерь и плотности материала в рассматриваемом диапазоне от минимальных до максимальных значений сильно влияет на распределение температуры в композите. Это объясняется тем, что при максимальном коэффициенте потерь в эпоксидной смоле $\epsilon''=0,15$ происходит существенное перераспределение поглощения СВЧ-энергии в композите, часть СВЧ-энергии поглощается в матрице, в наполнителе выделяется меньше тепловой энергии, поэтому его температура уменьшается (рис. 13). В этой связи для концентрации СВЧ-энергии в поглотителе рекомендуется применять матрицы с минимальными диэлектрическими потерями.

Проведено моделирование нагрева ВРК с целью определения оптимальной толщины плоского поглощающего наполнителя из карбида кремния при максимальном коэффициенте потерь $\epsilon''=13,2$. Наполнитель располагался в соответствии со схемой рис. 1, б в матрице из эпоксидной смолы с коэффициентом потерь $\epsilon''=0,15$. Толщина наполнителя варьировалась в пределах от 1 до 10 мм. СВЧ-мощность составляла 600 Вт, время воздействия – 60 с. В табл. 5 приведены результаты моделирования. Установлено, что при толщине плоского наполнителя от 1 до 4 мм наблюдаются высокие показатели диссипации СВЧ-энергии, при которых температура нагрева наполнителя превышает 600 °C при высокой скорости нагрева – 10–17 °C /с (табл. 5).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ СВЧ-ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

Таблица 4 – Влияние физических свойств эпоксидной матрицы и СВЧ-мощности на максимальную температуру и скорость нагрева композита

Table 4 – Influence of the physical properties of the epoxy matrix and microwave power on the maximum temperature and heating rate of the composite

СВЧ-мощность P , Вт	При минимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ			при максимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ		
	T_{\max} в объеме поглотителя, °C	T_{\max} на границе H/M, °C	Скорость нагрева v , °C/c	T_{\max} в объеме поглотителя, °C	T_{\max} на границе H/M, °C	Скорость нагрева v , °C/c
300	384	382	6,1	197	197	3,0
600	756	755	12,3	381	381	6,0
900	1131	1129	18,5	745	745	12,1
1200	1503	1502	24,7	749	749	12,1

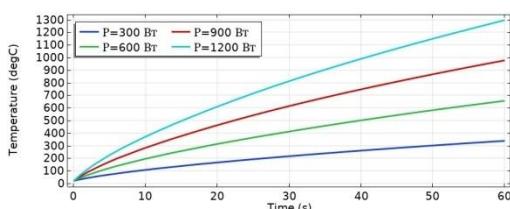


Рисунок 5 – Зависимость температуры от времени в центральной точке композита с матрицей из фторопласта при минимальных значениях ϵ'' и ρ
Figure 5 – Dependence of temperature on time at the central point of the composite with a fluoroplastic matrix at minimum values of ϵ'' and ρ

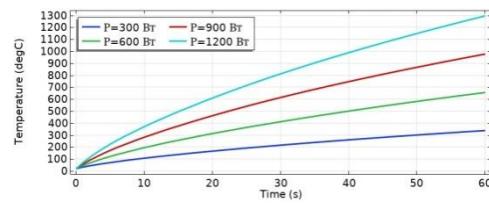


Рисунок 6 – Зависимость температуры от времени в центральной точке композита с матрицей из фторопласта при максимальных значениях ϵ'' и ρ
Figure 6 – Dependence of temperature on time at the central point of the composite with a fluoroplastic matrix at maximum values of ϵ'' and ρ

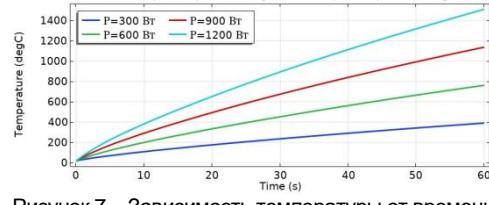


Рисунок 7 – Зависимость температуры от времени в центральной точке композита с матрицей из эпоксидной смолы при минимальных значениях ϵ'' и ρ
Figure 7 – Dependence of temperature on time at the central point of the composite with an epoxy resin matrix at minimum values of ϵ'' and ρ

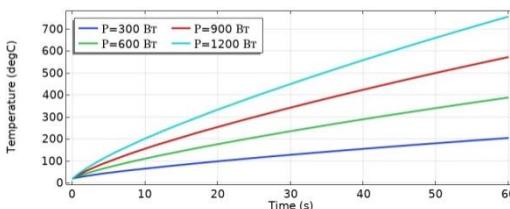


Рисунок 8 – Зависимость температуры от времени в центральной точке композита с матрицей из эпоксидной смолы при максимальных значениях ϵ'' и ρ
Figure 8 – Dependence of temperature on time at the central point of the composite with an epoxy resin matrix at maximum values of ϵ'' and ρ

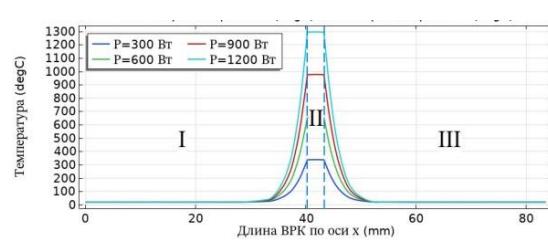


Рисунок 9 – Влияние СВЧ-мощности на распределение температуры в сечении образца вдоль оси x (для матрицы из фторопласта при минимальных значениях ϵ'' и ρ), где области I, III – матрицы; II – наполнитель

Figure 9 – Influence of microwave power on the temperature distribution in the cross-section of the sample along the x -axis (for a fluoroplastic matrix at minimum values of ϵ'' and ρ), where regions I and III represent the matrix and region II represents the filler

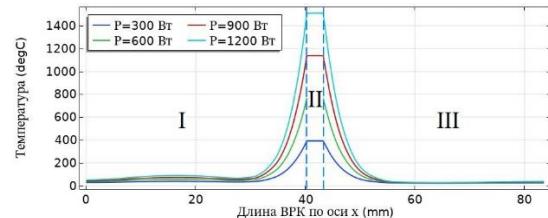


Рисунок 10 – Влияние СВЧ-мощности на распределение температуры в сечении образца вдоль оси x (для матрицы из эпоксидной смолы при минимальных значениях ϵ'' и ρ), где области I, III – матрицы; II – наполнитель

Figure 10 – Influence of microwave power on the temperature distribution in the cross-section of the sample along the x -axis (for an epoxy resin matrix at minimum values of ϵ'' and ρ), where regions I and III represent the matrix and region II represents the filler

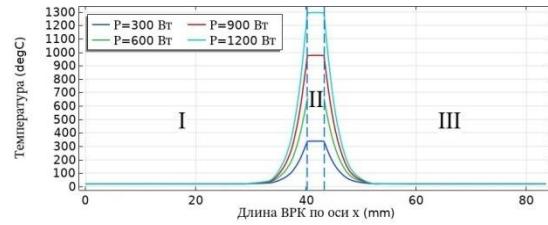


Рисунок 11 – Влияние СВЧ-мощности на распределение температуры в сечении образца вдоль оси x (для матрицы из фторопласта при максимальных значениях ϵ'' и ρ), где области I, III – матрицы; II – наполнитель

Figure 11 – Influence of microwave power on the temperature distribution in the cross-section of the sample along the x -axis (for a fluoroplastic matrix at maximum values of ϵ'' and ρ), where regions I and III represent the matrix and region II represents the filler

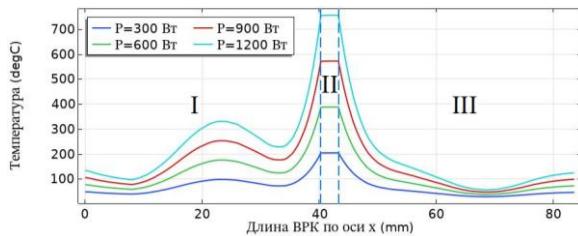


Рисунок 12 – Влияние СВЧ-мощности на распределение температуры в сечении образца вдоль оси x (для матрицы из эпоксидной смолы при максимальных значениях ϵ'' и ρ), где области I, III – матрицы; II – наполнитель

Figure 12 – Influence of microwave power on the temperature distribution in the cross-section of the sample along the x -axis (for an epoxy resin matrix at maximum values of ϵ'' and ρ), where regions I and III represent the matrix and region II represents the filler

ВЫВОДЫ

Разработана методика математического моделирования нагрева высокогенеретических радиопоглощающих композитов при воздействии СВЧ-энергии. Данный подход с использованием программной среды COMSOL Multiphysics позволяет решать систему уравнений электродинамики и теплопереноса в трехмерной постановке и моделировать процессы СВЧ-нагрева композитов с учетом изменения свойств материалов матрицы и наполнителя при СВЧ-воздействии.

В результате исследования процесса диссипации на основе проведенного математического моделирования определены оптимальные геометрические размеры радиопоглощающих наполнителей из карбида кремния и их расположение в матрице из фторопласта Ф-4 и эпоксидной смолы ЭД-20.

Таблица 5 – Влияние толщины плоского наполнителя на максимальную температуру и скорость нагрева

Table 5 – Influence of the flat filler thickness on the maximum temperature and heating rate

Толщина слоя наполнителя, мм	Объем наполнителя от общего объема образца, %	T_{\max} в слое наполнителя, °C	Скорость нагрева наполнителя v , °C/c
1	1,2	1055	17
2	2,4	951	16
3	3,6	754	12
4	4,8	599	10
6	7,1	406	9
8	9,5	319	5
10	11,9	288	4

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00796, <https://rscf.ru/project/24-29-00796/>».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Vedernikov, Yu.N., Fedotov, S.A., Smirnov, A.V., Avatinyan, G.A. & Parshikov, Yu.G. (2021). Synthesis of high-energy materials modified with nano-sized carbon and study of their sensitivity to laser radiation. Russian Chemical Journal. (3), 25-32. (In Russ.). doi: 10.6060/rcj.2021653.3.
2. Nikitin, S.A., Vinokurova, R.I. (2018). High-energy materials in technology and national economy. Scientific progress - creativity of young people. (1), 160-163. (In Russ.).
3. Gundawar, M.K. High-energy materials application. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. 2020. C. 401-419. doi:10.1016/b978-0-12-818829-3.00018-6.
4. Czajka, B., Sałaciński, T., Wachowski, L. & Maran, A. (2020). High energy materials (HEMs) – innovations with regard to the environment Materiały Wysokoenergetyczne. High Energy Materials. 75-89. doi: 10.22211/ matwys/0145E.
5. Ma, Y., Wang, Q., Schweidler, S., Botros, M., Fu, T., Breitung, B. & Horst, H. (2021). High-entropy energy materials: challenges and new opportunities. Energy & Environmental Science, 14(5), 2883-2905. doi:10.1039/d1ee00505g.
6. Komarova, M.V., Vakutin, A.G. & Vorozhtsov, A.B. (2016). Study of the properties of high-energy materials with iron oxalate and formate. Polzunovsky Bulletin. (4-1), 17-21. (In Russ.).
7. Perederin, Yu.V. (2013). Prediction of properties of high-energy composites using information technologies. Extended abstract of candidate's thesis. Biysk. (In Russ.).
8. Kalganova, S.G. (2009). Electrotechnology of non-thermal modification of polymer materials in a microwave electromagnetic field. Extended abstract of Doctor's thesis. Saratov. (In Russ.).

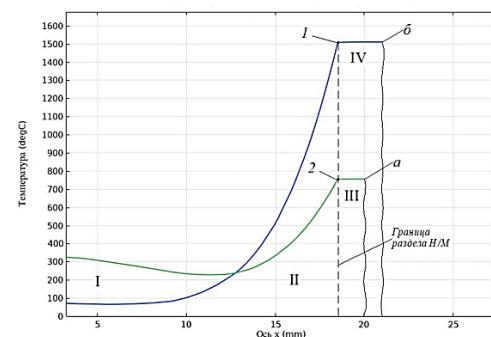


Рисунок 13 – Сравнение распределения температуры в объеме композита матрицей ЭД-20 при максимальных значениях коэффициента потерь ϵ'' и плотности ρ (график а) и минимальны значениях (график б), где области поглощения СВЧ-энергии: I, II – в матрице для (а) и (б) соответственно; III, IV – в наполнителе для (а) и (б) соответственно; 1, 2 – максимальные температуры на границах раздела фаз Н/М для (а) и (б) соответственно

Figure 13 – Comparison of temperature distribution in the volume of the composite with an ED-20 matrix at maximum values of loss factor ϵ'' and density ρ (graph a) and at minimum values (graph b), where regions of microwave energy absorption are as follows: I, II – in the matrix for (a) and (b) respectively; III, IV – in the filler for (a) and (b) respectively; 1, 2 – maximum temperatures at the phase boundary N/M for (a) and (b) respectively

Установлено, что для ВРК с матрицей из эпоксидной смолы с плоским наполнителем из карбида кремния толщиной 1–4 мм, расположенным в волноводной СВЧ-камере перпендикулярно вектору Пойнティングа и параллельно вектору напряженности электрического поля, при СВЧ-мощности 600 Вт и времени воздействия 60 с достигается требуемая скорость нагрева 10–17 °C /с и заданная равномерность температурного поля в наполнителе не выше 30 °C.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССИПАЦИИ СВЧ-ЭНЕРГИИ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

9. Ritter, D.V. (2010). Microwave heating of extended dielectric objects by the field of a surface waveguide. Extended abstract of candidate's thesis. Omsk. (In Russ.).
10. Trigorly, S.V. (2000). Numerical modeling and optimization of processes of ultra-high-frequency heat treatment of dielectrics. Applied mechanics and technical physics. (1) 239). 112-119. (In Russ.).
11. Rybkov, V.S. (2008). Increasing the uniformity of heating of dielectrics in microwave resonator-type installations with distributed excitation systems. Extended abstract of candidate's thesis. Saratov. (In Russ.).
12. Bardin, A.N., Gorbunova, I.Yu., Polunin, S.V., Koval'evich, V.V. & Morozova, P.A. (2021). Study of the thermo-physical, rheological and physicomechanical properties of an epoxy binder modified with polycarbonate. Advances in chemistry and chemical technology. (7), 7-9. (In Russ.).
13. Irzhak, V.I. (2021). Epoxy polymers and nanocomposites. Chernogolovka: "Editorial and Publishing Department of the IPCP RAS". (In Russ.).
14. Shved, E.N., Sinelnikova, M.A. & Bespalko, Yu.N. (2011). Epoxy compositions of "cold" anhydride curing based on ED-20. Plastics. (10), 8-10. (In Russ.).
15. Baskin, Z.L., Shabalin, D.A., Vyrazheikin, E.S. & Dedov, S.A. (2008). Range, properties and application of fluoropolymers of the Kirovo-Chepetsk Chemical Plant. Russian Chemical Journal. (3), 13-23. (In Russ.).
16. Sytyy, Yu.V., Chursova, L.V., Khatipov, S.A. & Sagonomova, V.A. (2012). Properties and application of radiation-modified fluoroplastic F-4RM. Aviation materials and technologies. (4), 48-55. (In Russ.).
17. Shelestova, V.A., Evseeva, L.E., Leshchenko, V.G., Nikolaeva, K.V., Danilova-Tretyak, S.M., Bashlakova, A.L. & Ivanov, L.F. (2021). Influence of ultrafine silicon carbide on the structure and properties of fluoroplastic composites. Polymer materials and technologies. (2), 80-88. (In Russ.).
18. Starokadomsky, D.L. (2019). Possibility of creating fire-resistant, heat-strengthened and thermoplasticized at 250°C epoxy-composite plastics with microdispersions of SiC, TiN and cement. Plastics. (5), 40-43. (In Russ.).
19. Bekeshev, A., Vasinkina, E., Kalganova, S., Trigorly, S., Kadykova, Y., Mostovoy, A., Shcherbakov, A., Zhantrina, N. & Lopukhova, M. (2023). Modeling of the Modification Process of an Epoxy Basalt-Filled Oligomer in Traveling Wave Microwave Chambers. Journal of Composites Science, 7(9), 392. DOI: 10.3390/jcs7090392.
20. Trigorly, S., Yakovlev, A., Kalganova, S., Sivak, A., & Kadykova, Y. (2022). Mathematical Simulation of Electrodynamic and Thermal Processes in Electrical Process Plants. Lecture Notes in Mechanical Engineeringthis, 131-141. DOI: 10.1007/978-981-16-9376-2_13.

Информация об авторах

А. С. Сивак – к.т.н., старший научный сотрудник АО «НПП «Контакт».

С. Г. Калганова – д.т.н., начальник научно-исследовательской лаборатории АО «НПП «Контакт».

Ю. А. Кадыкова – д.т.н., главный научный сотрудник АО «НПП «Контакт».

С. В. Тригорлы́й – к.т.н., ведущий научный сотрудник АО «НПП «Контакт».

Т. П. Сивак – младший научный сотрудник АО «НПП «Контакт».

Е. Ю. Васинкина – к.т.н., ведущий научный сотрудник АО «НПП «Контакт».

Information about the authors

A.S. Sivak - Ph.D., leading scientific employee of JSC «SPE «Kontakt».

S.G. Kalganova - Doctor of Technical Sciences, Head of the research laboratory of JSC «SPE «Kontakt».

Yu.A. Kadykova - Doctor of Technical Sciences, chief scientific employee of JSC «SPE «Kontakt».

S.V. Trigorly - Ph.D., leading scientific employee of JSC «SPE «Kontakt».

T.P. Sivak - is a junior researcher at JSC «SPE «Kontakt».

E.Yu. Vasinkina - Ph.D., leading scientific employee of JSC «SPE «Kontakt».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 628.16

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.027

EDN: IJMIJH

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕАГЕНТНОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ КРАСИТЕЛЕЙ

Светлана Владимировна Степанова ¹, Ильдар Гильманович Шайхиев ²,
Владимир Александрович Сомин ³

^{1,2} Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

¹ ssvkan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4831-313X>

² ildars@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9160-0412>

³ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

³ vladimir_somin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3276-5174>

Аннотация. Окрашенные сточные воды образуются в промышленном производстве на многих предприятиях из-за попадания в их состав различных красителей. Особенно большой объем окрашенных стоков наблюдается при крашении тканей и кожи на предприятиях легкой промышленности. Сточные воды, содержащие красители, имеют высокие значения ХПК из-за значительного содержания в них органических веществ и не могут быть сброшены на биологические очистные сооружения из-за угрозы гибели биоценоза микроорганизмов активного ила. Данное обстоятельство требует локальной очистки окрашенных сточных вод в местах образования. Нами исследована возможность очистки интенсивно окрашенных стоков ООО «Эгид» г. Казань с использованием различных методов. Первоначально проводилось разбавление окрашенных стоков технической водой в соотношении 1:50 и последующая окислительная деструкция органических соединений реагентом Фентона. Определены оптимальные соотношения реагентов, при которых достигается наибольшее снижение значений ХПК: 40 см³ 10 %-ного раствора FeSO₄ и 200 см³ 30 %-ного раствора H₂O₂ на 1 дм³ очищаемой сточной жидкости. Проведена нейтрализация окисленной сточной жидкости 5 %-ным раствором гидроксида натрия и последующей фильтрацией образующегося осадка гидроксида железа. Выявлено, что использование суспензии гидроксида кальция технологически не оправдано из-за большого объема образующегося трудноутилизируемого осадка. Доочистка нейтрализованного стока проводилась под действием биоценоза микроорганизмов активного ила, позволившая обесцветить сточную жидкость и использовать ее в качестве технической воды для разбавления исходной окрашенной жидкости. Предложена технологическая схема разработанного процесса комбинированной очистки сильноокрашенных сточных вод.

Ключевые слова: сточные воды, красители, окисление, нейтрализация, биологическая доочистка, технологическая схема очистки.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования: Степанова С. В., Шайхиев И. Г., Сомин В. А. Усовершенствование технологии реагентной очистки сточных вод от красителей // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 220–224. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.027. EDN: <https://elibrary.ru/IJMIJH>.

Original article

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR REAGENT TREATMENT OF WASTEWATER FROM DYES

Svetlana S. Stepanova ¹, Ildar G. Shaikhiev ², Vladimir A. Somin ³

^{1,2} Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia

¹ ssvkan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4831-313X>

² ildars@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9160-0412>

³ Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia,

³ vladimir_somin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3276-5174>

Abstract. Colored wastewater is formed in industrial production at many enterprises due to the ingress of various dyes into their composition. A particularly large volume of colored effluents is observed in the dyeing of fabrics and leather at light industry enterprises. Wastewater containing dyes has high COD values due to the significant content of organic substances in them and cannot be discharged to biological treatment plants due to the threat of death of the biocenosis of microorganisms of activated sludge. This circumstance requires local treatment of colored wastewater in the places of formation. We have investigated the possibility of cleaning intensely colored wastewater from Egida LLC, Kazan using various methods. Initially, the dilution of colored wastewater with industrial water in a ratio of 1:50 was carried out and the subsequent oxidative degradation of organic compounds with Fenton's reagent. The optimal ratios of reagents have been determined, at which the greatest reduction in COD values is achieved: 40 cm³ of a 10% FeSO₄

© Степанова С. В., Шайхиев И. Г., Сомин В. А., 2025

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕАГЕНТНОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ КРАСИТЕЛЕЙ

solution and 200 cm³ of a 30% H₂O₂ solution per 1 dm³ of the treated wastewater. The oxidized wastewater was neutralized with a 5% sodium hydroxide solution and subsequent filtration of the resulting iron hydroxide precipitate. It was revealed that the use of a suspension of calcium hydroxide is technologically unjustified due to the large volume of the resulting difficult-to-recycle sludge. After-treatment of the neutralized runoff was carried out under the action of a biocenosis of microorganisms of activated sludge, which allowed the wastewater to discolor and use it as process water to dilute the original-colored liquid. The technological scheme of the developed process of combined purification of highly colored wastewater is proposed.

Keywords: wastewater, dyes, oxidation, neutralization, biological post-treatment, technological scheme of purification.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to his / her colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.

For citation: Stepanova, S. V., Shaikhiev, I. G. & Somin, V. A. (2025). Improvement of technology for reagent treatment of wastewater from dyes. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 220-224. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.027. EDN: <https://elibrary.ru/IJMIJH>.

ВВЕДЕНИЕ

Окрашенные сточные воды (СВ) образуются в промышленном производстве на многих предприятиях из-за попадания в их состав различных красителей. Особенно большой объем окрашенных стоков наблюдается при крашении тканей и кожи на предприятиях легкой промышленности [1, 2]. Отличительной чертой таких сточных вод является наличие в их составе кроме красителей также различных химических соединений, таких как кислот и щелочей, дeterгентов и др. Кроме того, отличительной чертой окрашенных сточных вод является неравномерность образования последних и значительные колебания концентрации растворителей.

В этой связи при отведении таких вод в городскую канализацию, как правило, требуется их предварительная локальная очистка на сооружениях, имеющихся на предприятиях с целью снижения концентрации при подаче на биологические очистные сооружения.

Все известные в литературе методы физико-химической очистки рассматриваемой категории СВ можно разделить на три основные группы [3–5].

Первая группа методов обеспечивает извлечение загрязнений переводом их в осадок или флотошлам путем сорбции на хлопьях гидроксидов металлов, образующихся при коагуляционной обработке сточных вод [6, 7]. Методам этой группы (коагуляции, реагентной напорной флотации, электрокоагуляции и др.) присущи следующие недостатки: невысокая степень очистки, особенно по обесцвечиванию; необходимость эмпирического подбора реагентов или материала электродов, что усложняет обработку смеси стоков с часто изменяющимся составом; сложность в автоматизации дозировки реагентов; образование значительного количества влажных осадков или флотошлама; необходимость складирования или захоронения, что не исключает загрязнения почвы и подземных водоносных слоев [3].

Вторая группа включает сепаративные методы, такие, как адсорбция на активных углях [8, 9] и макропористых ионитах [10], мембранные технологии [11, 12], пенная сепарация [13], электрофильтрация [14]. Данные методы, за исключением двух последних, обеспечивают высокую степень очистки сточных вод, но требуют предварительной механико-химической обработки с целью удаления нерастворимых примесей. Кроме того, они сложны в аппаратурном оформлении и имеют высокую себестоимость очистки. Применение их оказывается рентабельным в технологических системах замкнутого водоснабжения промышленных предприятий [13].

Третья группа объединяет деструктивные методы, основанные на глубоких превращениях органических молекул в результате редокс-процессов. Эти методы обладают рядом преимуществ по сравнению с вышерассмотренными группами методов. Их отличительной чертой является высокая эффективность очистки, технологичность, компактность и простота автоматизации и управления процессами. Из деструктивных методов наиболее широкое применение находит очистка сточных вод от красителей с использованием различных окислителей (O₂, O₃, H₂O₂, H₂SO₄ и др.) [15–18]. Также высокую эффективность разложения красителей показали методы реагентной восстановительно-окислительной [19], электрохимической [20, 21] и электрокаталитической деструкции [22].

Вышеназванные методы очистки, как правило, находят применение для предварительной очистки окрашенных стоков. К недостаткам относятся относительно высокая стоимость обработки СВ, большой расход реагентов и объем образующихся осадков, трудность регулирования процесса [23].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения исследований по разработке технологии очистки окрашенных сточных вод, применялась сточная жидкость, образующаяся на ООО «Эгида». Исследуемая сточная вода содержала большое количество взвешенных веществ и имела темно-синюю окраску.

Таблица 1 – Параметры исходной разбавленной сточной воды

Table 1 – Parameters of initial wastewater

Параметр, размерность	Показатели
pH	4,17±0,05
Сухой остаток, мг/дм ³	12,0±0,09
ХПК, мгO/дм ³	418,88±1,21
Содержание, мг/дм ³ :	
ионов NO ₂ ⁻	0,96±0,01
ионов NO ₃ ⁻	2,40±0,05
ионов NH ₄ ⁺	1,11±0,05
ионов SO ₄ ²⁻	0,18±0,01
ионов Cl ⁻	20,84±0,05
Железа общего	1,02±0,01

В силу того, что исходный сток очень мутный и имеет интенсивный темно-синий окрас, для проведения экспериментов он разбавлялся в 50 раз. Некоторые параметры разбавленного стока приведены в таблице 1.

Методы исследования, применяемые при анализе компонентов сточных вод: титриметрический, гравиметрический, ионометрический, спектрофотометрический.

По данным таблицы 1, очевидно, что исходная неразбавленная сточная жидкость имеет высокие показатели значений ХПК, содержания нитрит-, нитрат- сульфат- хлорид-ионов и ионов аммония, а также общего железа, что не позволяет ее даже в общезаводской коллектор. Высокое значение ХПК разбавленного стока объясняется наличием в стоке большого количества органических соединений (красители, ПАВ).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первоначально предполагалось провести деструктивное окисление органических соединений, содержащихся в стоке, с использованием озона-воздушной смеси. Озон, являясь самым сильным окислителем, эффективно окисляет и разлагает красители, обесцвечивая окрашенные стоки [24–26]. Однако, как показали предварительные исследования, метод озонирования оказался непригоден ввиду интенсивного пенообразования из-за содержащихся в сточной жидкости ПАВ.

В этой связи в последующем исследовалась возможность окислительного разложения органических красителей и других реагентов, содержащихся в сточной жидкости с использованием процесса Фентона. Последний осуществляется введением в очищаемые сточные жидкости раствора перекиси водорода и сульфата железа (II) в качестве катализатора [27–29].

Ход проведения экспериментов заключался в следующем:

В шесть мерных цилиндров наливали разбавленную сточную воду объемом по 50 см³, в которые далее вводилось по 1 см³ 30 % раствора H₂O₂, а также по 1–

Таблица 3 – Результат очистки промышленных сточных вод в условиях процесса Фентона с варьированием раствора перекиси водорода

Table 3 – The result of industrial wastewater treatment under the conditions of the Fenton process with varying hydrogen peroxide solution

Объем 10 % раствора FeSO ₄ ·7H ₂ O, см ³ /50 см ³	Объем 30 % раствора H ₂ O ₂ , см ³ /50 см ³	ХПК, мгO/дм ³	pH
Исходный сток	–	418,88±1,21	4,17±0,05
2	1	363,76±1,21	3,27±0,05
2	2	288,96±1,21	2,45±0,05
2	5	150,40±1,01	2,44±0,05
2	10	125,60±1,01	2,55±0,05

Как следует из приведенных в таблице 3 данных, оптимальным видится использование 100 см³/дм³ сточной воды 30 % раствора H₂O₂. Двойное увеличение дозировки раствора пероксида водорода не способствует значительному снижению значений ХПК, но повышает стоимость очистки, что в реальных производственных условиях не всегда приемлемо.

Кроме того, как следует из приведенных в таблице 3 данных, величина pH очищаемой жидкости снизилась с pH = 4,17 до pH = 2,44. Для подачи на дальнейшую переработку возникает необходимость нейтрализации очищаемой сточной жидкости до нейтральной среды. Проведенными впоследствии экспериментами отклонена обработ-

3 см³ 10 % раствора FeSO₄·7H₂O. Наблюдалось постепенное обесцвечивание содержащегося сосудов с одновременным повышением температуры, что свидетельствовало о протекании окислительного процесса. Через 60 минут после начала эксперимента осветленные сточные воды отфильтровывались от образующегося осадка и определялись значения pH и ХПК раствора. Полученные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты очистки промышленных сточных вод по реакции Фентона

Table 2 – Results of industrial wastewater treatment using the Fenton reaction

Количество введенного 30 % раствора H ₂ O ₂ , см ³ /50 см ³	Объем 10 % раствора FeSO ₄ ·7H ₂ O, см ³ /50 см ³	Значение ХПК, мгO/дм ³	pH
исходный	–	418,88±1,21	4,17±0,05
1	1	318,76±1,52	2,10±0,05
1	2	122,60±1,15	2,01±0,05
1	3	143,28±1,24	1,99±0,05

Как следует из приведенных в таблице 2 данных, наибольшее снижение значений ХПК наблюдалось при введении в очищаемую воду 40 см³/дм³ 10 %-ного раствора FeSO₄. Для определения оптимальной дозировки 30 %-ного раствора H₂O₂ в последующем также проводилась серия экспериментов с варьированием количества названного реагента в объеме 20–200 см³/дм³ сточной жидкости. Дозировка 10 % раствора сульфата железа (II), как отмечалось выше, составила 40 см³/дм³ в каждом эксперименте. Также наблюдалось обесцвечивание сточной жидкости с повышением температуры, причем с увеличением дозировки перекиси водорода конечное значение температуры также становилось более высоким, достигая значения 55 °C. Полученные значения ХПК и pH приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результат очистки промышленных сточных вод в условиях процесса Фентона с варьированием раствора перекиси водорода

Table 3 – The result of industrial wastewater treatment under the conditions of the Fenton process with varying hydrogen peroxide solution

Объем 10 % раствора FeSO ₄ ·7H ₂ O, см ³ /50 см ³	Объем 30 % раствора H ₂ O ₂ , см ³ /50 см ³	ХПК, мгO/дм ³	pH
Исходный сток	–	418,88±1,21	4,17±0,05
2	1	363,76±1,21	3,27±0,05
2	2	288,96±1,21	2,45±0,05
2	5	150,40±1,01	2,44±0,05
2	10	125,60±1,01	2,55±0,05

ка сточной жидкости сусpenзией Ca(OH)₂ ввиду образования большого объема осадка. В этой связи в дальнейшем проводилась нейтрализация сточной воды 5 %-ным раствором NaOH до достижения значений pH ~ 8–9. При этом наблюдалось выпадение в осадок сусpenзии Fe(OH)₃, которая удалялась фильтрованием. В результате процесса нейтрализации содержание общего железа в сточной жидкости уменьшилось с 1,02 мг/дм³ до 0,16 мг/дм³, а значение ХПК незначительно уменьшилось до pH = 135,2 мг/дм³.

С целью дальнейшей очистки сточной жидкости ООО «Эгид» решено использовать биологическую доочистку для уменьшения содержания органических соединений. В качестве источника

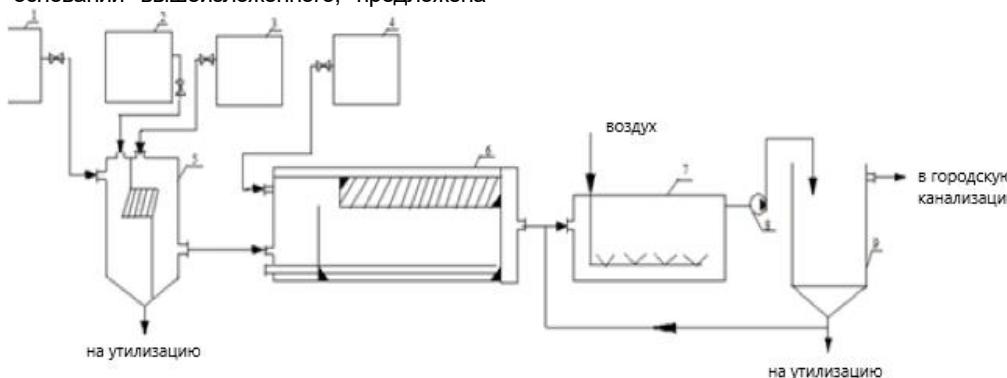
ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2025

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕАГЕНТНОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ КРАСИТЕЛЕЙ

микроорганизмов была взята суспензия активного ила с биологических очистных сооружений ПАО «Казаньоргсинтез». Исследование проводилось путем внесения в колбу объемом 250 см³ очищаемой сточной жидкости и суспензии активного ила в соотношении 1:1. Перемешивание проводилось на шейкере в течение 16 часов. По окончании указанного периода времени активный ил отфильтровывался, а в очищаемой сточной жидкости определялись некоторые показатели. Результаты анализов представлены в таблице 4.

Исходя из результатов таблицы 4, определено, что биологическая стадия очистки дала значительное результат в части снижения значений ХПК. Степень очистки с учетом разбавления исходной сточной воды составила 99,9 % по значению ХПК.

На основании вышеизложенного, предложена



1 – емкость с предварительно разбавленной СВ; 2 – емкость с раствором $FeSO_4 \cdot 7H_2O$; 3 – емкость с раствором H_2O_2 ; 4 – емкость с щелочным реагентом; 5 – камера усреднения и отстаивания; 6 – камера хлопьеобразования; 7 – аэротенк; 8 – центробежный насос; 9 – вторичный отстойник
Рисунок 1 – Принципиальная схема технологии комплексной очистки сточной воды от красителей текстильного производства

1 - container with pre-diluted SW; 2 - container with $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ solution; 3 - container with H_2O_2 solution; 4 - container with alkaline reagent; 5 - averaging and settling chamber; 6 - flocculation chamber; 7 - aeration tank; 8 - centrifugal pump; 9 - secondary settling tank

Figure 1 – Schematic diagram of the technology for complex treatment of wastewater from textile dyes

Согласно принципиальной схемы, представленной на рисунке 1, предварительно разбавленная сточная вода, содержащая текстильные красители, поступает в камеру усреднения и отстаивания 5, куда с помощью дозатора из емкости 2 направляется 10 % раствор $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, дозатором из емкости 3 направляется 34 % раствор H_2O_2 . В камере 5 проходит процесс Фентона с выделением тепла, максимальная температура системы при этом достигает 55 °C. Далее сточная вода отстаивается и направляется на стадию очистки в камеру хлопьеобразования 6, а образовавшийся осадок – на утилизацию.

В зону смешения камеры хлопьеобразования 6 из емкости 4 с помощью дозатора поступает щелочной реагент. Пройдя зону хлопьеобразования, обрабатываемая вода поступает в зону осаждения, где происходит выпадение на дно сформировавшихся хлопьев. Осветленная вода выводится системой слива из сооружения, а выпавшие на дно взвешенные вещества удаляются системой сбора за пределы сооружений.

Пройдя аппарат 6, сточная жидкость поступает на биологическую очистку – аэротенк 7, где происходит аэробная доочистка сточной воды.

принципиальная технологическая схема очистки окрашенных сточных вод ООО «Эгид» (рисунок 1).

Таблица 4 – Результат анализа после биологической стадии очистки сточных вод

Table 4 – The result of the analysis of the field of the last biological stage of wastewater treatment

Наименование параметра	Показатели
pH	8,59
ХПК, мгО/дм ³	58,8
Содержание, мг/дм ³ :	
- ионов NO_2^-	1,37
- ионов NO_3^-	1,51
- ионов NH_4^+	2,10
- ионов SO_4^{2-}	208,38
- ионов Cl^-	19,85
- общего железа	0,163

После отстаивания в отстойнике 8 часть ила идет на рециркуляцию, а очищенная вода направляется в начало процесса для разбавления исходной сточной жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью выявления эффективных средств очистки окрашенных сточных вод на примере предприятия ООО «Эгид» изучена и разработана технология очистки сточных вод текстильного производства путем использования нескольких стадий: разбавления СВ, окисления реагентом Фентона, реагентной очисткой, нейтрализацией и биологической доочисткой с использованием консорциума микроорганизмов активного ила. Степень очистки после последней стадии с учетом разбавления исходной сточной воды составила 99,9 % по значению ХПК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Removal of colorants from wastewater: A review on sources and treatment strategies / K.G. Pavithra, P.S. Kumar, V. Jaikumar, P.S. Rajan // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2019. Vol. 75. P. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.02.011>.
2. Mokif L.A. Removal methods of synthetic dyes from industrial wastewater: a review // Mesopotamia Environmental Journal.

2019. Vol. 5. No 1. P. 23-40. <https://doi.org/10.31759/mej.2019.5.1.0040>.
3. Katheresan V., Kansedo J., Lau S.Y. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2018. Vol. 6. No 4. P. 4676-4697. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>.
4. A review on recent advances in the treatment of dye-polluted wastewater / M. Shabir, M. Yasin, M. Hussain [et al.] // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2022. Vol. 112. P. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.05.013>.
5. A critical review on advances in the practices and perspectives for the treatment of dye industry wastewater / T. Shindhal, P. Rakholiya, S. Varjani [et al.] // Bioengineered. 2021. Vol. 12. No. 1. P. 70-87. <https://doi.org/10.1080/21655979.2020.1863034>.
6. Performance of different coagulants in the coagulation/flocculation process of textile wastewater / J. Dotto, M.R. Fagundes-Klen, M.T. Veit [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 208. P. 656-665. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.112>.
7. Verma A.K., Dash R.R., Bhunia P. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters // Journal of Environmental Management. 2012. Vol. 93. No. 1. P. 154-168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.012>.
8. Ho S. Removal of dyes from wastewater by adsorption onto activated carbon: Mini review // Journal of Geoscience and Environment Protection. 2020. Vol. 8. No. 5. P. 120-131. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.85008>.
9. A review on activated carbon modifications for the treatment of wastewater containing anionic dyes / K. Azam, N. Shezad, I. Shafiq [et al.] // Chemosphere. 2022. Vol. 306. Article 135566. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135566>.
10. Нестерова Л.А., Кондратюк Л.Н., Сарыбеков Г.С. Разработка технологии очистки сточных вод после процесса крашения текстильных материалов активными красителями // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т.5. № 6(47). С. 35-37.
11. Moradihamedani P. Recent advances in dye removal from wastewater by membrane technology: a review // Polymer Bulletin. 2022. Vol. 79. No. 4. P. 2603-2631. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03603-2>.
12. Ezugbe E.O., Rathilal S. Membrane technologies in wastewater treatment: a review // Membranes. 2020. Vol. 10. No. 5. Article 89. P. 1-28. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>.
13. Сатыбалдиева Ж.К., Садыгалиева Г.К. Очистка промышленных сточных вод от красителей // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2011. № 1. С. 140-144.
14. Meertens W. Wastewater treatment using a novel combined electro-oxidation, electro-coagulation, and electro-filtration process. A thesis for the degree of master of applied science. Concordia University. Montreal, Canada. 2020. 62 p.
15. Shikuku V.O., Nyairo W.N. Advanced oxidation processes for dye removal from wastewater // Impact of textile dyes on Public Health and the Environment. 2020. P. 205-238.
16. Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater // A. Ahmad, S.H. Mohd-Setapar, C.S. Chuong [et al.] // RSC Advances. 2015. No. 5(39). P. 30801-30818.
17. Ануфриев В.Н. Очистка сточных вод предприятий текстильной промышленности // Экология. 2015. № 1(43). С. 87-96.
18. Roy M., Saha R. Dyes and their removal technologies from wastewater: A critical review // Intelligent Environmental Data Monitoring for Pollution Management, (2021). 127-160.
19. Liu X., Wang J. Decolorization and degradation of various dyes and dye-containing wastewater treatment by electron beam radiation technology: an overview // Chemosphere. 2024. Vol. 351. Article 141255. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141255>.
20. Мирзалимова С.А., Киршина Е.Ю., Мухамедиев М.Г. Использование метода электрохимической деструкции для очистки сточных вод от активного красителя Red SPD // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 4. С. 86-99.
21. Электрохимическое окисление красителей на оксидносвинцовом аноде с участием активных форм кислорода // Г.В. Корниенко, Т.А. Кенова, В.Л. Корниенко [и др.] // Журнал прикладной химии. 2017. Т. 90. № 8. С. 1001-1006.
22. Деструкция красителя дисперсного синего 56 электрокаталитическим и фотокаталитическим методами и обнаружение промежуточных продуктов реакции // Н. Zhao, L. Sun, H. Zhong [et al.] // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 8. С. 63-69.
23. Галафеев В.А. Разрушение органических красителей в сточных водах деструктивными методами // Вестник КГТУ им. Н.А. Некрасова. 2007. № 2. С. 13-17.
24. Юсупов А.А., Алибекова М. Характеристики и методы очистки сточных вод текстильной полиграфической и красильной промышленности в городе Андижан // Universum: технические науки. 2024. № 6(123). С. 38-43.
25. Исаев А.Б. & Магомедова А.Г. Новые технологии очистки сточных вод от красителей на основе окислительных процессов // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2022. Т. 63. № 4. С. 247-268.
26. Tehrani-Bagha A.R., Mahmoodi N.M., Menger F.M. Degradation of a persistent organic dye from colored textile wastewater by ozonation // Desalination. 2010. Vol. 260. No 1-3. P. 34-38.
27. Методы удаления пигментов из сточных вод / Д.М. Кадер, Н.В. Алексеева, Б.Г. Ибрахим, Т.В. Саад // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 7. С. 54-64.
28. Nidheesh P.V., Gandhimathi R., Ramesh S.T. Degradation of dyes from aqueous solution by Fenton processes: a review // Environmental Science and Pollution Research. 2013. Vol. 20. P. 2099-2132.
29. A review on the treatment of textile industry effluents through Fenton processes / M.D.N. Ramos, C.S. Santana, C.C.V. Velloso [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 155. P. 366-386.
30. Комарова Л.Ф., Попетаева М.А. Использование воды на предприятиях и очистка сточных вод в различных отраслях промышленности : учеб. пособие. Барнаул : Изд-во АлтГТУ. 2010. 174 с.

Информация об авторах

С. В. Степанова – д.т.н., профессор кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

И. Г. Шайхиев – д.т.н., профессор кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

В. А. Сомин – д.т.н., доцент, заведующий международной кафедрой ЮНЕСКО «Инженерная экология» Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова.

Information about the authors

S. V. Stepanova – Doctor of Technical Sciences, Professor - Department of "Engineering Ecology" of Kazan National Research Technological University.

I. G. Shaikhiev - Doctor of Technical Sciences, Professor - Department of "Engineering Ecology" of Kazan National Research Technological University.

V. A. Somin is a Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of UNESCO International Department of Engineering Ecolog 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 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 534.131

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.028

EDN: JVUOZV

НАПРАВЛЕННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СРЕД

Владимир Николаевич Хмелёв¹, Андрей Викторович Шалунов²,
Сергей Николаевич Цыганок³, Александр Андреевич Синкин⁴

^{1, 2, 3} Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

¹ vnh@btu.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

² shalunov@btu.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

³ grey@btu.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7832-3510>

⁴ vip.sinkin@inbox.ru

Аннотация. Статья посвящена созданию высокоеффективных ультразвуковых излучателей для газовых сред с увеличенным уровнем формируемого звукового давления и узкой диаграммой направленности. Необходимость создания такого излучателя определяется существованием большого числа технологических процессов, для интенсификации которых необходимо формировать направленное звуковое излучение с уровнем звукового давления более 150 дБ, на расстоянии более метра от излучателя. К сожалению, существующие ультразвуковые излучатели не обеспечивают необходимые уровни звукового давления из-за низкого акустического импеданса газовых сред, и взаимной компенсации излучения формируемого участками излучателя, колеблющимися в противофазе. В рамках исследования была предложена конструкция излучателя, состоящая из пьезоэлектрического преобразователя и диска переменного сечения. Для формирования узкой диаграммы направленности, использования излучения тыльной стороны диска и исключения взаимной компенсации колебаний были разработаны отражатели и фазовыравнивающие конусы. Для определения характеристик созданного излучателя были проведены измерения звукового давления и диаграммы направленности при различных конфигурациях: без дополнительных устройств, с отражателем, с отражателем и фазовыравнивающими конусами. Результаты исследования показали, что применение отражателя увеличивает уровень звукового давления на 3–3.5 дБ, а добавление фазовыравнивающих конусов позволяет достичь давления, близкого к 150 дБ, и уменьшить угол основного лепестка диаграммы направленности до ± 4 градусов. Таким образом, предложенная конструкция существенно улучшает эффективность излучателя, направляя большую часть энергии в основной лепесток и увеличивая дальность действия ультразвукового излучения.

Ключевые слова: бесконтактное воздействие, уровень звукового воздействия, ультразвук высокой интенсивности.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00900, <https://rscf.ru/project/24-19-00900/>.

Для цитирования: Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Цыганок С. Н., Синкин А. А. Направленный ультразвуковой излучатель для газовых сред // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 225–231. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.028. EDN: <https://elibrary.ru/JVUOZV>.

Original article

DIRECTED ULTRASONIC TRANSDUCER FOR GAS ENVIRONMENTS

Vladimir N. Khmelev¹, Andrey V. Shalunov², Sergey N. Tsyanok³,
Alexander A. Sinkin⁴

^{1, 2, 3} Biysk Technological Institute (branch) Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia

¹ vnh@btu.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7089-3578>

² shalunov@btu.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5299-9931>

³ grey@btu.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7832-3510>

⁴ vip.sinkin@inbox.ru

Abstract. The article is devoted to the creation of highly efficient ultrasonic emitters for gaseous media with an increased level of generated sound pressure and a narrow directional pattern. The need to create such an emitter is determined by the existence of a large number of technological processes, to intensify which it is necessary to generate directed sound radiation with a sound pressure level of more than 150 dB, at a distance of more than a meter from the emitter. Unfortunately, existing ultrasonic emitters do not provide the required sound pressure levels due to the low acoustic impedance of gaseous media, and the mutual compensation of radiation generated by sections of the emitter

© Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Цыганок С. Н., Синкин А. А., 2025

oscillating in antiphase. As part of the study, a design of the emitter was proposed, consisting of a piezo-electric transducer and a disk of variable cross-section. To form a narrow radiation pattern, use radiation from the backside of the disk and eliminate mutual compensation of oscillations, reflectors and phase-equalizing cones were developed. To determine the characteristics of the created emitter, measurements of sound pressure and radiation patterns were carried out in various configurations: without additional devices, with a reflector, with a reflector and phase-equalizing cones. The results of the study showed that the use of a reflector increases the sound pressure level by 3-3.5 dB, and the addition of phase-equalizing cones makes it possible to achieve a pressure close to 150 dB and reduce the angle of the main lobe of the radiation pattern to ± 4 degrees. Thus, the proposed design significantly improves the efficiency of the emitter, directing most of the energy to the main lobe and increasing the range of ultrasonic radiation.

Keywords: non-contact exposure, sound exposure level, high intensity ultrasonic.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-19-00900, <https://rscf.ru/project/24-19-00900/>.

For citation: Khmelev, V. N., Shalunov, A. V., Tsyanok, S. N. & Sinkin, A. A. (2024). Directed ultrasonic transducer for gas environments. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 225-231. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.028. EDN: <https://elibrary.ru/JVUOZV>.

ВВЕДЕНИЕ

Требования современных производств по повышению эффективности, уменьшению энергоемкости, увеличению скорости различных технологических процессов, реализуемых в газовых средах, обуславливают необходимость поиска новых эффективных способов их интенсификации. Одним из перспективных способов интенсификации процессов в газовых средах является воздействие на них механическими колебаниями с высоким уровнем звукового давления (до 150...170 дБ) на ультразвуковой (УЗ) частоте [1].

Эффективность ультразвукового воздействия для интенсификации процессов в газовых средах подтверждена результатами исследований различных авторов [2, 3], которые позволили установить следующее:

- применение ультразвукового воздействия с уровнем звукового давления более 150 дБ эффективно для борьбы с образованием туманов на автомобильных дорогах и взлетно-посадочных полосах, осаждения опасных частиц природного и техногенного происхождения, особенно для коагуляции частиц размером менее 2,5 мкм, не удаляемых из газовых сред другими способами. Практическое воздействие высокointенсивных ультразвуковых колебаний в газоходах и существующем газоочистном оборудовании позволяет повысить эффективность пылевлавливающих установок до 93-97 % без применения электростатических или рукавных фильтров [2];

- ультразвуковое воздействие через газовые промежутки на частицы различных размеров обеспечивает реализацию низкотемпературной сушки пищевых (увеличивая срок хранения, не разрушая полезные вещества и витамины, сохраняя после регидратации вкусовые качества продукции), лекарственных (сохраняя биологическую ценность и активность) термолабильных (исключая окисление и разложение), горючих и взрывчатых материалов [4];

- ультразвуковое воздействие через газовые промежутки на различные объекты и поверхности обеспечивает разрушение пен при реализации химических и технологических процессов, розлив и упаковка пенящихся продуктов, формирование однородных высокопрочных покрытий на различных поверхностях, ускорение их сушки или полимеризации [5];

- направленное воздействие ультразвуковыми колебаниями на области задымления при по-

жарах позволяет увеличить дальность видимости, необходимую для эффективного пожаротушения и безопасной эвакуации людей из очагов пожаров [6];

- для передачи на значительные расстояния, не слышимых человеком, невидимых, не зависимых от влажности, освещенности, температуры и других атмосферных явлений, информационных сигналов, необходимых для подачи команд, формирования контролируемых полос и периметров [7].

Во всех случаях реализация ультразвукового воздействия обеспечивается применением специальных излучателей – ультразвуковых колебательных систем для газовых сред.

Однако создание и применение излучателей ограничивается существующей проблемой, возникающей при формировании высокointенсивных ультразвуковых колебаний в газе. Обусловлена эта проблема невозможностью вывода энергии механических колебаний из твердотельных излучателей в газовые среды из-за низкого акустического импеданса газовых сред. При невозможности вывода значительных энергий УЗ колебаний проблема усугубляется высоким поглощением ультразвуковых колебаний, превосходящим поглощение колебаний звукового диапазона [8].

Для обеспечения максимально эффективного излучения УЗ колебаний в газовые среды (вывода и передачи энергии) необходимо не только добиваться наибольшего уровня перепада давления в ультразвуковой волне, т.е. предельно высокой амплитуды колебаний излучателя для наилучшего согласования импедансов (волновые сопротивления) излучателя и газовой среды, но и обеспечивать максимально возможную направленность излучения (узкую диаграмму направленности) [9].

Наиболее эффективными для обеспечения наилучшего согласования волновых сопротивлений твердотельных излучателей и газовых сред и максимального вывода энергии колебаний в газовые среды в настоящее время считаются излучатели в виде металлических дисков, совершающих изгибные колебания и возбуждаемые продольно колеблющимися пьезообразователями [3]. Такая конструктивная форма и возможность формирования изгибных колебаний обеспечивает максимально возможный выход энергии УЗ колебаний в газовые среды, поскольку волновое сопротивление изгиба-колеблющегося излучателя лучше согласуется с волновым сопротивлением газовой среды, чем волновое сопротивление продольно колеблющегося излучателя [10].

НАПРАВЛЕННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СРЕД

На сегодняшний день такие излучатели разрабатываются и производятся в разных странах, однако наилучшие результаты достигнуты в Институте акустики (Испания) и в Пхонханском университете науки и технологии (Республика Корея) [11–12].

К сожалению, достигаемые результаты при практическом применении создаваемых конструкций при реализации различных технологий свидетельствуют о недостаточной эффективности излучателей по уровню создаваемого звукового давления в формируемой УЗ волне и широкой направленности излучения [13].

Анализ технических характеристик и функциональных возможностей разработанных практических конструкций позволил выявить следующие недостатки:

- относительно невысокий уровень звукового давления (около 130...140 дБ), обусловленный реально достигаемой амплитудой колебаний (менее 50 мкм), ограничен прочностными свойствами используемых материалов и конструкций. Многочисленные попытки увеличения амплитуды колебаний приводили к их механическому разрушению;

- низкая эффективность воздействия, созданного такими излучателями, обусловленная тем, что при формировании изгибных колебаний диска на модах, соответствующих ультразвуковой частоте и кратных основной моде колебаний, соседние кольцевые участки диска колеблются в противофазе. Из-за этого излучение соседних участков диска (зон), создающих колебания с противоположными фазами, на некотором расстоянии от излучателя компенсируется. Это не позволяет обеспечить требуемую интенсивность ультразвукового воздействия на обрабатываемые объекты. Попытки обеспечения колебаний соседних кольцевых участков в одной фазе за счет ступенчатого изменения толщины диска обу-

славливают существенное снижение прочностных характеристик и невозможность работы при амплитудах даже в 50 мкм.

- невозможность реализации максимальной эффективности воздействия такими излучателями из-за того, что при формировании излучения в пространство воздействия не используется излучение тыльной стороны дискового излучателя.

- низкая производительность реализуемых процессов, обусловленная формированием при эксплуатации таких излучателей достаточно широкой диаграммы направленности (более 30 град.). Это приводит к существенному расхождению формируемых колебаний и отсутствию возможности передачи колебаний (формирования воздействия) на значительные расстояния (более 1...2 м).

Выявление причин снижения эффективности существующих излучателей, необходимость устранения выявленных недостатков и понимание возможностей и путей их совершенствования обуславливают необходимость постановки цели дальнейших исследований – создания высокоеффективных УЗ излучателей для газовых сред с увеличенным (в сравнении с известными) уровнем звукового давления и узкой диаграммой направленности.

ПРЕДЛОЖЕННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ДИСКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Для достижения поставленной цели были проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на выбор оптимальной конструктивной формы и размеров излучателя. На рисунке 1 представлен разработанный излучатель с изгибающимся дисковым излучателем.

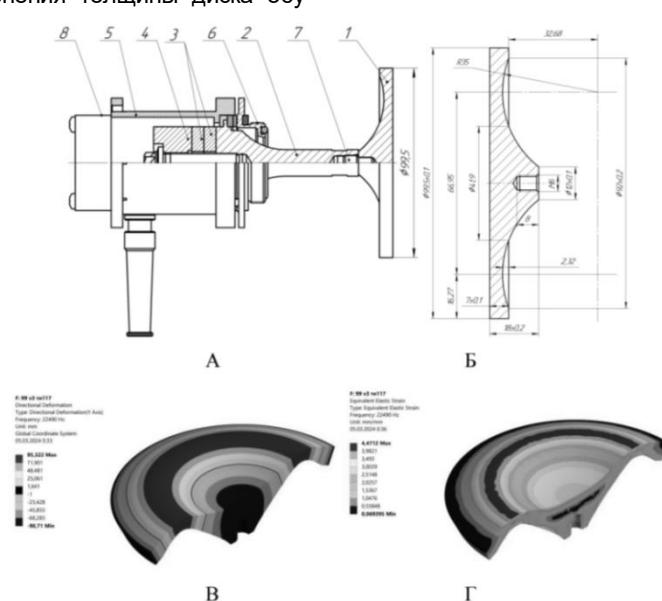


Рисунок 1 – УЗКС с дисковым излучателем: А – эскиз УЗКС; Б – чертеж дискового излучателя; В – картина распределения амплитуд колебаний дискового излучателя; Г – картина распределения механических напряжений дискового излучателя; 1 – излучатель; 2 – излучающая накладка пьезопреобразователя; 3 – пьезокерамические кольца; 4 – отражающая накладка; 5 – корпус; 6 – фланец; 7 – шпилька; 8 – вентилятор

Figure 1 – USVS with disk emitter: A - sketch of ultrasonic system; B - drawing of a disk emitter; C - picture of the distribution of vibration amplitudes of the disk emitter; D - picture of the distribution of mechanical stresses of the disk emitter; 1 - emitter; 2 - radiating pad of the piezoelectric transducer; 3 - piezoceramic rings; 4 - reflective pad; 5 - hull; 6 - flange; 7 - pin; 8 - fan

Было предложено излучающий элемент выполнять в виде диска специальной формы, который преобразует продольные колебания, передаваемые от пьезоэлектрического преобразователя в изгибные колебания диска, излучающего эти колебания в воздух с обеих поверхностей диска: лицевой и тыльной (со стороны, которой осуществляется присоединение пьезопреобразователя) излучающих поверхностей.

Разработанный излучатель рассчитан для создания ультразвуковых колебаний на второй изгибно-кольцевой моде колебаний диска с изменяющейся толщиной. При этом для снижения механических напряжений, возникающих при формировании изгибных колебаний, радиальный переход был увеличен до размеров всего диска, чтобы обеспечить бесступенчатую конструкцию излучателя. В качестве мате-

риала для излучателя был использован один из самых прочных титановых сплавов – ВТ6.

Для увеличения уровня формируемого звукового давления было решено задействовать излучение с тыльной стороны диска. Для этого был разработан отражатель, который представляет собой два соосно-расположенных усеченных конуса. Максимальный диаметр на выходе отражателя составил 154 мм. Для формирования узкой диаграммы направленности было предложено использовать специальный рупор с фазовыравнивающими конусами.

Чертёж ультразвукового излучателя с отражателем и рупором приведен на рисунке 2. Проведенные измерения разработанного излучателя позволили установить его технические характеристики, представленные в таблице 1.

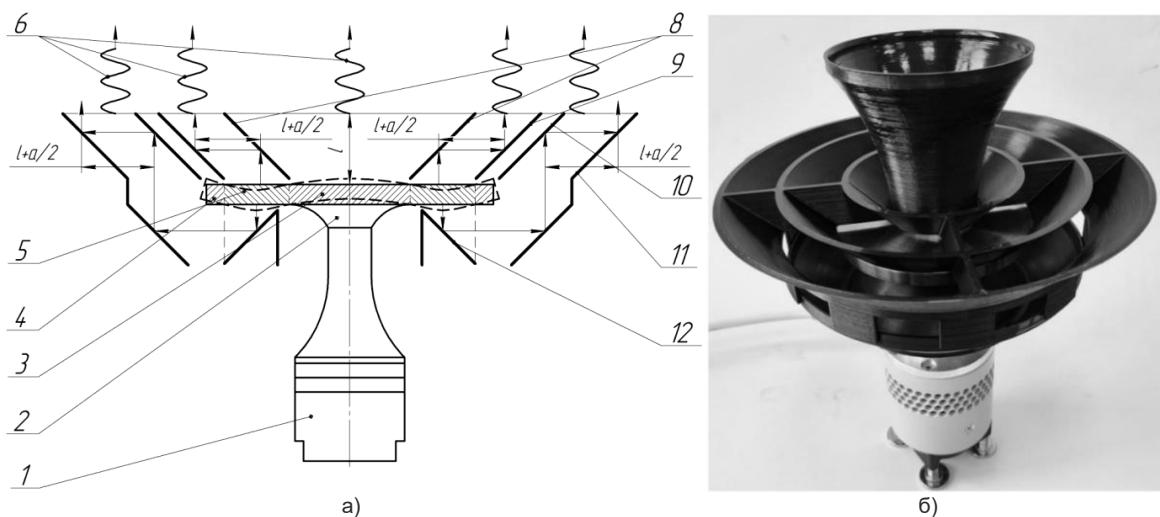


Рисунок 2 – Чертёж (а) и фото (б) ультразвукового излучателя с отражателем и рупором
Figure 2 – Drawing and photo of an ultrasonic emitter with a reflector and horn

Таблица 1 – Основные технические характеристики ультразвукового излучателя

Table 1 – Main technical characteristics of the ultrasonic transducer

Резонансная частота	22,6 кГц
Максимальная амплитуда (размах) механических колебаний рабочего инструмента (без нагрузки)	70 мкм
Диаметр окончания	14 мм
Диаметр отражателя	154 мм
Диаметр конуса 8	90 мм
Диаметр конуса 9	150 мм
Диаметр конуса 10	175 мм
Внешний диаметр рупора	90 мм
Внутренний диаметр рупора	40 мм

Применение фазовыравнивающих конусов обеспечило работу излучателя следующим образом. Акустические колебания от зоны 1, ограниченной конусом 8, проходят расстояние до торца рупора, кратное длине волн ультразвуковых колебаний в воздухе на частоте воздействия.

Акустические колебания от зоны 2, ограниченной конусом 9, проходят расстояние, кратное длине волн ультразвуковых колебаний в воздухе на частоте воздействия, увеличенное на половину длины волн ультразвуковых колебаний в воздухе на частоте воздействия. Акустические колебания от зоны 3, ограниченной конусом 10, проходят кратное длине волн ультразвуковых колебаний в

воздухе на частоте воздействия, увеличенное еще на половину длины волн ультразвуковых колебаний в воздухе на частоте воздействия. Применение таких конусов позволило на выходе из рупора создать акустические колебания в одной фазе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для исследования колебаний (акустического поля), формируемых излучателем, было подготовлено помещение, разработан и изготовлен экспериментальный стенд.

Все измерения проводились в помещении размером 40x5x4,2 (м) для уменьшения влияния отра-

НАПРАВЛЕННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СРЕД

жений. Стены помещения были оклеены акустическим поролоном. Для исключения отражения колебаний помещение с одного торца имело стену, расположенную под углом, с выходом в другое, протяженной по длине помещения. Источник УЗ воздействия располагался на расстоянии около 2 м от торца помещения (от стены под углом) и размещался по центру на расстоянии 1,4–1,5 метра от пола помещения. Для измерения звукового давления, которое создается ультразвуковыми излучателями, использовался шумомер Экофизика-110А [14].

Для измерения диаграммы направленности ультразвуковых излучателей был собран стенд, представленный на рисунке 3.

Ультразвуковой излучатель (поз. 1) размещался

горизонтально. Микрофон (поз. 4) шумомера (поз. 6) находился на акустической оси ультразвукового излучателя. Вертикальность и горизонтальность положения устройств в исследовательском стенде контролировалась при помощи лазерного нивелира. Стойка ультразвукового излучателя (поз. 2) была жестко закреплена. Стойка микрофона (поз. 5) имела возможность перемещения, изменяя угол положения микрофона относительно акустической оси. Угол изменялся от 0° до 90°. При этом выдерживалось расстояние в 1000 мм между излучающей поверхностью ультразвукового излучателя и микрофоном.

Электронный генератор подавал напряжение с частотой, соответствующей собственной резонансной частоте ультразвукового излучателя – 22634 Гц.

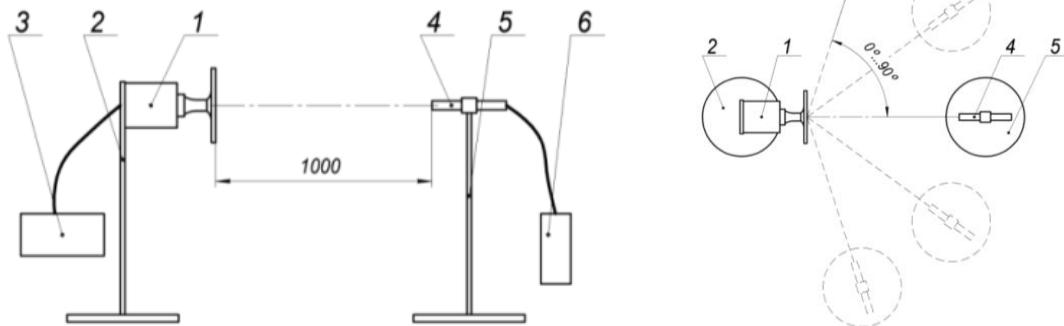


Рисунок 3 – Структурная схема стенда для измерения диаграммы направленности ультразвукового излучателя:
1 – ультразвуковая акустическая система; 2 – стойка излучателя; 3 – электронный генератор; 4 – микрофон;
5 – стойка микрофона; 6 – измерительный блок шумомера

Figure 3 – Block diagram of a stand for measuring the directional pattern of an ultrasonic emitter: 1 - ultrasonic acoustic system, 2 - emitter stand, 3 - electronic generator; 4 - microphone; 5 - microphone stand; 6 - sound level meter measuring unit

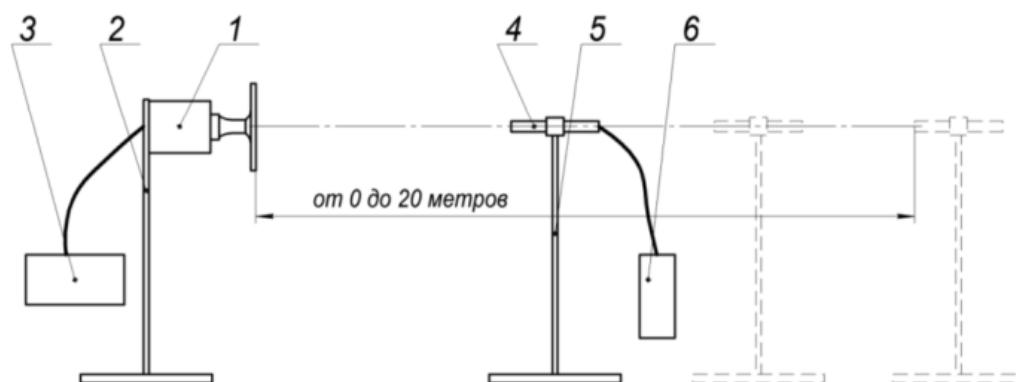


Рисунок 4 – Структурная схема стенда для измерения затухания звукового давления ультразвукового излучателя:
1 – ультразвуковая акустическая система, 2 – стойка излучателя, 3 – электронный генератор; 4 – микрофон;
5 – стойка микрофона; 6 – измерительный блок шумомера

Figure 4 – Block diagram of a stand for measuring the sound pressure attenuation of an ultrasonic emitter: 1 - ultrasonic acoustic system, 2 - emitter stand, 3 - electronic generator; 4 - microphone; 5 - microphone stand; 6 - sound level meter measuring unit

Измерение звукового давления с помощью шумомера Экофизика-110А проводилось на измерительных диапазонах 20000 Гц и 25000 Гц, как наиболее близких по частоте к контролируемому УЗ излучению.

Для измерения затухания звуковых колебаний (звукового давления) вдоль акустической оси ультразвуковой акустической системы был собран стенд, структура которого иллюстрируется рисун-

ком 4. Стойка микрофона (поз. 5) имела возможность перемещения вдоль акустической оси. Положение микрофона на акустической оси контролировалось с помощью лазерного нивелира. Расстояние от излучающей поверхности ультразвукового излучателя в ближнем поле (до 0,5 м) измерялось при помощи линейки, а в дальнем поле (от 0,5 м до 20 м) – при помощи лазерного дальномера.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Были проведены три типа измерений: дисковый излучатель формировал колебания без применения отражателя и фазовыравнивающих конусов; дисковый излучатель формировал колебания с использованием отражателя; дисковый излучатель создавал колебания в пространстве с отражателем и фазовыравнивающими конусами с целью формирования диаграммы направленности. Для каждого типа измерений были получены диаграммы направленности и зависимости уровня звукового давления от расстояния до излучателя (погонное затухание).

Диаграмма направленности для ультразвукового излучателя без отражателя и фазовыравнивающих конусов приведена на рисунке 5. Из анализа представленных на диаграмме данных следует, что значительная часть излучаемой энергии излучается на боковых (второстепенных) лепестках диаграммы.

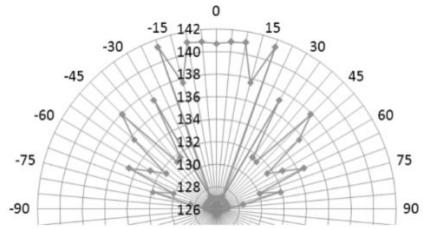


Рисунок 5 – Диаграмма направленности ультразвукового излучателя

Figure 5 – Ultrasonic transducer radiation pattern

При этом угол излучения диаграммы направленности (основного лепестка) составляет ± 15 градусов. Из полученных данных следует необходимость установки дополнительных отражателей и фазовыравнивающих конусов для формирования более узкой диаграммы направленности.

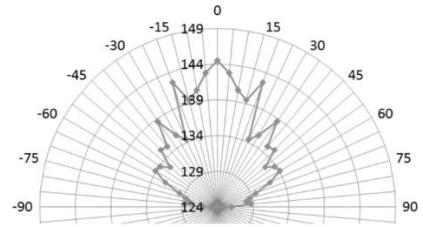


Рисунок 6 – Диаграмма направленности ультразвукового излучателя с отражателем

Figure 6 – Directional pattern of the ultrasonic transducer with reflector

Диаграмма направленности ультразвукового излучателя с отражателем представлена на рисунке 6.

В результате применения отражателя диаметр эквивалентного излучателя увеличился до 154 мм. В результате угол излучения диаграммы направленности (основного лепестка) уменьшился до ± 10 градусов. При этом, звуковое давление на расстоянии 1 м увеличилось до 144,5 дБ – на 3–3,5 дБ по сравнению с излучателем без отражателя. Таким образом, использование обратной стороны изгибно-колеблющегося позволило увеличить звуковое давление и уменьшить расхождение формируемого ультразвукового излучения.

На завершающем этапе экспериментов была получена диаграмма направленности ультразвукового излучателя с отражателем и фазовыравнивающими конусами, показанная на рисунке 7.

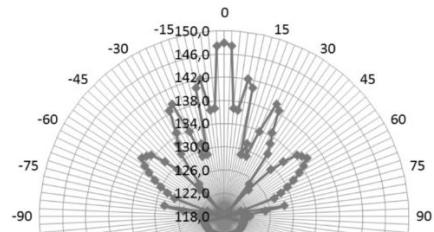


Рисунок 7 – Диаграмма направленности ультразвукового излучателя с отражателем и фазовыравнивающим конусом

Figure 7 – Directional pattern of an ultrasonic transducer with a reflector and a phase-equalizing cone

Добавление фазовыравнивающего конуса позволило получить на расстоянии 1 м звуковое давление, близкое к 150 дБ, а также уменьшить угол излучения диаграммы направленности (основного лепестка) до ± 4 градуса. При этом удалось направить максимальное количество энергии на формирование основного лепестка. Очевидно, что дальнейшее повышение уровня звукового давления возможно за счет использования массива таких излучателей.

Сравнительные графики ближнего поля и погонного затухания для диска, для диска с отражателем и диска с отражателем и фазовыравнивающими конусами представлены на рисунке 8.

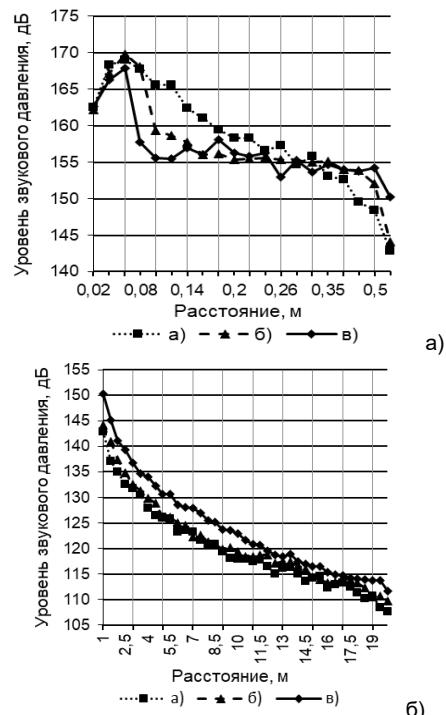


Рисунок 8 – Сравнительные графики погонного затухания:
а) в ближнем поле, б) на расстоянии более метра

Figure 8 – Comparative graphs of linear attenuation:
a) in the near field, b) at a distance

Из анализа полученных результатов следует, что при добавлении отражателя и фазовыравнивающих конусов уровень звукового давления в ближней зоне излучателя уменьшается с максимального зна-

НАПРАВЛЕННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СРЕД

чения в 169 дБ до 167,9 дБ. На расстоянии 1 метра от излучателя применение фазовыравнивающих конусов и отражателей обеспечивает повышение уровня звукового давления на 4 дБ. При этом, даже на расстоянии в 20 метров достигается увеличение уровня звукового давления с 107,6 дБ до 111,7 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы достигнута цель создания высокоеффективных УЗ излучателей для газовых сред с увеличенным, в сравнении с известными, уровнем звукового давления и узкой диаграммой направленности. При этом решены следующие задачи:

1. Предложена, разработана и практически реализована колебательная система с излучателем ультразвуковых колебаний, состоящая из разработанного пьезоэлектрического преобразователя и изгибающегося диска переменного сечения, который присоединялся к пьезопреобразователю. Диаметр диска составлял 99,5 мм. Собственная резонансная частота такого излучателя составила 22630–22640 Гц.

2. Созданный и реализованный дисковый излучатель на расстоянии одного метра создает колебания с уровнем звукового давления в 141 дБ при широкой диаграмме направленности (более 30 град).

3. Добавление отражающего устройства (внешний диаметр 154 мм) позволяет увеличить звуковое давление на 3,5 дБ и достичь суммарного уровня звукового давления в таком исполнении в 144,5 дБ.

4. Использование фазовыравнивающих конусов, которые позволяет суммировать акустические колебания от поверхностей дискового излучателя, работающих в противоположных фазах, могут увеличить звуковое давление до 149–150 дБ. При этом обеспечивается существенное улучшение направленности излучения (диаграмма направленности ± 4 градуса).

5. Разработанный дисковый излучатель с применением отражателя и фазовыравнивающих конусов обеспечивает уровень звукового давления более 110 дБ на расстоянии не менее 20 м от излучателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Dorovskikh, R.S., Puzhaykina, A.E., Bochenkov, A.S., Shalunov, A.V. & Nesterov, V.A. (2023). Emitters for the formation of high-intensity ultrasonic vibrations in gaseous media for various purposes: EDN: ZJSJJW. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 226-237. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.31>.
2. Shalunov, A.V., Nesterov, V.A., Golykh, R.N., Bochenkov, A.S., Dorovskikh, R.S. & Khmelev, V.N. (2022). Development and research of ultrasonic coagulator based on vortex acoustic flows: EDN: OVLXGO. *Polzunovskiy vestnik*, (24), 84-92. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.011>.
3. Gallego-Juarez, Juan. (2010). High-power ultrasonic processing: Recent developments and prospective advances. *Physics Procedia*, (3), 35-47. doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.006.
4. Khmelev, V.N. [et al.]. (2009). Study on the effectiveness of ultrasonic drying. Electronic journal "Technical acoustics". EDN: <https://elibrary.ru/KYKVSB>.
5. Khmelev, V.N. (2024). Intensification of the drying process of cotton wool using ultrasound. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 193-199. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.025. EDN: <https://elibrary.ru/RUBQIF>.
6. Rodrigues-Corral, G., Riera, E., Gallego-Juárez, J.A., Acosta, V.M., Pinto, A., Martínez, I. & Blanco, A. (2010). Experimental study of defoaming by air-borne power ultrasonic technology. *Physics Procedia*, (3), 135-139. doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.019.
7. Kostromina, E.I. & Zanina, I.A. (2018). Reducing the level of smoke in escape routes during a fire in multi-storey public buildings by using ultrasonic coagulation. *Engineering Bulletin of the Don*, (1). EDN: <https://elibrary.ru/XSMPYL>.
8. Saidov, B.B. & Telezhkin, V.F. (2020). Opto-ultrasonic communication channels. *Bulletin of South Ural State University*, (4), 55-62. doi: 10.14529/ctcr200406.
9. Averin, A.P. (2008). Study of attenuation parameters during ultrasonic observations. *Mining information and analytical bulletin*, (10). EDN: <https://elibrary.ru/IFAMVN>.
10. Maruvada, S., Harris, G.R., Herman, B.A., King, R.L. (2007). Acoustic power calibration of high-intensity focused ultrasound transducers using a radiation force technique. *J. Acoust. Soc. Am.* 121, 1434-1439.
11. Gallego-Juárez, J.A., Gaete-Garreton, L., Rodriguez-Corral, G. (1978). An ultrasonic transducer for high-power applications. *Ultrasonics* 16, 267-271.
12. Yub, Je Jong-Kyu, Park, Haksu, Lee, Dong hoon, Yi & Wonkyu, Moon. (2008). A Highly-Directional Ultrasonic Range Sensor Using a Stepped-Plate Transducer. *IFAC Proceedings Volumes*, 15780-15785. doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02668.
13. Rodrigues-Corral, G., Gallego-Juárez, J.A., Acosta, V.M. & Riera, E. (2010). Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing. *Ultrason. Sonochemistry*, 953-964. doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02668.
14. Riera, E., Cardoni, A., Blanco, A., Acosta-Aparicio, V.M., Gallego-Juárez, J.A. (2010). Characterizing the nonlinear dynamics of power ultrasonic systems. In: *Proceedings 39th International Congress on Noise Control Engineering, Internoise 2010*, 13-16 June Lisbon, Portugal.
15. Ecophysics-110A Octava-Electron Design : official site. Moskow, [2006-2024]. [Retrieved July 11, 2024]. Available from: <https://www.octava.info/ecophysica-110A>.

Информация об авторах

В. Н. Хмелев – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Бийского технологического института АлтГТУ.

А. В. Шалунов – доктор технических наук, главный научный сотрудник Бийского технологического института АлтГТУ.

С. Н. Цыганок – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) АлтГТУ.

А. А. Синкин – студент группы ПС-21 Бийского технологического института АлтГТУ.

Information about the authors

V.N. Khmelev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific Work of the Biysk Technological Institute of the AltSTU.

A.V. Shalunov - Doctor of Technical Sciences, leading researcher at the Biysk Technological Institute of the AltSTU.

S.N. Tsyganok - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU.

A.A. Sinkin - student of the PS-21 Biysk Technological Institute of AltSTU.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принятая к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 628.169.2

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.029

EDN: LVJAFK

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ФЛОКУЛЯЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕР

Дарья Петровна Скорикова ¹, Юлия Сергеевна Лазуткина ²,
Ольга Михайловна Горелова ³

^{1, 2, 3} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ skorikova_daria@mail.ru

² lazutkinaus@altgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8782-6443>

³ osgor777@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7397-7803>

Аннотация. Работа посвящена исследованиям по обезвоживанию придонных осадков пресноводного озера. Необходимость уплотнения ила обусловлена технологией реабилитации водоема. При поиске флокулянта руководствовались следующими требованиями: высокой скоростью седиментации взвешенных частиц, эффективностью при осветлении надосадочной воды и уплотнении сгущенного осадка. При исследованиях выполнялись эксперименты с илом озера Завьялово, применялись флокулянты Гринлайф К35, ПолиДАДМАХ, полиакриламид. В работе проводилась оценка фитотоксичности уплотненных осадков методом биотестирования и выявлялось соответствие обезвоженного и высушенного ила требованиям ГОСТ Р 54000-2010 «Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия» по содержанию тяжелых металлов.

Ключевые слова: флокулянт, Гринлайф К35, ПолиДАДМАХ, мутность, обезвоживание осадков, восстановление озер, биотестирование, тяжелые металлы, сапропель.

Для цитирования: Скорикова Д. П., Лазуткина Ю. С., Горелова О. М. Исследования по применению флокулянтов для восстановления пресноводных озер // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 232–237. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.029. EDN : <https://elibrary.ru/LVJAFK>.

Original article

STUDIES ON THE APPLICATION OF FLOCCULATION FOR FRESHWATER LAKE RESTORATION

Daria P. Skorikova ¹, Yulia S. Lazutkina ², Olga M. Gorelova ³

^{1, 2, 3} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ skorikova_daria@mail.ru

² lazutkinaus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8782-6443>

³ osgor777@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7397-7803>

Abstract. The work is devoted to research on dewatering of bottom sediments of a freshwater lake. The necessity of sludge thickening is caused by the rehabilitation technology. The search for flocculant was guided by the following requirements: high sedimentation rate of suspended particles, efficiency in clarification of supernatant water and thickening of thickened sludge. Experiments with sludge from Lake Zavyalovo were carried out, flocculants Greenlife K35, polyDADMAH, polyacrylamide were used. Phytotoxicity of compacted sludge was assessed by biotesting method and compliance of dewatered and dried sludge with the requirements of GOST R 54000-2010 "Organic fertilizers. Sapropels. General technical conditions" on the content of heavy metals.

Keywords: flocculant, Greenlife K35, PolyDADMAH, turbidity, sludge dewatering, lake restoration, biotesting, heavy metals, sapropel.

For citation: Skorikova, D. P., Lazutkina, Yu. S. & Gorelova, O. M. (2025). Studies on the application of flocculation for freshwater lake restoration. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 232-237. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.029. EDN: <https://elibrary.ru/LVJAFK>.

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение водных ресурсов является актуальной задачей для органов государственной власти и населения нашей страны. Поиск технологических решений, направленных на сохранение и

рекультивацию водных объектов, позволит восстановить качество водных объектов и получить эффективные органические удобрения.

В России с 2019 года реализуется проект «Сохранение уникальных водных объектов» в

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ФЛОКУЛЯЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕР

рамках национального проекта «Экология». В связи с этим Администрацией Завьяловского района Алтайского края было сформулировано техническое задание по расчистке озера Завьялово (Завьяловский район Алтайского края). Ученые ИВЭП СО РАН (г. Барнаул) провели анализ современного состояния водного объекта для обоснования мероприятий по его реабилитации. В изученном экспертном заключении представлена оценка природных предпосылок формирования, функционирования и эволюции экосистемы озера Завьялово, влияния антропогенных факторов и его современного экологического состояния [1].

Антропогенные факторы в современных природных условиях накладываются на естественные отрицательные процессы, приводящие к заиливанию водоема, а зачастую усугубляют негативные процессы. В озере Завьялово в настоящее время находится значительный объем иловых отложений, что сократило глубину и акваторию водоема.

Также наблюдается смена одного биоценоза другим – озеро превращается в болото. Сукцессия водоема проявляется в замене одних видов флоры и фауны на другие, появлении большого количества сорной растительности, росте популяции насекомых, при этом утрачивается народно-хозяйственное и рекреационное значение водоема. Потенциальная ценность озера сделала целесообразным его восстановление в рамках федеральной программы.

МЕТОДЫ

Технология оздоровления водоема предполагает изъятие придонного ила, намыв его на иловые карты и в геотубы. Извлекаемый осадок является сильно обводненным, а естественное обезвоживание его происходит продолжительное время. Ускорить процесс поможет введение специальных реагентов – коагулянтов или флокулянтов.

Флокулянты используют там, где нужно агломерировать мелкие частицы в большие группы. Целью данного процесса может являться как очищенная вода, так и сами частицы [2].

В сельском хозяйстве флокулянтами укрепляют почвы, состоящие из мелких частиц, добавка такого реагента способствует удержанию в почве влаги. В горно-обогатительной промышленности флокулянты способствуют повышению выхода концентратов цветных и черных металлов, а также угля.

Для очистки воды флокулянты применяют:

- предприятия, чтобы очистить подготовленную и попутно добываемую воду или промышленные стоки до показателей, при которых можно сбросить её на очистные сооружения без вреда для окружающей среды или вернуть в производственный цикл;
- станции водоочистки, где реагенты добавляют в воду перед отстойниками и осветлителями, что ускоряет формирование и осаждение хлопьев, делает воду прозрачнее, позволяет сочетать компактность оборудования и производительность станции;
- узлы обезвоживания осадков, где флокулянты способствуют обезвоживанию осадков с целью сокращения площадей участков размещения и сушки [3].

Существенным недостатком флокуляции является использование реагентов, зачастую продуктов органического синтеза. При этом флокулянт концентрируется в получаемом осадке, что может ограничивать его использование.

При обезвоживании озерного ила, как правило, используются флокулянты, которые представляют собой полиэлектролиты на основе поликарбамида.

Подбор оптимальной дозы реагента для обезвоживания придонного осадка будет способствовать ресурсосбережению при реализации технологии реабилитации пресноводного озера. Восстановление озера с последующим использованием его в качестве водоисточника и рекреационного объекта является примером рационального природопользования.

Осадок пресноводных озер (сапропель) может применяться в качестве почвообразующего сельскохозяйственного удобрения [4]. Сочетание процессов восстановления озера с одновременным получением товарного продукта «Сапропель» позволит повысить инвестиционную привлекательность проекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью научной работы являлся поиск флокулянта, способствующего быстрому обезвоживанию ила озера Завьялово. Важным условием при выборе реагента являлась его безопасность для растительного и животного мира водоема. Еще одним направлением исследований являлась оценка возможности использования полученного обезвоженного ила в качестве удобрения «Сапропель».

Извлекаемые земснарядом природные залежи сильно обводнены, вследствие чего процесс естественного их обезвоживания характеризуется большой продолжительностью. Использование различных приемов интенсификации разделения жидкой и твердой фазы является целесообразным. В большинстве случаев для ускорения обезвоживания осадка нашел применение процесс флокуляции.

На первом этапе исследований проводился подбор оптимальной концентрации раствора флокулянта, также определялась доза его введения в иловую смесь. Изучалось действие как флокулянта, рекомендованного в проектной документации Гринлайф К35 (ГК35), так и других реагентов: поликарбамида (ПАА) и ПолидАДМАХ (ПДМ).

Оценка эффективности действия флокулянта проводилась путем определения мутности осветленного слоя по ГОСТ Р 57164-2016 [5, 6].

При изучении процесса флокуляции варьировались:

- концентрации рабочих растворов флокулянтов в диапазоне от 0,4 до 4 г/л;
- дозы флокулянтов в диапазоне от 1 до 5 мл рабочего раствора на 100 мл образца супензии придонного осадка.

Для исследований использовалась супензия, откаченная земснарядом из озера Завьялово. Несколько образцов были смешаны между собой для усреднения состава.

Концентрация раствора флокулянта принималась исходя из рекомендаций производителя

(4 г/л вещества в воде) [7]. Однако в ходе лабораторных исследований было выявлено, что Гринлайф К35 при таком содержании представляет собой густую вязкую массу, которую будет технически сложно и энергозатратно перемещать по трубопроводу, а также смещивать с илом. Исходя из этого, было решено снизить его концентрацию в 10 раз до 0,4 г/л. Для остальных флокулянтов, которые удовлетворительно растворялись в дистиллированной воде, были приняты более высокие концентрации – 4 г/л.

В ходе экспериментов к 100 мл суспензии добавляли от 1 до 5 мл растворов реагентов Гринлайф К35, ПАА и ПолидАДМАХ (органический коагулянт). В течение 30 минут происходило осветление, после

чего определялась мутность надосадочного слоя. Зависимости мутности воды от дозы введенного реагента представлены на рисунке 1.

Органический коагулянт ПолидАДМАХ показал лучший результат – введение его раствора в количестве 3 мл на 100 мл осадка, снизило мутность надосадочной воды с 70 мг/л до 3 мг/л (на 96 %), тогда как в аналогичных условиях Гринлайф К35 показал эффективность всего 43 %.

Наилучшим по проведенным исследованиям показал себя органический коагулянт, но, учитывая, что его концентрация была относительно высокой, было решено ее уменьшить до 0,4 г/л. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 2.

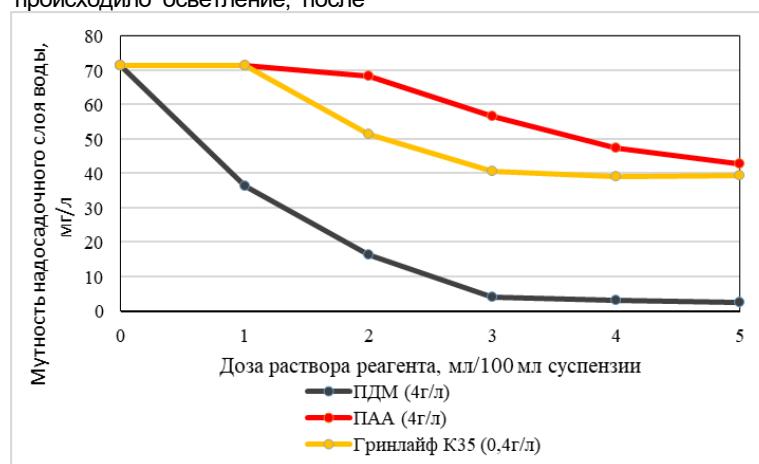


Рисунок 1 – Зависимость мутности надосадочной воды от дозы введенного флокулянта (коагулянта)

Figure 1 – Dependence of turbidity of supernatant water on the dose of introduced flocculant (coagulant)

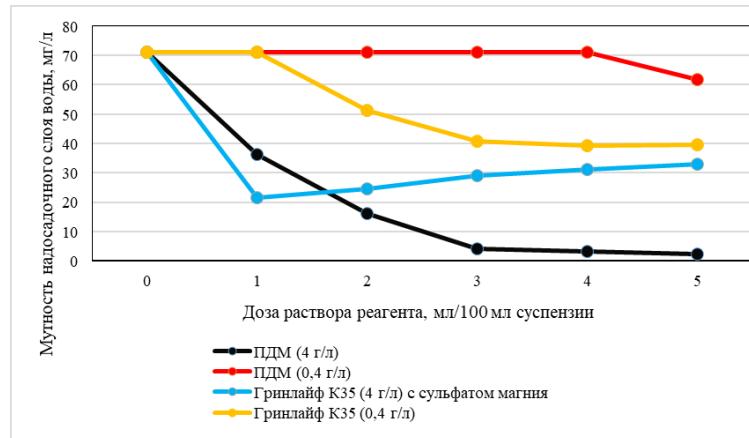


Рисунок 2 – Зависимость мутности надосадочной воды от дозы введенного коагулянта (флокулянта) при сравнении влияния концентрации реагентов

Figure 2 – Dependence of supernatant turbidity on the dose of the introduced coagulant (flocculant) when comparing the effect of reagent concentration

Аналогичные испытания показали, что при разведении рабочего раствора до 0,4 г/л ПолидАДМАХ уступает по эффективности осветления Гринлайф К35, при введении 3 мл на 100 мл ила мутность надосадочной воды составила 71 мг/л, тогда как для Гринлайф К35 в такой же концентрации – 41 мг/л. Таким образом, Гринлайф К35 в более низкой концентрации проявил себя лучше,

снизил мутность на 42,3 %, тогда как введение ПДМ не изменило исходную мутность надосадочной воды.

В работе также рассматривалась возможность повышения концентрации ГК35 при приемлемых вязкости и текучести. Этому может способствовать присутствие электролитов в воде. Для проверки данного предположения к раствору ГК35

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ФЛОКУЛЯЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕР

в концентрации 4 г/л добавляли небольшими дозами сухой сульфат магния. В количестве 20 г на 1 л раствора ГК35 его вязкость значительно снизилась.

Испытания по флокуляции показали нецелесообразность разжижения флокулянта. Как видно по ходу кривой на рисунке 2, при дозе 1 мл рабочего раствора на 100 мл воды мутность воды составила 22 мг/л, но при повышении дозы флокулянта мутность начала возрастать. Это можно объяснить негативным влиянием минерализации воды на процесс флокуляции: происходит распад коллоидов при росте концентрации электролитов.

Таким образом, при концентрации рабочего раствора 0,4 г/л наилучшим флокулянтом является Гринлайф К 35, при высоких концентрациях лучше всех реагентов осветляет воду ПолиДАД-МАХ.

Для определения экотоксичности придонного ила и используемых в работе флокулянтов было

решено провести биотестирование образцов полученных осадков.

Для проведения эксперимента было взято 100 г почвы, в которую добавлено по 10 и 30 г осадка. В качестве контрольных было использовано три образца:

- первый состоял только из почвенного субстрата,

- во втором к 100 г почвы добавлено 10 г уплотненного необработанного флокулянтом ила;

- в третий почвенный субстрат было добавлено 30 г ила, который отстаивался также без использования флокулянтов.

В контейнеры с почвенным субстратом высаживались семена редиса сорта «Жара» по десять штук в каждый контейнер. После двух недель со дня посадки редиса измерялись длины побегов и корней растений [8].

Результаты замеров биометрических показателей представлены на диаграмме (рисунок 3).

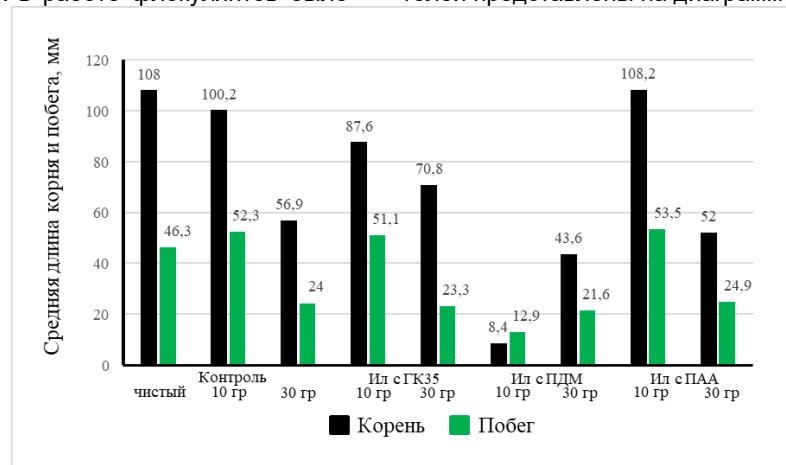


Рисунок 3 – Зависимость биометрических показателей от дозы внесенного осадка (10 и 30 г) и вида флокулянта

Figure 3 – Dependence of biometric indices on the dose of sludge (10 and 30 g) and type of flocculent

Учитывая то, что реагент ПДМ при концентрации рабочего раствора 4 г/л показал максимальную эффективность по осветлению надосадочной воды, но при этом оказался самым экотоксичным, было решено оценить, происходит ли естественная деградация флокулянта при хранении обработанного осадка и как изменится при этом влияние ила на биотестеры.

В работе проводилось дополнительное тестирование выдержанного две недели образца придонного осадка после флокуляции с применением вышеуказанного реагента. Результаты представлены на рисунке 4. Выявлено, что флокулянт ПДМ существенно понижает свою токсичность с течением времени хранения, что можно объяснить химическими или биологическими процессами его деградации.

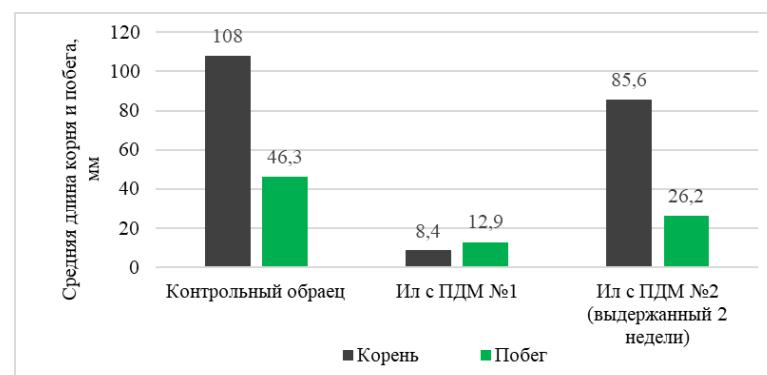


Рисунок 4 – Зависимость размеров корня и побега биотестеров при внесении осадка (10 г), свежеобработанного ПДМ и выдержанного 2 недели после обработки ПДМ

Figure 4 – Dependence of biotester root and shoot size when sludge (10 g) freshly treated with PM and aged 2 weeks after PM treatment was applied

По результатам биотестирования можно сделать выводы:

- наибольшей экотоксичностью обладает ПолиДАДМАХ, наименьшей – полиакриламид;
- ил, не обработанный флокулянтом, угнетает биотестеры, хотя и в меньшей степени, чем обработанный реагентами;
- выдержка обезвоженного ила, обработанного ПДМ, в закрытой таре в течение 2 недель существенно понизила его токсические свойства.

По результатам исследований можно рекомендовать для осветления осадка озера Завьялово два флокулянта:

- Гринлайф К35 целесообразно применять при рабочей концентрации 0,4 г/л, его использование не дает быстрого эффекта осветления воды и уплотнения осадка, потребуется больший промежуток времени для обезвоживания, но способствует ресурсосбережению из-за меньшего расхода флокулянта; Гринлайф К35 характеризуется сравнительно меньшей фитотоксичностью;

- ПолиДАДМАХ показал наилучшую эффективность при концентрации рабочего раствора 4 г/л, что более ресурсоемко, это вещество в большей степени угнетало биотестеры, но установлен эффект деструкции флокулянта, что снижает экотоксичность; при необходимости быстрого осветления целесообразно использовать ПолиДАДМАХ;

- проектные сроки выполнения работ по восстановлению озера Завьялово позволяют применять Гринлайф К35 в концентрации рабочего раствора 0,4 г/л и дозе 0,03 м³ на 1 м³ обводненного ила.

Дальнейшими исследованиями явилась оценка возможности применять извлеченный и обезвоженный озерный ил в качестве удобрения типа «Сапропель».

Согласно требованиям ГОСТ Р 54000-2010, товарные свойства сапропеля определяются содержанием биогенных элементов, а также тяжелых металлов. Данный документ определяет содержание в сапропеле кадмия, цинка, свинца, меди, ртути, марганца, никеля, хрома, кобальта и молибдена. В данной работе оценивалась концентрация кобальта, свинца и кадмия.

Содержание тяжелых металлов в анализируемом образце донных отложений было определено на атомно-абсорбционном спектрометре МГА-915 [9]. При подготовке проб использовался метод мокрой минерализации, основанный на полном разложении органических веществ при нагревании их с концентрированными кислотами [9].

При подготовке пробы бралась навеска ила, высушенного при температуре 105 °C до постоянной массы, в количестве 1 г сухой осадок помещался в колбу Кельдаля, к нему добавлялось 10 см³ концентрированной азотной кислоты для удаления органических соединений, раствор выдерживался 15 минут, а затем упаривался до объема от 3 до 5 см³. После добавлялся порциями по 1 см³ 30%-ный раствор перекиси водорода, далее раствор вновь упаривался. Полученную вытяжку пропускали через фильтр «синяя лента», фильтрат помещали в мерную колбу и доводили бидистилированной водой до объема 50 см³.

Пробу объемом 40 мкл с коэффициентом разбавления 1:100 испытывали на содержание массовой концентрации металлов. Был получен усредненный результат, представленный в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в товарном сапропелевом удобрении (ГОСТ Р 54000-2010) и исследуемом осадке

Table 1 – Heavy metal content (mg/kg) in commercial sapropel fertilizer (GOST R 54000-2010) and the studied sludge

Металл	Концентрация в иле	Норма по ГОСТ 54000-2010
Кобальт	8,5	20,0
Свинец	12,5	50
Марганец	128	500

Как видно из таблицы 1, содержание обнаруженных ионов металлов не превышает концентрации, установленные ГОСТ Р 54000-2010 [10]. Сделать окончательный вывод о возможности использования придонного осадка озера Завьялово для повышения продуктивности сельхозугодий будет справедливо только при оценке всех нормируемых показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была доказана необходимость применения флокулянтов для обезвоживания озерного ила. При этом применяемые реагенты являются фитотоксичными, что негативно скажется на растительности рекультивированных территорий, а также в случае возможного использования ила в качестве удобрения снизит его потребительские свойства. При развитии данной тематики исследования целесообразно рассмотреть в качестве возможных флокулянтов вещества природного происхождения: хитозан, желатин, агар-агар, крахмал, дубильные вещества и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В Алтайском крае начали восстанавливать озеро Завьялово по нацпроекту «Экология» [Электронный ресурс]: официальный сайт «Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации» URL: https://www.mnr.gov.ru/press/news/v_altayskom_krae_nach_ali_vosstanavlivat_ozero_zavyalovo_po_natsproektu_ekologiya/ (дата обращения 27.01.2025).
2. Запольский А.К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды: Свойства. Получение. Применение / А.К. Запольский, А.А. Баран. Л : Химия, 1987. 208 с.
3. Черников Н.А. Применение коагуляции, флокуляции и флотации при очистке воды / А.С. Наврузова, М.В. Попова. БРНИ. 2012. № 4. С. 182–187.
4. Митюков А.С., Румянцев В.А., Крюков Л.Н., Ярошевич Г.С. Сапропель и перспективы его использования в аграрном секторе экономики // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2016. № 2 (39). С. 110–114.
5. Методика выполнения измерений мутности питьевых, природных и сточных вод турбидиметрическим методом по каолину и формазину [Электронный ресурс]: оф. сайт «files.stroyinf.ru» URL : <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850853.pdf> (дата обращения 27.01.2025).
6. ГОСТ Р 57164-2016 «Вода питьевая. Методы определения запаха, вкуса и мутности» [Электронный ресурс]: оф. сайт «rosgosts.ru» URL: file/gost/13/060/gost_r_57164-2016.pdf (дата обращения 27.01.2025).

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ФЛОКУЛЯЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕР

7. Гринлайф К35 [Электронный ресурс]: оф. сайт «Кондор.рф» URL: <https://www.xn---7sbnoikjddgce2t.xn--p1ai/grinlajf-k-35/?ysclid=lvtnma2fvkw416915410> (дата обращения 27.01.2025).

8. Скорикова Д.П. Исследования по утилизации осадков при очистке пресноводного озера [Электронный ресурс] / Д.П. Скорикова, А.П. Банникова, О.М. Горелова // X46 Химия. Экология. Урбанистика : матер. Всерос. науч. нракт. нонф. (с междунар. участием), в 4 т. Т. 1. Пермь. 2024. С. 111–114. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68547432> (дата обращения: 27.01.2025).

9. ГОСТ Р 57162-2016 «Вода. Определение содержания элементов методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электрометрической атомизацией» [Электронный ресурс] : официальный сайт «охранатруда.ру» URL: upload/iblock/128/4293751162.pdf (дата обращения 27.01.2025).

10. ГОСТ Р 54000-2010 «Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия» [Электронный ресурс]: официальный сайт «rosgosts.ru» URL: https://rosgosts.ru/file/gost/65/080/gost_r_54000-2010.pdf (дата обращения 27.01.2025).

Информация об авторах

Д. П. Скорикова – студент института биотехнологий, пищевой и химической инженерии, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Ю. С. Лазуткина – кандидат технических

наук, доцент Международной кафедры ЮНЕСКО «Инженерная экология» института биотехнологий, пищевой и химической инженерии, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

О. М. Горелова – кандидат технических наук, доцент Международной кафедры ЮНЕСКО «Инженерная экология» института биотехнологий, пищевой и химической инженерии, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Information about the authors

D.P. Skorikova - student of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering, Polzunov Altai State Technical University.

Yu.S. Lazutkina - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the UNESCO International Chair "Engineering Ecology" of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering, Polzunov Altai State Technical University.

O.M. Gorelova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the UNESCO International Chair "Engineering Ecology" of the Institute of 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 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 66.096.5

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.030

EDN: ABQRFN

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СЛОЯ АЦЕТИЛСАЛИЦИЛОВОЙ КИСЛОТЫ

**Михаил Степанович Василишин¹, Анастасия Владимировна Балахнина²,
Олег Сергеевич Иванов³, Анатолий Геннадьевич Карпов⁴,
Александра Александровна Антонникова⁵**

^{1, 3, 4, 5} Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия

¹ osi85@mail.ru

² Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

Аннотация. Представлены результаты экспериментального изучения поведения слоя ацетилсалициловой кислоты при его импульсном псевдоожижении. Приводится описание экспериментальной установки, контрольно-измерительных приборов и оборудования. Установлено, что в диапазоне частот пульсации воздуха от 0,5 до 3,0 Гц наблюдается интенсивная крупномасштабная циркуляция обрабатываемого материала. Расширение слоя становится максимальным, а его сопротивление – наоборот, минимально. При частотах пульсации более 3,0 Гц характерна мелкомасштабная циркуляция материала. Расширение слоя незначительно уменьшается, а его сопротивление возрастает. Пульсирующий слой во всём диапазоне изменения параметров процесса был устойчив в отношении залегания на газораспределительной решётке. Приводятся эмпирические зависимости для расчёта расширения слоя и его гидравлического сопротивления. Полученные сведения могут быть полезны для разработчиков технологий обработки дисперсных материалов в системах «газ–твёрдое».

Ключевые слова: ацетилсалициловая кислота, пульсирующий слой, расширение и гидравлическое сопротивление слоя.

Для цитирования: Исследование расширения и гидравлического сопротивления пульсирующего слоя ацетилсалициловой кислоты / М. С. Василишин [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 238–241. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.030. EDN: <https://elibrary.ru/ABQRFN>.

Original article

RESEARCH OF EXPANSION AND HYDRORESISTANCE OF PULSING BED OF ACETYLSALICYLIC ACID

**Mikhail S. Vasilishin¹, Anastasia V. Balahnina², Oleg S. Ivanov³,
Anatoly G. Karpov⁴, Alexandra A. Antonnikova⁵**

^{1, 3, 4, 5} Institute for Problems Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia

¹ osi85@mail.ru

² Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov's Altai State Technical University, Biysk, Russia

Abstract. Results of experimental studying of bed behavior of acetylsalicylic acids at its pulsing fluidization are presented. The description of experimental setup, the instrumentation and the equipment is resulted. It is established, that over the range a pulsation frequency of air from 0.5 to 3,0Hz intensive large-scale circulation of a processed material is observed. Bed expansion becomes maximum, and its resistance - on the contrary, minimum. At a pulsation frequency more 3,0Hz fine-scale circulation of a material is characteristic. Bed expansion slightly decreases, and its resistance increases. The pulsing bed in all range of change of process parameters was resistant to in the relation of laying on gas distributive lattice. Empirical dependences for calculation of bed expansion and its hydroresistance are resulted. The gained data can be useful to development engineers of technologies for processing of disperse materials in systems "gas-solid".

Keywords: acetylsalicylic acid, pulsing layer, expansion and hydroresistance of bed.

For citation: Vasilishin, M. S., Balahnina, A. V., Ivanov, O. S., Karpov, A. G. & Antonnikova, A. A. (2025). Research of expansion and hydroresistance of pulsing bed of acetylsalicylic acid. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 238-241. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.030. EDN: <https://elibrary.ru/ABQRFN>.

© Василишин М. С., Балахнина А. В., Иванов О. С., Карпов А. Г., Антонникова А. А., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СЛОЯ АЦЕТИЛСАЛИЦИЛОВОЙ КИСЛОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Псевдоожижение является одним из наиболее распространённых способов обеспечения межфазного взаимодействия в системах «газ-твёрдое». При этом, за счёт эффективного контакта фаз удаётся значительно увеличить удельную производительность оборудования при проведении таких технологических процессов, как смешение, сушка, обжиг и т.п. [1, 2].

Однако влажные и тонкодисперсные материалы зачастую не удаётся перевести в ожигенное состояние продувкой стационарным потоком газа вследствие наличия у них значительных сил адгезионно-когезионного взаимодействия. Такого рода материалы относятся к группе С по классификации Гелдарта [3], и их обработка в псевдоожиженном слое является затруднительной или вообще невозможной из-за канaloобразования и последующего «залегания» обрабатываемого продукта на газораспределительной решётке аппарата.

Исключение отмеченных недостатков возможно при наложении механических колебаний на весь аппарат или на его отдельные части [4, 5], а также при использовании ультразвуковых воздействий [6]. Однако это в значительной мере усложняет конструкцию самого аппарата, снижает его надёжность и увеличивает капитальные затраты на технологический процесс в целом.

В ряде работ [7–9] показано, что низкочастотные пульсационные воздействия ожигающего агента стабилизируют гидродинамику слоя и полностью устраняют канaloобразование при одновременном улучшении качества перемешивания материала. Вместе с тем, для расчёта и проектирования оборудования с пульсирующим слоем необходимы сведения о влиянии режимов обработки (частота пульсации, скважность импульса и т.д.) на его гидравлическое сопротивление и степень расширения.

Сведения, имеющиеся в литературе по данному вопросу [7, 8, 10, 11], немногочисленны и во многом противоречивы. Их использование для расчёта режимов обработки конкретных материалов может приводить к значительным неточностям.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Целью настоящей работы является экспериментально-теоретическая оценка влияния режимов импульсного псевдоожижения слоя ацетилсалициловой кислоты на гидравлическое сопротивление и степень его расширения.

Ацетилсалициловая кислота (Acidum acetyl-salicylicum) является широко распространённым лекарственным средством, обладающим обезболивающим, жаропонижающим и противовоспалительным действием [12]. Благодаря безопасности и клинической эффективности препарат входит в список важнейших лекарственных средств ВОЗ. Кристаллический продукт – типичный представитель дисперсных материалов, относящихся к группе С, и его обработка в псевдоожиженном слое является затруднительной по ранее названным причинам.

Исследование импульсного псевдоожижения ацетилсалициловой кислоты проводили на установке, схема которой показана на рисунке 1.

В её состав входит аппарат 1 с рабочей камерой прямоугольного поперечного сечения 0,15 x 0,02 м и высотой 0,45 м. Аппарат имеет газоподводящий узел и снабжён комплектом беспровальних решёток, обеспечивающих необходимое газораспределение в слое. Для наблюдения за поведением слоя стенки камеры выполнены из оргстекла. Подача ожигающего агента (воздух) производится напорной газодувкой 2, а прерывание потока – механическим клапаном-пульсатором 3 роторного типа, работающим от электронного блока управления 4. Отработанный воздух очищается от частиц ацетилсалициловой кислоты в рукавном фильтре 5 с подключенным к нему съёмным контейнером 6 для сбора уноса. Необходимое разрежение в установке создаётся хвостовым вентилятором 7.

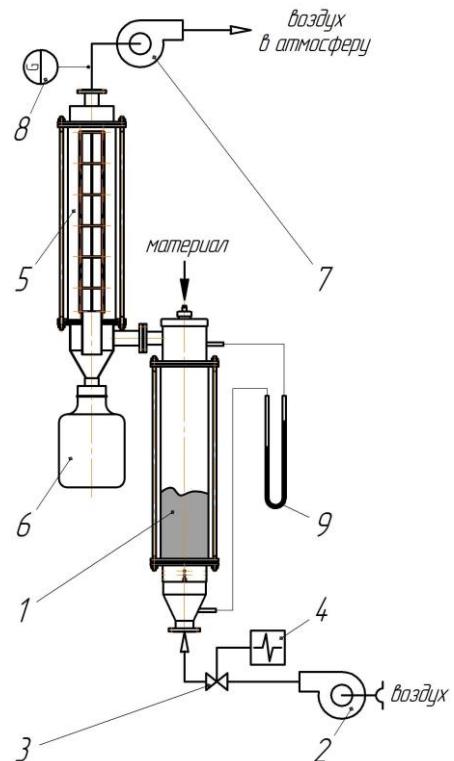


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Figure 1 – Experimental setup diagram

Установка укомплектована приборами контроля параметров процесса. Расход воздуха на псевдоожижение измеряли при помощи термоанемометра 8 (модель TESTO-425). Гидравлическое сопротивление пульсирующего слоя оценивали по показаниям дифференциального манометра 9, шкала которого укреплена на лицевой стенке рабочей камеры аппарата 1. Требуемая частота прерывания потока воздуха задавалась при помощи электронного блока управления клапаном-пульсатором.

Изучали влияние скорости воздуха w_p и частоты пульсации f на гидравлическое сопротивление ΔP_{cl} и относительное расширение $(H_{cl} - H_0)/H_0$. Скорость w_p изменялась в пределах 0,08–

0,16 м/с, а частота f – от 0,5 до 7,0 Гц. Эксперименты проводили при высоте неподвижного слоя $H_0 = 0,1$ м. Скважность импульса ψ , т.е. отношение времени открытого состояния клапана-пульсатора к периоду пульсации, во всех опытах составляла 0,5. Применяли газораспределительные решётки с долей «живого» сечения $\phi = 0,15$ и $\phi = 0,2$.

Для исключения негативных эффектов, связанных с налипанием продукта на стенки рабочей камеры, проводили обработку их внутренней поверхности антистатическим спреем. В экспериментах использовалась ацетилсалциловая кислота, выпускаемая в соответствии с ФС.2.1.0006.15. Влажность продукта не превышала 0,1 % (масс.). Эквивалентный размер частиц, определяемый при помощи оптического анализатора (модель PIP9.1), составил $d_4 = 0,245 \cdot 10^{-3}$ м. Истинная плотность определялась пикнометром (модель Accu PycII 1340) и составляла $\rho_c = 1348$ кг/м³.

Микрофотография частиц ацетилсалциловой кислоты и кривые их распределения по размерам представлены на рисунке 2, а, б.

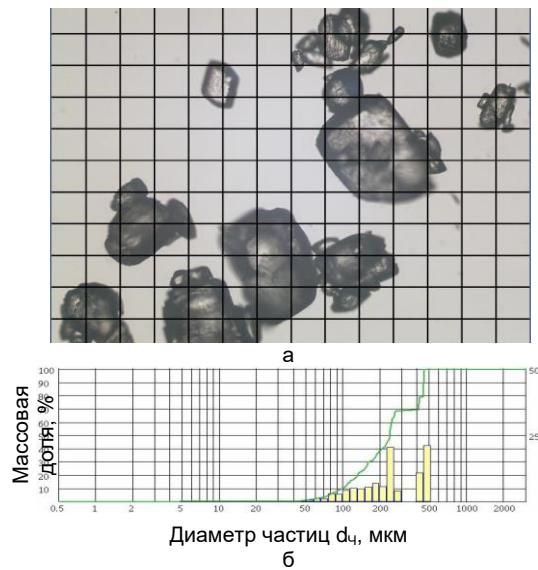


Рисунок 2 – Микрофотография частиц ацетилсалциловой кислоты (x100) и кривые их распределения по размерам

Figure 2 – Micrograph of acetylsalicylic acid (x100) particles and their size distribution curves

Визуальными наблюдениями установлено, что пульсирующая подача воздуха делает слой более однородным. При этом полностью отсутствует канлообразование и залегание обрабатываемого материала на газораспределительной решётке. На рисунке 3 показаны экспериментальные зависимости относительного расширения пульсирующего слоя (а) и его гидравлического сопротивления (б) от частоты прерывания потока воздуха.

Установлено, что импульсному псевдоожижению слоя в диапазоне частот от 0,5 до 3,0 Гц предшествует образование у его нижней границы воздушной прослойки, которая в дальнейшем трансформируется в пузыри, создающие интенсивную крупномасштабную циркуляцию обрабатываемого материала. Относительное расширение слоя в этом случае принимает максимальные значения, а его гидравлическое сопротивление –

наоборот, минимально. При увеличении скорости воздуха от 0,08 до 0,16 м/с характер полученных зависимостей сохраняется.

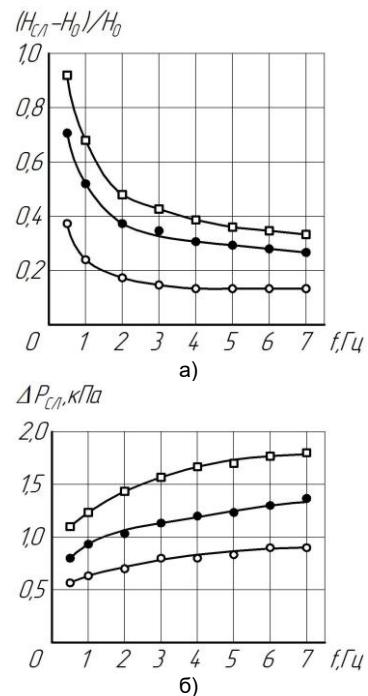


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости относительного расширения пульсирующего слоя (а) и его гидравлического сопротивления (б) от частоты прерывания потока воздуха

Figure 3 – Experimental dependences of the relative expansion of the pulsating layer (a) and its hydraulic resistance (b) on the frequency of interruption of the air flow

При частотах пульсации более 3,0 Гц картина псевдоожижения материала изменяется. Толщина воздушной прослойки существенно сокращается, а в некоторых случаях она вообще исчезает. Пузыри образуются непосредственно на решётке аппарата. Их размер с ростом частоты пульсации уменьшается, а общее количество возрастает. В слое наблюдается мелкомасштабная циркуляция материала. При этом расширение слоя уменьшается, а его сопротивление несколько возрастает. Увеличение скорости воздуха в исследованном диапазоне частот пульсации не оказывает существенно го влияния на характер полученных зависимостей.

Заметного влияния доли «живого» сечения газораспределительной решётки на расширение и гидравлическое сопротивление пульсирующего слоя в исследованном диапазоне изменения параметров процесса не установлено.

Процесс расширения пульсирующего слоя можно представить зависящим от двух составляющих, характеризующих псевдоожижение в стационарном режиме и при прерывистой подаче воздуха. В [13] показано, что максимальная высота пульсирующего слоя рассчитывается по зависимости:

$$H_{\text{сл}} = H_0 \left[(1 - \varepsilon_0) / (1 - \varepsilon_p) + (0,525 \cdot 10^{-3} / Sth)^{1,3} \right], \quad (1)$$

где ε_0 – порозность неподвижного слоя (принимали $\varepsilon_0 = 0,4$); ε_p – порозность слоя в рабочем состоянии (при пульсации).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СЛОЯ АЦЕТИЛСАЛИЦИЛОВОЙ КИСЛОТЫ

Нестационарная составляющая определяется величиной критерия Струхаля:

$$St_h = (d_{\text{ч}} \cdot f) / w_{\text{п}}. \quad (2)$$

Зависимость (1) может применяться в диапазоне $0,8 \cdot 10^{-3} \leq St_h \leq 18 \cdot 10^{-3}$. Скорость воздуха $w_{\text{п}}$ рассчитывали в соответствии с выражением, полученным в [8]:

$$w_{\text{п}} = w_0(0,85\psi + 0,15), \quad (3)$$

где w_0 – скорость начала псевдоожижения материала в стационарном режиме, м/с.

Необходимо отметить, что расчёт по уравнению (3) правомочен только при соблюдении условий: $0,2 \cdot 10^{-3} \leq d_{\text{ч}} \leq 4,0 \cdot 10^{-3}$ м и $0,2 \leq \psi \leq 0,8$.

Порозность слоя в рабочем режиме, входящая в уравнение (1), рассчитывается, согласно [7], по зависимости:

$$\varepsilon_{\text{п}} = ((18Re_{\text{п}} + 0,36Re_{\text{п}}^2) / Ar)^{0,21}, \quad (4)$$

где $Re_{\text{п}} = w_{\text{п}} d_{\text{ч}} / \mu$ – пульсационный критерий Рейнольдса; $Ar = d_{\text{ч}}^2 \rho g / \mu^2$ – критерий Архимеда.

Сравнение экспериментальных и расчётных данных по расширению пульсирующего слоя ацетилсалициловой кислоты показывает, что погрешность вычислений по уравнению (1) не превышает 15 %.

Опытные данные по гидравлическому сопротивлению слоя (с погрешностью, не превышающей 12 %) описываются уравнением:

$$\Delta P_{\text{сл}} = 1,8 \rho_{\text{н}} g H_0 Re_{\text{п}}^{-0,15} Fr^{0,7} St_h^{0,2}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{н}}$ – насыпная плотность ацетилсалициловой кислоты, кг/м³ (принимали $\rho_{\text{н}} = 572$ кг/м³); $Fr = w_{\text{п}}^2 / (gd_{\text{ч}})$ – критерий Фруда.

Уравнение (5) справедливо при соблюдении следующих ограничительных условий: $0,5 \leq Re_{\text{п}} \leq 15$; $2 \cdot 10^{-3} \leq St_h \leq 22 \cdot 10^{-3}$; $0,5 \leq Fr \leq 12$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован характер поведения пульсирующего слоя ацетилсалициловой кислоты при изменении режимных параметров процесса. Подтверждена устойчивость режимов псевдоожижения материала и отсутствие его «залегания» на газораспределительной решётке аппарата. Предложены эмпирические зависимости для расчёта максимальной высоты пульсирующего слоя и его сопротивления, которые с достаточной для инженерных оценок точностью описывают экспериментальные данные.

Полученная информация может быть полезна разработчикам технологий обработки дисперсных материалов в системах «газ–твёрдое».

Работа выполнена с использованием оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдоожижения. М. : Химия, 1967, 664 с.
- Кунин Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдоожижение. М. : Химия, 1976, 448 с.
- Geldart D. Gas Fluidization Technology. Chichester: John Wiley, 1986, 316 p.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

4. Членов В.А., Михайлов Н.В. Виброкипящий слой. М. : Наука, 1972, 343 с.

5. Варсанофьев В.Д., Кольман-Иванов Э.Э. Вибрационная техника в химической промышленности. М. : Химия, 1985, 240 с.

6. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М. : Химия, 1983. 192с.

7. Бокун И.А. Исследование гидродинамики и теплообмена пульсирующего слоя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1967, 15 с.

8. Локшин Ю.Х. Исследование импульсного псевдоожижения и определение рациональных режимов работы аппаратов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1977, 19 с.

9. Островский Г.М., Аксёнова Е.Г. Псевдоожижение порошкообразных материалов при колебательном изменении давления газа // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 31. № 1. С. 5–10.

10. Alfredson P.G. Behavior of pulsed fluidized beds – Part I: Bed expansion // Trans. Inst. Chem. Engrs. 1973. v. 51. p. 232–241.

11. Alfredson P.G. Behavior of pulsed fluidized beds – Part II: Bed contraction // Trans. Inst. Chem. Engrs. 1973. v. 51. p. 242–246.

12. Бурбелло А.Т., Шабров А.В., Денисенко П.П. Современные лекарственные средства : клинико-фармакологический справочник практического врача. М. : ОЛМА Медиа Групп. 2006, 896 с.

13. Балахнина А.В. Применение техники пульсирующего слоя для совершенствования процесса сушки кристаллического нитрата натрия в производстве угленита Э–6 : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Бийск, 2011, 19 с.

Информация об авторах

М. С. Василишин – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

А. В. Балахнина – кандидат технических наук, доцент, декан факультета Бийского технологического института (филиала) АлтГТУ.

О. С. Иванов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

А. Г. Карпов – научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

А. А. Антонникова – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

Information about the authors

M.S. Vasilishin - doctor of technical sciences, associate professor, main research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.

A.V. Balakhnina - candidate of technical sciences, associate professor, chief of faculty of the Byisk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University.

O.S. Ivanov - candidate of technical sciences, senior research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.

A.G. Karpov - research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.

A.A. Antonnikova - candidate of physical-mathematical sciences, research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.



О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СТРУКТУРЫ МАКРОМОЛЕКУЛ ПОЛИМЕРОВ МЕТОДОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Елена Андреевна Бобина¹, Максим Петрович Данилаев²,
Владимир Александрович Куклин³, Иван Владимирович Лунев⁴,
Константин Владимирович Файзуллин⁵, Артур Маратович Ямаев⁶

^{1, 2, 3, 5} Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ, Казань, Россия
¹ eabobina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0196-1693>
² danilaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7733-9200>
³ iamkvova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-5837>
^{3, 4, 6} Казанский федеральный университет, Казань, Россия
⁴ lounev75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6201-4393>
⁵ KVFAyzullin@kai.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4507-058X>
⁶ yamzeg@gmail.com

Аннотация. Изменение поляризуемости полимеров определяется конформацией макромолекул и ее изменением при деформации полимера под действием внешней силы. При этом изменяется как энтропия, так и внутренняя энергия системы макромолекул полимера при его деформировании. В работе получена оценка характера изменения величины внутренней энергии при деформации полимеров от температуры. Рассмотрены полимеры с различной структурой макромолекул: полиметилметакрилат, поливинилхлорид, АБС-пластик, поливинилиденфторид. Показано, что наибольшие изменения внутренней энергии с ростом температуры соответствуют полимерам с разветвленной структурой макромолекул и макромолекул в виде клубков.

Ключевые слова: диэлектрическая спектроскопия, полимерные материалы, структура макромолекул полимеров.

Благодарности: Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению номер № 075-03-2025-335 от «16» января 2025 г. Диэлектрические измерения выполнены за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (Приоритет 2030).

Для цитирования: О возможности диагностики структуры макромолекул полимеров методом диэлектрической спектроскопии / Е. А. Бобина [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 242–246. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.031. EDN: <https://elibrary.ru/AHLZUZ>.

Original article

POSSIBILITY OF POLYMER MACROMOLECULS STRUCTURE DIAGNOSTICS BY DIELECTRIC SPECTROSCOPY METHOD

Elena A. Bobina¹, Maxim P. Danilaev², Vladimir A. Kuklin³, Ivan V. Lounev⁴,
Konstantin V. Fayzullin⁵, Arthur M. Yamaev⁶

^{1, 2, 3, 5} Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia
¹ eabobina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0196-1693>
² danilaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7733-9200>
³ iamkvova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-5837>
^{3, 4, 6} Kazan Federal University, Kazan, Russia
⁴ lounev75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6201-4393>
⁵ KVFAyzullin@kai.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4507-058X>
⁶ yamzeg@gmail.com

Abstract. The conformation of polymers macromolecules and there changes under the polymer deformation are determine the polymers polarizability change. So, the entropy and internal energy of polymers macromolecules system are change under the deformation. The dependent of internal energy variation by polymer deformation under the temperature are considered in that paper. The polymers with different structure of macromolecules are considered in that paper: polymethyl methacrylate, polyvinyl chloride, ABS plastic, polyvinylidene fluoride. It has been show that the greatest changes of internal energy variation by polymer deformation with temperature increasing correspond to polymers with a branched structure of macromolecules and macromolecules in the form of coils.

© Бобина Е. А., Данилаев М. П., Куклин В. А., Лунев И. В., Файзуллин К. В., Ямаев А. М., 2025

О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СТРУКТУРЫ МАКРОМОЛЕКУЛ ПОЛИМЕРОВ МЕТОДОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Keywords: dielectric spectroscopy, polymeric materials, polymer macromolecules structure.

Acknowledgements: Scientific research was carried out with the financial support of the Russian Ministry of Education and Science, Agreement No. 075-03-2024-067 dated 01/17/2024.

For citation: Bobina, E. A., Danilaev, M. P., Kuklin, V. A., Lunev I. V., Fayzullin, K. V. & Yamaev, A. M. (2025). Possibility of polymer macromolecules structure diagnostics by dielectric spectroscopy method. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 242-246. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.031. EDN: <https://elibrary.ru/AHLZUZ>.

ВВЕДЕНИЕ

Один из перспективных подходов к неинвазивной диагностике механических свойств полимерных материалов основан на анализе его диэлектрических спектров [1–4]. Ранние работы по формализации математических моделей, устанавливающих соответствие между модулем сдвига и диэлектрическими параметрами полимера, например, [1, 5], не учитывали особенностей изменения структуры полимера при деформации. Вследствие этого низкая адекватность моделей и необходимость использования эмпирических поправочных коэффициентов [4]. Современный подход к построению таких математических моделей учитывает, как правило, только деформацию макромолекул полимера при его нагружении [6, 7]. Этим объясняют изменение реальной части диэлектрической проницаемости с учетом ориентации усредненного дипольного момента макромолекулы, вдоль или поперек ее оси [8]. Такое рассмотрение позволило повысить адекватность моделей, в частности для эластомеров [7, 9], и может позволить проводить диагностику структурных изменений в полимере при его деформации. Последнее обстоятельство является чрезвычайно важным для целенаправленного управления механическими свойствами полимеров и их композиций.

Работа сил при деформировании полимера расходуется не только на изменение энтропии (второе слагаемое в (1)) [9, 10], но и на изменение внутренней энергии полимерного образца (первое слагаемое в (1)), вызванное отклонением всех структурных элементов (боковые группы, сегменты) макромолекулы от равновесного состояния:

$$F = \frac{\partial U}{\partial \Delta} \Big|_T + T \frac{\partial F}{\partial T} \Big|_{\Delta}. \quad (1)$$

Здесь T – температура, Δ – деформация, F – внешняя сила; $\frac{\partial U}{\partial \Delta} \Big|_T$ – изменение внутренней энергии полимера при деформации. Выражение (1) записано для равновесного состояния: $\Delta = \text{const.}$ По всей видимости, структурные изменения в полимере количественно описываются обоими членами уравнения (1), что ранее не учитывалось. Фактически во всех литературных источниках, например [7, 9, 11], сопоставляли изменение в структуре полимера только с упругой деформацией полимерного материала. Возможно, это обусловлено сложностями одновременного определения обоих членов уравнения (1). Существующие методы [10] определения значения величины $\frac{\partial U}{\partial \Delta} \Big|_T$ ограничиваются только заданной величиной деформации и носят сугубо эмпирический характер.

Цель данной работы состоит в определении значений и диагностики характера изменения внутренней энергии при деформировании полимеров с различ-

ной конформационной структурой макромолекул от температуры методами диэлектрической спектроскопии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определение величины $\frac{\partial U}{\partial \Delta} \Big|_T$ осуществляли из выражения (1) с учетом действия на образец постоянной внешней силы, обусловленной кулоновским притяжением заряженных пластин, расположенных на противоположных сторонах образца полимерного материала. Схема измерений приведена на рис. 1 и соответствует большинству экспериментальных и теоретических моделей [7, 9], устанавливающих связь между механическими и диэлектрическими свойствами полимеров.

Уравнение (1) для условий рис. 1 принимает вид:

$$\frac{\varepsilon_0 S U^2}{2I^2(1-\delta)^2} \varepsilon'(T) = \frac{\partial U}{\partial \Delta} \Big|_T + T S \Delta \frac{\partial Y E(T)}{\partial T} \Big|_{\Delta}, \quad (2)$$

где член в левой части (2) – сила притяжения пластин конденсатора; I , S – толщина и площадь под электродами образца полимера (рис. 1), $\delta = \frac{\Delta}{I}$ – относительная деформация образца; U – напряжение, прикладываемое к электродам, $\varepsilon'(T)$ – зависимость реальной части диэлектрической проницаемости от температуры (устанавливается экспериментально), $Y E(T)$ – модуль Юнга. Определение зависимости величины $\frac{\partial U}{\partial \Delta} \Big|_T \equiv f(\Delta, T)$ от деформации и температуры требует проведения экспериментальных исследований по выявлению $\varepsilon'(T)$ и $Y E(T)$.

Экспериментальные исследования проводились для четырех полимеров с различными, характерными для них, структурами макромолекул и механическими свойствами:

- полиметилметакрилат (ПММА): стеклообразный полимер с разветвленной структурой макромолекул [12], предельная деформация составляет $\Delta_{pr} \sim 5,5\%$, температура стеклования – $T_c \approx 105^\circ C$;

- поливинилиденфторид (ПВДФ): линейная структура макромолекул [13], $\Delta_{pr} \sim 100 \div 300\%$, $T_c \approx -35^\circ C$;

- акрилонитрилбутадиенстиrola пластик (АБС): макромолекулы свернуты в клубки [14], $\Delta_{pr} \sim 10 \div 20\%$, $T_c \approx 105^\circ C$;

- поливинилхлорид (ПВХ): эластомер со слаборазветвленными макромолекулами [14], $\Delta_{pr} \sim 20 \div 40\%$, $T_c \approx 80^\circ C$.

Образцы изготавливались методом литья под давлением; условия соответствовали технологическим рекомендациям [14]. Изотропность структуры образцов обеспечивали за счет длительной (более 10 мин.) их выдержки в нагретой пресс-форме при температуре выше температуры стек-

лования. Размеры образцов составляли $100 \times 20 \times 3$ мм, погрешность изготовления не превышала 10 %.

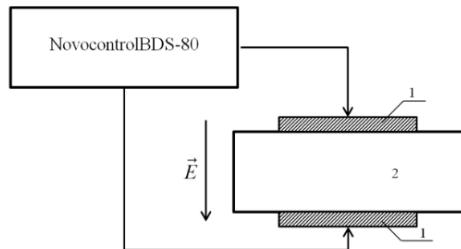


Рисунок 1 – Схема измерения диэлектрической проницаемости: 1 – электроды; 2 – образец полимерного материала

Figure 1 – Scheme of dielectric permittivity measurement:
1 - electrodes; 2 - sample of polymer material

Диэлектрические измерения проводились с помощью измерительного комплекса Novocontrol BDS-80. Измерительная ячейка представляла собой конденсатор: исследуемый образец располагали между двумя электродами, размещенными на его противоположных поверхностях. Площадь измерительных электродов – 45×20 мм 2 . Измерительные электроды (рис. 1) наносились на противоположные поверхности образцов полимеров методом напыления. Измерения проводились в диапазоне температур $0\text{--}70$ °C, точность поддержания температуры составила $\pm 0,5$ °C (использовался криостат Quatro Cryosystem). Амплитуда зондирующего колебания составила 300 В; относительная погрешность измерения диэлектрической проницаемости – 1 %.

В данной работе пренебрегали зависимостью диэлектрической проницаемости от Δ : сжимающая сила, действующая на образец со стороны пластин, составляет порядка $F = 2H$ при заданных условиях эксперимента. При типовом значении модуля Юнга ~ 1 ГПа для ПВДФ (меньшее значение из всех рассматриваемых полимеров) величина деформации составляет ~ 10 нм. Экспериментальные и теоретические исследования зависимости диэлектрической проницаемости от деформации, например, [6, 7], показывают, что такая зависимость существенна при больших значениях деформации $\delta > 0,5\%$.

Условие равновесного состояния (1) требует рассмотрения диэлектрической проницаемости только на нулевой частоте ($\varepsilon'(T)|_{f=0}$). Поэтому после измерения диэлектрические спектры аппроксимировали аналитическим выражением в диапазоне 1–1000 Гц с последующей экстраполяцией к точке $f \rightarrow 0$ и определением $\varepsilon'(T)|_{f=0}$. Аппроксимацию диэлектрических спектров проводили по аналогии с процедурами, описанными в работе [15] с применением уравнения Гаврильяка–Негами [16] для $\varepsilon'(T)|_{f=0}$.

Таблица 1 – Данные аппроксимации диэлектрических спектров
Table 1 – Dielectric spectrum approximation data

Тип образца	ε_{01}	ε_{11}	ε_{21}	ε_{31}	ε_{41}	$\varepsilon'(25^\circ\text{C}) _{f=0}$
ПММА	4,2	0,025	$-4,61 \cdot 10^{-4}$	$5,98 \cdot 10^{-6}$	$-1,03 \cdot 10^{-8}$	4,66
ПВДФ	12,47	1,45	-0,17	0,007	$-6,1 \cdot 10^{-5}$	32,5
АБС	3,12	$-9,9 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$-3,73 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-8}$	3,1
ПВХ	6,55	0,23	-0,012	$3,09 \cdot 10^{-4}$	$-2,17 \cdot 10^{-6}$	9,3

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пример диэлектрического спектра и температурная зависимость реальной части диэлектрической проницаемости приведены на рис. 2 для ПММА.

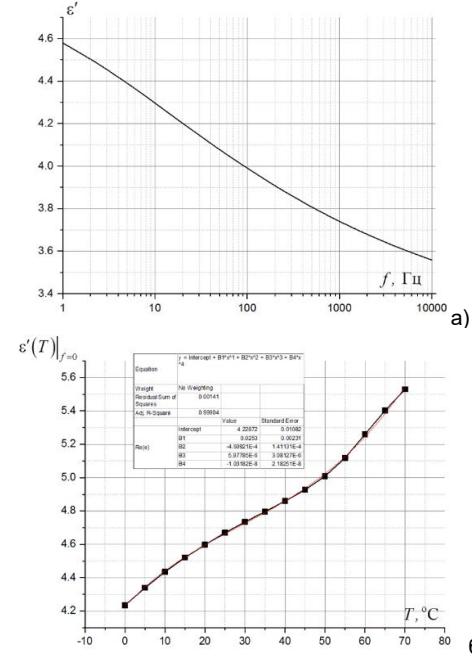


Рисунок 2 – Диэлектрические параметры ПММА:
а – диэлектрический спектр ПММА при 25°C ;
б – зависимость реальной части диэлектрической проницаемости от температуры при $f = 0$.

Figure 2 – Dielectric parameters of PMMA: a - dielectric spectrum of PMMA at 25°C ; b - dependence of real part of dielectric permittivity on temperature at $f = 0$

Температурная зависимость $\varepsilon'(T)|_{f=0}$ аппроксимировалась полиномом четвертой степени:

$$\varepsilon'(T)|_{f=0} = \varepsilon_{01} + \varepsilon_{11}T + \varepsilon_{21}T^2 + \varepsilon_{31}T^3 + \varepsilon_{41}T^4. \quad (3)$$

Параметры аппроксимации диэлектрических спектров и значения $\varepsilon'(T)|_{f=0}$ представлены в таблице 1.

$$\text{При определении величины } \frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T = \frac{\varepsilon_0 S U^2}{2I^2(1-\delta)^2} \varepsilon'(T) - T S \Delta \frac{\partial Y E(T)}{\partial T}|_A \quad (4)$$

использовали линейную аппроксимацию модуля Юнга от температуры $Y E(T)$, с учетом литературных данных [14]:

$$Y E(T) = Y E(0^\circ\text{C}) - [Y E(0^\circ\text{C}) - Y E(70^\circ\text{C})] \frac{T}{70}. \quad (5)$$

Данные для аппроксимации зависимости $Y E(T)$ приведены для средних значений модулей Юнга рассматриваемых полимеров в таблице 2. Результаты расчетов $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T \equiv f(\Delta, T)$ представлены на рис. 3.

О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ СТРУКТУРЫ МАКРОМОЛЕКУЛ ПОЛИМЕРОВ МЕТОДОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Таблица 2 – Данные аппроксимации температурной зависимости модуля Юнга
Table 2 – Data of Young's modulus temperature dependence approximation

Тип образца	$YE(0^\circ\text{C})$, ГПа	$YE(70^\circ\text{C})$, МПа
ПММА	4	400
ПВДФ	1	100
АБС	2	300
ПВХ	1,5	150

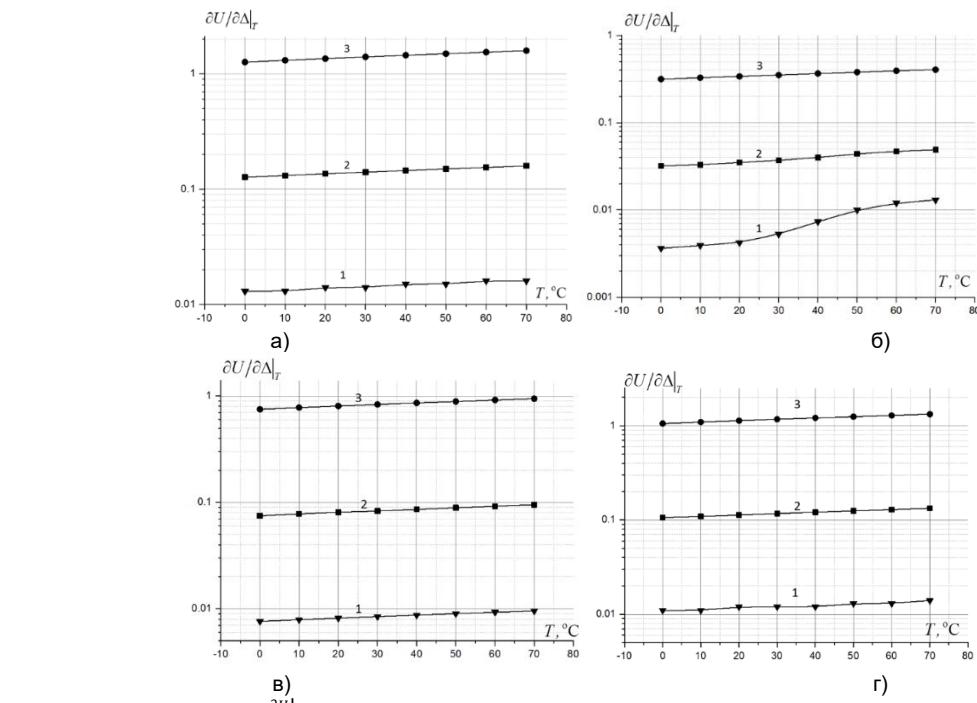


Рисунок 3 – Зависимости $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T$ от температуры: а – ПММА; б – ПВДФ; в – АБС пластик; г – ПВХ. 1 – $\Delta = 1\text{nm}$; 2 – $\Delta = 10\text{nm}$; 3 – $\Delta = 100\text{nm}$.

Figure 3 – Temperature dependences of: a - PMMA; b - PVDF; c - ABS plastic; d - PVC. 1 - $\Delta = 1\text{nm}$; 2 - $\Delta = 10\text{nm}$; 3 - $\Delta = 100\text{nm}$.

Зависимость $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T$ от деформации Δ линейна. Вероятно, это является следствием допущения независимости $\varepsilon'(T)|_{f=0}$ от Δ . Следует отметить, что в рассматриваемом диапазоне температур значение $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T$ отлично от нуля при $\Delta \rightarrow 0$ и увеличивается с ростом температуры (рис. 4). Значение $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_{T=0^\circ\text{C}}$ при $\Delta \rightarrow 0$ отлично от нуля и составляет $\sim 10^{-4}$.

Повышение первого члена уравнения (1) $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T$ с ростом температуры возможно объяснить увеличением амплитуды колебаний атомов в структурных элементах макромолекул полимера (боковых групп, сегментов, разветвленных частей). Абсолютные значения $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T$ имеют один порядок для рассматриваемых полимеров. По всей видимости, с увеличением температуры растет длина химических связей с ростом амплитуды колебаний атомов в боковой группе и увеличивается проекция вектора дипольного момента в направлении приложенного электрического поля. Это и объясняет рост реальной части диэлектрической проницаемости. Изменение реальной части диэлектрической проницаемости с ростом температуры наибольшее для ПВДФ, полимера с линейной структурой мак-

ромолекул. Для этого полимера реальная часть диэлектрической проницаемости увеличивается с $\varepsilon'(T = 0^\circ\text{C})|_{f=0} \approx 20$ до $\varepsilon'(T = 70^\circ\text{C})|_{f=0} \approx 240$. Для АБС-пластика, полимера со структурой макромолекул в виде клубков это изменение наименьшее и составляет $\varepsilon'(T = 70^\circ\text{C})|_{f=0} - \varepsilon'(T = 0^\circ\text{C})|_{f=0} \approx 0,5$.

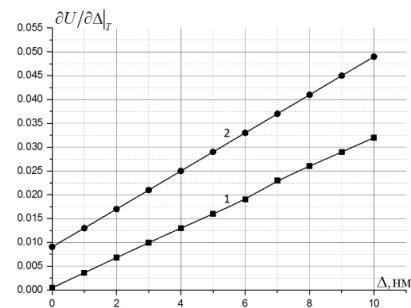


Рисунок 4 – Пример зависимости $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T$ от деформации для ПВДФ: 1 – $T = 0^\circ\text{C}$; 2 – $T = 70^\circ\text{C}$

Figure 4 – Example of strain dependence for PVDF: 1 - $T = 0^\circ\text{C}$; 2 - $T = 70^\circ\text{C}$

Увеличение длины химической связи с ростом температуры объясняет уменьшение силы взаимодействия между сегментами макромолекул. Уменьшается значение возвращающей силы, вследствие чего модуль Юнга снижается [14, 17].

ВЫВОДЫ

Диагностика значений и характера зависимости величины $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T$ полимеров от температуры и деформации возможно с использованием метода диэлектрической спектроскопии. Абсолютные значения величины $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T$ для рассматриваемых полимеров (полиметилметакрилат, поливинилиденфторид, АБС-пластик и поливинилхлорид) имеют одинаковый порядок. Однако большие изменения этой величины с ростом температуры соответствуют полимерам с разветвленной структурой макромолекул (ПММА и ПВХ) и макромолекул в виде клубков (АБС-пластик) при $\Delta = \text{const}$. Возможно, это обусловлено большими силами взаимодействия между структурными элементами макромолекул. Косвенно это подтверждается меньшим ростом реальной части диэлектрической проницаемости с ростом температуры для этих полимеров, по сравнению с ПВДФ.

Таким образом, характер изменения величины внутренней энергии $\frac{\partial U}{\partial \Delta}|_T$ обусловлен структурой макромолекул полимера, что может быть использовано для диагностики ее изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. DiMarzio E.A. & Bishop M. (1974). Connection between the macroscopic electric and mechanical susceptibilities. *The Journal of chemical physics*, 60(10), 3802–3811. doi: 10.1063/1.1680822.
2. Diaz-Calleja R., Riande E. (2004). Comparative study of mechanical and dielectric relaxations in polymers. *Materials Science and Engineering: A*, 370(1), 21–33. doi: 10.1016/j.msea.2003.08.069.
3. Garcia-Bernabé A., Sanchis M.J., Diaz-Calleja R., del Castillo L.F. (2009). Fractional Fokker-Planck equation approach for the interconversion between dielectric and mechanical measurements. *Journal of Applied Physics*, 106, (1), 014912. doi: 10.1063/1.3158555.
4. Danilaev M.P., Drobyshev S.V., Karandashov S.A., Klabukov M.A., Kuklin V.A., Lunev I.V. (2023). Dielectric spectroscopy method for polar polymers elastic properties diagnostics. *Testing. Diagnostics*, 26(7), 44–50. doi: 10.14489/td.2023.07.044-050.
5. Diaz-Calleja R., Garcia-Bernabé A., Sanchis M.J., del Castillo L.F. (2005). Interconversion of mechanical and dielectrical relaxation measurements for dicyclohexylmethyl-2-methyl succinate. *Phys. Rev. E. American Physical Society*, 72(5), 051505. doi: 10.1103/PhysRevE.72.051505.
6. Cohen N., Oren S.S., de Botton G. (2017). The evolution of the dielectric constant in various polymers subjected to uniaxial stretch. *Extreme Mechanics Letters*, 16, 1–5. doi: 10.1016/j.eml.2017.08.003.
7. Jiménez S.M.A., McMeeking R.M. (2013). Deformation dependent dielectric permittivity and its effect on actuator performance and stability. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 57, 183–191. doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2013.08.001.
8. Stockmayer W.H. (1967). Dielectric dispersion in solutions of flexible polymers. *Pure and Applied Chemistry*, 15(3–4), 539–554. doi: 10.1351/pac196715030539.
9. Cohen N., Dayal K., de Botton G. (2016). Electroelasticity of polymer networks. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 92, 105–126. doi: 10.1016/j.jmps.2016.03.022.
10. Zuev B.M., Sayakhova N.M., Arkhireev O.S., Gubanov E.F. (1994). The dependence of the path difference on elastic and hyperelastic deformation for network polymers. *High-molecular compounds*, 36(3), 402–406. (In Russian).
11. Vu-Cong T., Nguyen-Thi N., Jean-Mistral C., Sylvestre A. (2014). How does static stretching decrease the dielectric constant of VHB 4910 elastomer? *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 9056, 411–418. doi: 10.1117/12.2045042.
12. Schomaker E., Challa G. (1989). Complexation of stereoregular poly (methyl methacrylates). *Macromolecules*, 22(8), 3337–3341. doi: /10.1021/ma00198a025.
13. The basic structure of the stereocomplex of isotactic and syndiotactic poly(methyl methacrylate). *Macromolecules*, 22(8), 3337–3341. doi: /10.1021/ma00198a025.
14. Wan C., Rhys Bowen C. (2017). Multiscale-structuring of polyvinylidene fluoride for energy harvesting: the impact of molecular, micro- and macro-structure. *Journal of Materials Chemistry A. Royal Society of Chemistry*, 5(7), 3091–3128. doi: 10.1039/C6TA09590A.
15. Salamone J.C. (2020). *Polymeric materials encyclopedia*, Twelve volume set. CRC press, 2, 554 p.
16. Popov I., Cheng S., Sokolov A.P. (2022). *Broadband Dielectric Spectroscopy and Its Application in Polymeric Materials. Macromolecular Engineering*. 1st ed., 1–39. doi: 10.1002/9783527815562.mme0059.
17. Havriliak S., Negami S. (1966). A complex plane analysis of α -dispersions in some polymer systems. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 14(1), 99–117. DOI: 10.1002/polc.5070140111.

Информация об авторах

Е. А. Бобина – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронных и квантовых средств передачи информации» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

М. П. Данилаев – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронных и квантовых средств передачи информации» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

В. А. Куклин – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь междисциплинарной межвузовской лаборатории Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

И. В. Лунев – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Радиоэлектроники Казанского федерального университета.

К. В. Файзуллин – кандидат технических наук, заместитель начальника управления научно-исследовательской работы (УНИР) Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

А. М. Ямаев – аспирант Казанского федерального университета.

Information about the authors

E.A. Bobina - PhD, Associate Professor of the Department of "Electronic and Quantum Means of Information Transmission" of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

M.P. Danilaev - Doctor of Sciences, Professor of the Department of "Electronic and Quantum Means of Information Transmission" of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

V.A. Kuklin - PhD, research engineer, interdisciplinary interuniversity laboratory, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

I.V. Lounev - PhD, Associate Professor of the Department of "Radioelectronic" of Kazan Federal University.

K.V. Fayzullin - PhD, Deputy Head of the Research and Development Department (RDD) of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

A.M. Yamaev - postgraduate student of Kazan Federal University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК 539.23, 539.924

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.032

EDN: ASGEOOK

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЩИТНОЙ УГЛЕРОДНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ГРАФЕНА МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ

Ефим Петрович Неустроев ¹, Ирина Ивановна Куркина ²,
Данил Валерьевич Николаев ³

^{1, 2, 3} Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

¹ neustr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>

² ii.kurkina@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1076-0631>

³ dv.nikolaev@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5741-8836>

Аннотация. Предложена методика формирования защитного углеродного слоя для графеновых пленок на основе двухстадийного процесса, включающего осаждение атомов углерода в плазме метана и термообработку. Для осаждения атомов углерода использован радиочастотный индуктивно связанный источник плазмы мощностью 200 Вт. Длительность процесса осаждения в плазме метана составляло от 3 до 6 мин. Термообработки проведены в атмосфере инертного газа при температурах от 750 °C до 800 °C длительностью до 25 мин. Для характеристики поверхности использованы методы атомной силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Исследования методом атомно-силовой микроскопии показали, что предложенная методика позволяет успешно формировать углеродные пленки толщиной несколько десятков нанометров на поверхности исходной графеновой пленки, полученной методом газофазового осаждения. После травления в плазме кислорода мощностью 200 Вт и длительностью до 30 с синтезированной структуры формируются пленки нанометровых толщин с шероховатостью поверхности около 0,5 нм. Наблюдаемые в исходной графеновой пленке складки высотой от единиц до десятков нанометров на поверхности сформированных образцов не обнаружены. Из анализа спектров комбинационного рассеяния света следует, что после травления в плазме кислорода синтезированных структур до исходных толщин графеновых пленок имеет место восстановление основных графеновых G- и 2D-пиков в спектрах. Можно отметить некоторое возрастание интегральной интенсивности D-полосы, обусловленной наличием дефектов и нарушений в кристаллической решетке, которое частично может быть устранено термической обработкой.

Ключевые слова: графен, плазма, метан, осаждение углерода, углеродная пленка, термообработка, травление в плазме кислорода, морфология поверхности.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00065, <https://rscf.ru/project/23-79-00065/>.

Для цитирования: Неустроев Е. П., Куркина И. И., Николаев Д. В. Формирование защитной углеродной пленки на поверхности графена методом плазменного осаждения и термообработки // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 247–250. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.032. EDN: <https://elibrary.ru/ASGEOOK>.

Original article

FORMATION OF PROTECTIVE CARBON FILM ON THE SURFACE OF GRAPHENE BY PLASMA DEPOSITION AND HEAT TREATMENT

Efim P. Neustroev ¹, Irina I. Kurkina ², Danil V. Nikolaev ³

^{1, 2, 3} M.K. Ammosov North-Eastern Federal University

¹ neustr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>

² volkiraly@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1076-0631>

³ dv.nikolaev@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5741-8836>

Abstract. A technique has been proposed for the formation of a protective carbon layer for graphene films based on a two-stage process, including the deposition of carbon atoms in methane plasma and heat treatment. A 200 W radio frequency inductively coupled plasma source was used to deposit carbon atoms. The duration of the deposition process in the methane plasma ranged from 3 to 6 minutes. Heat treatments were carried out in an inert gas atmosphere at temperatures from 750°C to 800°C for up to 25 minutes. To characterize the surface, methods of atomic force microscopy and Raman spectroscopy were used. Studies using atomic force microscopy have shown that the proposed technique makes it possible to successfully form carbon films several tens of nanometers thick on the surface of the original gra-

© Неустроев Е. П., Куркина И. И., Николаев Д. В., 2025

phene film obtained by chemical vapor deposition. Etching the synthesized structure in oxygen plasma with a power of 200 W and a duration of up to 30 s leads to the formation of films with a thickness of several nanometers and a surface roughness of about 0.5 nm. Folds of the initial graphene film, which had a height of up to tens of nanometers, were not detected after the treatments. From the analysis of the Raman spectra it follows that after etching the synthesized structures in oxygen plasma to the initial thicknesses, the main graphene G- and 2D-peaks are restored. One can note a slight increase in the integral intensity of the D-band, due to the presence of defects and disturbances in the crystal lattice, which can be partially eliminated by heat treatment.

Keywords: graphene, plasma, methane, carbon deposition, carbon film, heat treatment, oxygen plasma etching, surface morphology.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-00065, <https://rscf.ru/project/23-79-00065>.

For citation: Neustroev, E. P., Kurkina, I. I. & Nikolaev, D. V. (2025). Formation of protective carbon film on the surface of graphene by plasma deposition and heat treatment. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 247-250. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.032. EDN: <https://elibrary.ru/ASGEO>.

ВВЕДЕНИЕ

Графен благодаря своим уникальным свойствам привлекает интерес для применения в широком круге практических приложений. В частности, благодаря великолепным транспортным свойствам и большому времени спиновой релаксации [1, 2] графен является перспективным материалом для спинtronики. С другой стороны, графен, как двумерный материал, обладает высокой удельной площадью поверхности [3]. Это делает его чрезвычайно чувствительным к воздействию окружающей среды. При практическом использовании графена не всегда удается в едином технологическом процессе провести необходимые манипуляции как в процессе синтеза, так и при измерениях параметров и характеристик приборных структур. Возникают потребности выноса структур с графеном на воздух, что приводит к абсорбции на поверхности O_2 , H_2O , NO_2 и других молекул [4, 5] и изменению электрических свойств [6]. Для решения этой проблемы можно изготавливать мультислойные графеновые пленки толщиной до 10 нм, которые будут утоняться непосредственно перед проведением процесса. В результате такого травления окисленные поверхностные слои будут удаляться, а оставшиеся слои графена станут подвергаться последующим технологическим операциям без выноса на воздух.

Плазменное осаждение является простым и эффективным методом получения углеродных пленок нанометровых толщин [7, 8]. Данным методом можно формировать «жертвенные» углеродные слои на поверхности графена, выращенного методом газофазового осаждения (CVD) на медной пленке и перенесенного на подложку кремний/диоксид кремния (Si/SiO_2).

Таким образом, целью данной работы стала разработка методики формирования «жертвенного» углеродного слоя на поверхности графена методом осаждения углерода в плазме метана и последующего отжига.

МЕТОДЫ

В качестве исходной пленки был использован CVD графен, осажденный на медную подложку и впоследствии перенесенный на подложку Si/SiO_2 . Процесс синтеза включал предварительную очистку поверхности подложки при температуре 1000–1040 °C

в течение 30–40 мин в потоке (100 см³/мин) смеси аргона и водорода. Формирование пленок графена производилось при дополнительной подаче метана со скоростью 5–10 см³/мин при температуре 1040–1050 °C и длительностью 10 мин. После окончания процесса образцы охлаждались естественным способом до комнатной температуры.

Осаждение углерода в плазме метана проведена на установке Этна-ПТ-100 (НТ МДТ, Россия). Для этого была использована радиочастотная (13,56 МГц) индуктивно связанный плазма. Травление пленок проведено в кислородной плазме. Параметры обработки: мощность плазмы (P) – 200 Вт, скорость потока метана – 40–60 см³, скорость потока кислорода – 80 см³/мин, рабочее давление в реакционной камере – 0,1–0,3 мбар. Время осаждения в плазме метана от 3 до 6 мин, время травления в плазме кислорода до 30 с. Температура образцов во время процесса не превышала 50 °C. Термообработки синтезированных структур проводились при температурах от 750 °C до 800 °C в атмосфере аргона. Для характеристики образцов использовалась спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) (Ntegra Spectra, Россия) при длине волны возбуждения 532 нм, атомно-силовая микроскопия (Ntegra Spectra, Россия) и оптическая микроскопия (Nikon Eclipse 100, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 показано изображение поверхности исходного мультислойного графена, полученного методом АСМ. На рисунке отчетливо видны светлые полосы, обусловленные наличием складок пленки. Высота складок составляла до 40 нм. Для оценки толщины графеновой пленки были сделаны надрезы заостренным металлическим лезвием. Метод оптической микроскопии по цветности изображения показал образование на месте надреза границы между графеновой пленкой и диоксидом кремния. Измерения методом АСМ границы раздела выявили наличие ступенек высотой ~4–5 нм (верхняя вставка рис. 1). Для оценки однородности рельефа проведена оценка шероховатости поверхности, которая составила в среднем 1,5–2 нм (нижняя вставка рис. 1).

Плазменная обработка в метане исследуемых CVD пленок приводит к осаждению атомов углерода на поверхность образцов. Это отчетливо прослеживалось как по изменениям цвета поверх-

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЩИТНОЙ УГЛЕРОДНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ГРАФЕНА МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ

ности пленок (рис. 2), так и по спектрам КРС (рис.4).

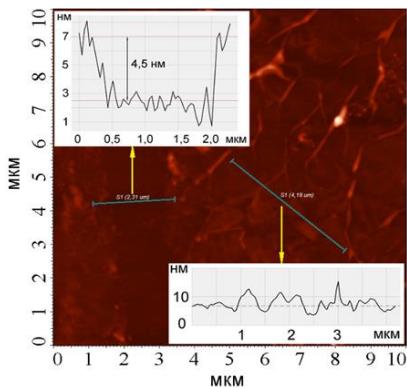


Рисунок 1 – ACM изображение поверхности CVD графена. На вставке сверху показана толщина пленки, внизу – шероховатость поверхности

Figure 1 – AFM image of the CVD graphene surface. The inset shows the film thickness at the top and the surface roughness at the bottom

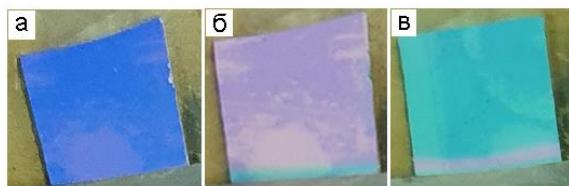


Рисунок 2 – Фотографии поверхности образцов: а) исходная графеновая пленка; после обработки в метане: б) 3 мин, 45 см³/мин и в) 6 мин, 60 см³/мин

Figure 2 – Photo of the surface of the samples: a) initial graphene film; b) 3 min, 45 sccm and c) 6 min, 60 sccm

После плазменного осаждения образцы были подвергнуты термообработке в диапазоне от 750 °C до 800 °C длительностью от 15 до 25 мин. С точки зрения сохранности структуры наиболее оптимальным оказалось время отжига 15 мин при T = 750 °C. Толщина сформированных пленок проявляет зависимость от условий плазменного осаждения и термообработки. Для примера: после плазменной обработки длительностью 6 мин при скорости потока 60 см³/мин и термообработки (750 °C, 15 мин) толщина составила ~35 нм.

Для оценки состояния скрытого слоя CVD-графена был проведен процесс травления пленок в плазме кислорода длительностью до 30 с. В результате этого поверхностные слои углеродной пленки эффективно удалялись. По методике, описанной выше, была исследована граница раздела между пленкой и подложкой. На рисунке 3 показано изображение ступеньки на этой границе, полученное методом ACM. Толщина пленки, измеренная на месте надреза, составила около 10 нм (при травлении длительностью 20 с) (верхняя вставка рис. 3). Значения шероховатости поверхности уменьшились по сравнению с исходным и составили ~0,5 нм (нижняя вставка на рис. 3). Также на поверхности не обнаружена складчатая структура поверхности, присущая в исходной CVD-пленке.

Спектры КРС CVD пленки до и после обработок показаны на рисунке 4. На рисунке отчетливо

видны характерные для графена G- и 2D-пика [9–11]. Также присутствует пик D, связанный с наличием нарушений в кристаллической структуре материала [9–11]. В спектрах КРС после примененных в работе процедур обработок можно отметить возрастание интенсивности D-пика и уменьшение интенсивности G- и 2D-пиков по сравнению с исходной CVD-пленкой.

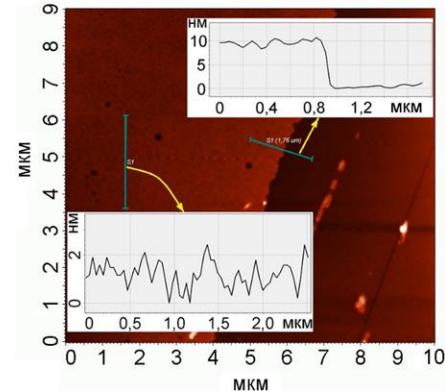


Рисунок 3 – ACM изображение поверхности образца после плазменного осаждения в метане, термообработки и травления в кислороде длительностью 20 с. На вставке сверху показана толщина пленки, снизу – шероховатость поверхности

Figure 3 – AFM image of the sample surface after plasma deposition of carbon in methane, heat treatment and etching in oxygen plasma for 20 s. The inset shows the film thickness at the top and the surface roughness at the bottom

Изменение интенсивности 2D-пика можно объяснить зависимостью от толщины пленки [9] и при дополнительном травлении в плазме кислорода с уменьшением количества слоев в мультислойном графене интенсивность 2D-пика будет расти.

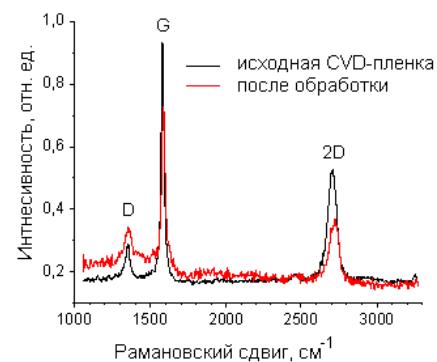


Рисунок 4 – Спектры комбинационного рассеяния исследованных пленок до и после обработок

Figure 4 – Raman spectra of the films before (black line) and after (red line) treatments.

Отношение интегральных площадей пиков D и G (I_D/I_G) до и после обработок составляет ~0,15 и ~0,72 соответственно. Это может быть вызвано как воздействием травления в кислородной плазме, приводящей к нарушениям структуры поверхностных слоев, так и формированием нанокристаллов с графитовой структурой при термообработках [7]. Образование наноразмерных кристаллов будет

приводить к росту относительной доли граничных областей. Границы зерен, как линейные дефекты, дают вклад в повышение интенсивности D-пика [12]. Введенные при плазменном травлении в кислороде дефекты можно устранить в процессе термического отжига [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика формирования защитной пленки для CVD графена, путем осаждения атомов углерода в плазме метана и последующей термообработки в атмосфере аргона при температуре 750 °C длительностью 15 минут. Для дальнейшего практического применения CVD-графена в конкретном технологическом процессе сформированный "жертвенный" слой можно удалить травлением в плазме кислорода. Причем, как показывают результаты измерения методом ACM, после травления формируются однородные углеродные пленки шероховатостью поверхности около 0,5 нм. Наблюдаемые в исходной графеновой пленке складки высотой до десятков нанометров после проведенных технологических процессов не обнаружены. Из анализа спектров КРС следует, что вид спектров исходного CVD-графена и графеновой пленки после проведения всех этапов предложенного процесса в целом соответствуют друг другу. Можно отметить некоторое возрастание интегральной интенсивности D-полосы, обусловленной наличием дефектов и нарушений в кристаллической решетке, которое частично может быть устранено термической обработкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Filnov S.O., Estyunin D.A., Klimovskikh I.I., Makarova T.P., Koroleva A.V., Rybkina A.A., Chumakov R.G., Lebedev A.M., Vilkov O.Yu., Shikin A.M., Rybkin A.G. (2023). Joint intercalation of ultrathin Fe and Co films under a graphene buffer layer on a SiC(0001) single crystal // *JETP Letters*, 2023, 117(5), 369–376. (In Russ.).
2. Avsar A., Ochoa H., Guinea F., Özylmaz B., Van Wees B.J., Vera-Marun I.J. (2020). Colloquium: Spintronics in graphene and other two-dimensional materials // *Reviews of Modern Physics*, 92(2), 021003. DOI: 10.1103/RevModPhys.92.021003.
3. Stoller M.D., Park S., Zhu Y., An J., Ruoff R.S. (2008). Graphene-based ultracapacitors // *Nano letters*, 8(10), 3498–3502. DOI: 10.1021/nl802558y.
4. Nan H.Y., Ni Z.H., Wang J., Zafar Z., Shi Z.X., Wang Y.Y. (2013). The thermal stability of graphene in air investigated by Raman spectroscopy // *Journal of Raman Spectroscopy*, 44(7), 1018–1021. DOI: 10.1002/jrs.4312.
5. Ni Z.H., Wang H.M., Luo Z.Q., Wang Y.Y., Yu T., Wu Y.H., Shen Z.X. / The effect of vacuum annealing on graphene // *Journal of Raman Spectroscopy*, 2010, 41(5), 479–483. DOI: 10.1002/jrs.2485.
6. Yang Y., Brenner K., Murali R. (2012). The influence of atmosphere on electrical transport in graphene // *Carbon*, 50(5), 1727–1733. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.12.008.
7. Neustroev E.P., Prokopyev A.R. (2019). Properties of nanographite formed by plasma deposition and subsequent heat treatment / Interuniversity collection of scientific papers "Physico-chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials", Tver: Tver. state University, 11, 629–635. (In Russ.). DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.629.
8. Neustroev E.P., Prokopyev A.R., Semenov S.O., Popov V.I., Protopopov F.F., Andreev A.S., Savinova N.A., Lukin E.S. (2021). Research of properties of a carbon film formed in methane plasma and the following annealing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1079(4), 042086. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042086.
9. Ferrari A.C., Meyer J.C., Scardaci V., Casiraghi C., Lazzeri M., Mauri F., Piscanec S., Jiang D., Novoselov K.S., Roth S. & Geim, A.K. (2006). Raman spectrum of graphene and graphene layers. *Physical review letters*, 97(18), 187401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.187401.
10. Li Z., Deng L., Kinloch I.A. & Young R.J. (2023). Raman spectroscopy of carbon materials and their composites: Graphene, nanotubes and fibres. *Progress in Materials Science*, 135, 101089. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101089.
11. Eckmann A., Felten A., Verzhbitskiy I., Davey R. & Casiraghi C. (2013). Raman study on defective graphene: Effect of the excitation energy, type, and amount of defects. *Physical Review B*, 88(3), 035426. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.035426>.
12. Chen J., Shi T., Cai T., Xu T., Sun L., Wu X. & Yu D. (2013). Self healing of defected graphene. *Applied Physics Letters*, 102(10). DOI: 10.1063/1.4795292.

Информация об авторах

Е. П. Неустров – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиофизика и электронные системы» Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

И. И. Куркина – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Графеновые нанотехнологии» Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

Д. В. Николаев – кандидат физико-математических наук, директор Физико-технического института Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

Information about the authors

E.P. Neustroev - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Radiophysics and Electronic Systems of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

I.I. Kurkina - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Graphene Nano-Technologies of the Department of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

D.V. Nikolaev - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Physico-Technical Institute of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

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

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принятая к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 620.179.16

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.033

EDN: BJQTQJ

ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ И ВТОРИЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ПРОЦЕСС ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Роман Владиславович Барсуков ¹, Роман Николаевич Голых ²,
Александр Романович Барсуков ³, Алексей Николаевич Сливин ⁴,
Владислав Анатольевич Шакура ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

¹ roman@bt.secna.ru

² grn@bt.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

³ barsukov.ar@bt.secna.ru

⁴ san@bt.secna.ru

⁵ shakura.va@u-sonic.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния кавитационных явлений и вторичных акустических эффектов на процесс деформации полимерных материалов в присутствии ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. В основе исследований лежит анализ динамики деформации тестовых образцов акрилонитрилбутадиенстирола при различных условиях (различная амплитуда ультразвукового воздействия, различные статические усилия воздействия на исследуемый образец). Результаты исследований иллюстрируют искажения динамики скорости деформации тестовых образцов на интервале их текущего состояния в присутствии ультразвуковых полей. Результаты исследований направлены на максимальное раскрытие потенциала ультразвуковой сварки полимеров, изучение вклада кавитационных явлений в процесс сварки полимерных материалов, в том числе с различными физическими свойствами.

Ключевые слова: ультразвук, кавитационные явления, сварка, полимеры, воздействие на вещество, интенсификация диффузии.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00314, <https://rscf.ru/project/24-22-00314/>.

Для цитирования: Влияние кавитационных явлений и вторичных акустических эффектов на процесс деформации полимерных материалов в присутствии ультразвуковых колебаний высокой интенсивности / Р. В. Барсуков [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 251–255. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.033. EDN: <https://elibrary.ru/BJQTQJ>.

Original article

INFLUENCE OF CAVITATION PHENOMENA AND SECONDARY ACOUSTIC EFFECTS ON THE PROCESS OF POLYMERIC MATERIALS DEFORMATION IN THE PRESENCE OF HIGH-INTENSITY ULTRASONIC OSCILLATIONS

Roman V. Barsukov ¹, Roman N. Golykh ²,
Aleksandr R. Barsukov ³, Alexey N. Slivin ⁴, Vladislav A. Shakura ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

¹ roman@bt.secna.ru

² grn@bt.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

³ barsukov.ar@bt.secna.ru

⁴ san@bt.secna.ru

⁵ shakura.va@u-sonic.ru

Abstract. The article is devoted to the study of the cavitation phenomena influence and secondary acoustic effects on the process of polymeric materials deformation in the presence of high-intensity ultrasonic oscillations. The research is based on the analysis of the deformation dynamics of acrylonitrile butadiene styrene test samples under various conditions (different amplitudes of ultrasonic action, different static forces of action on the sample under study). The research results illustrate the distortions of the deformation rate dynamics of test samples in the range of their fluid state in the presence of ultrasonic fields. The research results are aimed at maximizing the potential of ultrasonic welding of polymers, studying the contribution of cavitation phenomena to the welding process of polymeric materials, including those with different physical properties.

© Барсуков Р. В., Голых Р. Н., Барсуков А. Р., Сливин А. Н., Шакура В. А., 2025

Keywords: ultrasonic, cavitation phenomena, welding, polymers, effect on matter, diffusion intensification.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 24-22-00314, <https://rscf.ru/en/project/24-22-00314/>.

For citation: Barsukov, R. V., Golykh, R. N., Barsukov, A. R., Slivin, A. N. & Shakura, V. A. (2025). Influence of cavitation phenomena and secondary acoustic effects on the process of polymeric materials deformation in the presence of high-intensity ultrasonic oscillations. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 251-255. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.033. EDN: <https://elibrary.ru/BJQTQJ>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ультразвуковая (УЗ) сварка термопластичных материалов является одним из передовых способов их соединения. Данный способ сварки реализуется за счет воздействия ультразвуковыми колебаниями на соединяемые слои полимеров, за счет чего происходит разогрев до температуры плавления и их соединение.

Исследования различных авторов в области полимеров показывают, что в их расплавах в присутствии УЗ полей высокой интенсивности могут возникать различные гидродинамические эффекты, которые влияют (способствуют их ускорению) на диффузионные процессы.

В связи с этим, большой интерес представляет изучение вклада гидродинамических эффектов в процесс пластификации полимеров при наличии ультразвуковых полей высокой интенсивности, оценка вклада этих эффектов в процесс ультразвуковой сварки полимерных материалов. В первую очередь интерес представляют кавитационные явления, возникающие в расплавах полимеров, их влияние на реологические свойства расплавов и диффузионные процессы на границе раздела свариваемых полимерных материалов [1–4].

Существуют различные способы оценки кавитационных явлений [5–10], возникающих в жидких средах, большинство их которых неприменимы для проведения измерений в расплавах полимеров, что усложняет поставленную задачу.

Одним из вариантов изучения кавитационных явлений в расплавах полимеров и определения условий их зарождения является исследование динамики осадки полимерных материалов при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности.

Далее представлены результаты анализа динамики осадки тестовых образцов акрилонитрилбутадиенстирола (АБС пластика) толщиной 2,5 мм, при наличии УЗ воздействия и статического усилия, сжимающего образец, находящийся между неподвижной опорой и ультразвуковым волноводом.

МЕТОДЫ

На рисунке 1 показана механическая часть установки для контроля деформации термопластичных материалов при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями различной интенсивности, а также различных уровней статического воздействия УЗ излучателя на тестируемые образцы. В основе работы установки лежит система контроля перемещений УЗ излучателя.

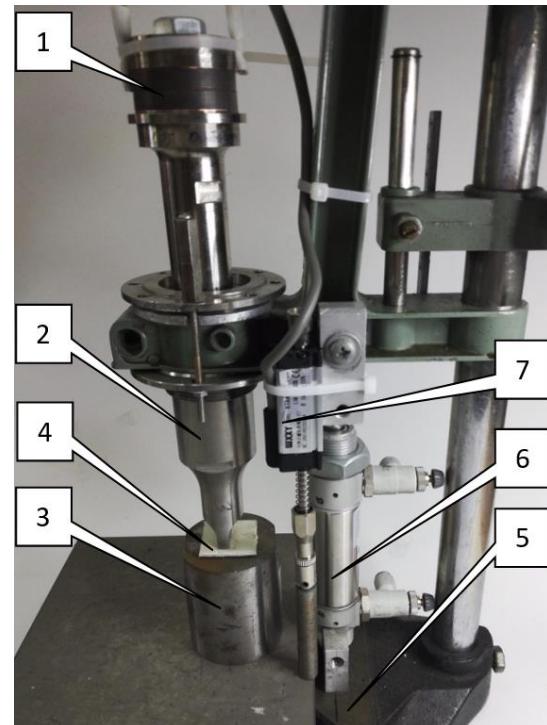


Рисунок 1 – Механический узел УЗ воздействия с пневматическим приводом и системой контроля перемещения УЗ излучателя

Figure 1 – Mechanical ultrasonic impact unit with a pneumatic actuator and a motion control system for ultrasonic emitter

Механический узел состоит из пьезоэлектрического преобразователя 1, волновода с рабочим инструментом 2, металлической опорной площадки 3, тестируемого образца 4, стандартного штатива 5, пневматического привода 6, датчика перемещений резистивного типа 7. В состав установки также входит блок АЦП, преобразующий сигнал с датчика перемещений в цифровой код и персональный компьютер со специализированным программным обеспечением, предназначенным для получения, обработки и визуализации получаемых экспериментальных данных.

Первичные данные, получаемые при работе стенда, представляют собой временную зависимость деформации тестируемого образца. Диапазон контролируемых деформаций составляет 5 мм (разрешающая способность установки при оценке деформаций составляет 204 точек/мм). В течение одной секунды стенд выдаёт 1000 измеренных значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительно, при помощи измерительного стенда были получены кривые, характерные для осадки пластического материала (пластилина), при его выдавливании из зазора между торцом УЗ волновода и опорой.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2025

ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ И ВТОРИЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ПРОЦЕСС ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

новода и опорной поверхностью при наличии статического усилия $F = 15\text{Н}$ и без подведения к тестовому образцу дополнительной энергии. На рисунках 2, а и 2, б представлены кривые, характеризующая деформацию тестового образца во времени, и кривые, характеризующая изменение скорости деформирования образца во времени соответственно.

Из представленных рисунков видно, что в процессе выдавливания пластического материала из зазора между подвижным волноводом и опорой деформация образца от времени не является линейной функцией. При малых зазорах между подвижным волноводом и опорой (менее 1 мм) скорость деформации резко снижается, что обусловлено особенностю выдавливания пластической массы через уменьшенный зазор. Представленные на рисунке 2 кривые, их характер в данной работе принимаются за «эталонное»

поведение пластичной среды, выдавливаемой из зазора экспериментальной установки.

Тестированию подвергались образцы АБС пластика толщиной 2,5 мм, статические усилия F на ультразвуковой волновод установливались равными $F_1 = 36\text{Н}$, $F_2 = 72\text{Н}$, $F_3 = 108\text{Н}$, амплитуда УЗ воздействия A устанавливалась равной $A_1 = 20\text{ мкм}$, $A_2 = 30\text{ мкм}$, $A_3 = 40\text{ мкм}$. Были получены данные для всевозможных сочетаний амплитуд УЗ воздействия и статических усилий, прикладываемых к тестируемым образцам.

На рисунке 3 представлены первичные данные, которые были получены в ходе каждого эксперимента. В данном случае – это сгруппированные зависимости для трёх различных экспериментов, проведённых при наличии статического усилия на УЗ волновод, равного $F_2 = 72\text{ Н}$ и амплитудах УЗ воздействия $A_1 = 20\text{ мкм}$, $A_2 = 30\text{ мкм}$, $A_3 = 40\text{ мкм}$.

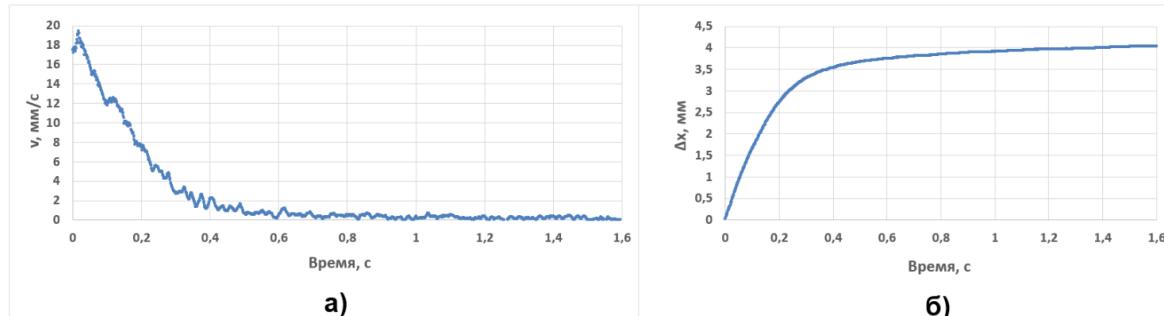


Рисунок 2 – Зависимость: а) пластической деформации образца от времени; б) скорости деформирования образца от времени

Figure 2 – Dependency: a) plastic deformation of the sample as a function of time;
b) the rate of deformation of the sample as a function of time

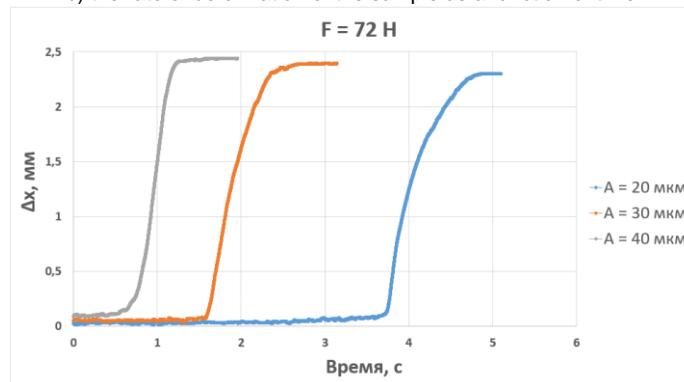


Рисунок 3 – Зависимость деформации тестовых образцов АБС пластика от времени для различных амплитуд УЗ воздействия

Figure 3 – Dependence of the deformation of ABS plastic test samples on time for various amplitudes of ultrasonic effects

Из представленных на рисунке 3 кривых видно, что при воздействии на тестовые образцы УЗ колебаниями с различной амплитудой:

- время от начала УЗ воздействия до начала пластификации различно и уменьшается при увеличении амплитуды УЗ воздействия;
- характер кривых на интервале пластического деформирования различный;
- время от начала пластической деформации до момента полного выдавливания расплава тестового образца из зазора экспериментальной установки различное (уменьшается при увеличении амплитуды УЗ воздействия).

Аналогичные первичные зависимости получены для всех условий проведения эксперимента.

Очевидно, что кавитационные явления в полимерных материалах возможны только тогда, когда они находятся в жидком состоянии (в состоянии расплава). При воздействии на твёрдый полимер УЗ колебаниями можно выделить несколько характерных временных интервалов:

- поглощение твёрдым полимером УЗ энергии и его разогрев;
- начало пластификации и пластификация твердого полимера;
- переход пластичного полимера в текучее состояние.

Таким образом, интерес представляет интервал времени, в течение которого полимер находится в текучем состоянии. На графиках, пред-

ставленных на рисунке 3, этот интервал начинается в окрестностях точки перегиба (когда первая производная функции принимает максимальное значение) и заканчивается моментом полного выдавливания расплава из зазора между УЗ волноводом и опорной площадкой. Было принято решение анализировать изменение скорости деформирования тестовых образцов, для чего первичные данные были продифференцированы.

На рисунке 4 представлены графики, иллюстрирующие эволюцию профиля скорости в ходе осадки тестируемых образцов для различных установок амплитуды УЗ воздействия на различных уровнях статического усилия воздействия на тестируемый образец.

Первая группа графиков, представленных на рисунке 4, а, иллюстрирует характер изменения скорости осадки тестового образца от времени при ультразвуковом воздействии с амплитудой $A_1 = 20 \text{ мкм}$ и различных статических усилиях воздействия УЗ инструментом на тестовый образец ($F_1 = 36 \text{ H}$, $F_2 = 72 \text{ H}$, $F_3 = 108 \text{ H}$). Этой группе графиков характерны следующие черты:

- резкое увеличение скорости осадки тестового образца до точки максимума;
- плавно замедляющийся (асимптотически приближающийся к нулю) спад скорости деформации до нуля.

Время полной деформации тестового образца от исходной толщины до нуля для статических усилий сжатия $F_1 = 36 \text{ H}$, $F_2 = 72 \text{ H}$, $F_3 = 108 \text{ H}$ составило 1,88 с, 1,2 с и 1,48 с соответственно.

Вторая группа графиков, представленных на рисунке 4, б, иллюстрирует характер изменения ско-

рости осадки тестового образца от времени при ультразвуковом воздействии с амплитудой $A_2=30 \text{ мкм}$ и различных статических усилиях воздействия УЗ инструментом на тестовый образец ($F_1 = 36 \text{ H}$, $F_2 = 72 \text{ H}$, $F_3 = 108 \text{ H}$). Этой группе графиков характерны следующие черты:

- так же, как и для первой группы графиков характерно резкое увеличение скорости осадки тестового образца до точки максимума;

- спад зависимостей визуально отличается от аналогичных кривых первой группы графиков (для различных уровней давления наблюдается либо локальное увеличение скорости, либо более линейный характер спада скорости, либо локальная стабилизация скорости с последующим резким спадом).

Время полной деформации тестового образца от исходной толщины до нуля для статических усилий сжатия $F_1 = 36 \text{ H}$, $F_2 = 72 \text{ H}$, $F_3 = 108 \text{ H}$ составило 1,98 с, 1,1 с и 1,0 с соответственно.

Третья группа графиков, представленных на рисунке 4, в, иллюстрирует характер изменения скорости осадки тестового образца от времени при ультразвуковом воздействии с амплитудой $A_3=40 \text{ мкм}$ и различных статических усилиях воздействия УЗ инструментом на тестовый образец ($F_1 = 36 \text{ H}$, $F_2 = 72 \text{ H}$, $F_3 = 108 \text{ H}$). Этой группе графиков характерна следующая черта:

- профиль скорости более острый и более симметричный.

Время полной деформации тестового образца от исходной толщины до нуля для статических усилий сжатия $F_1 = 36 \text{ H}$, $F_2 = 72 \text{ H}$, $F_3 = 108 \text{ H}$ составило 0,28 с, 0,7 с и 0,56 с соответственно.

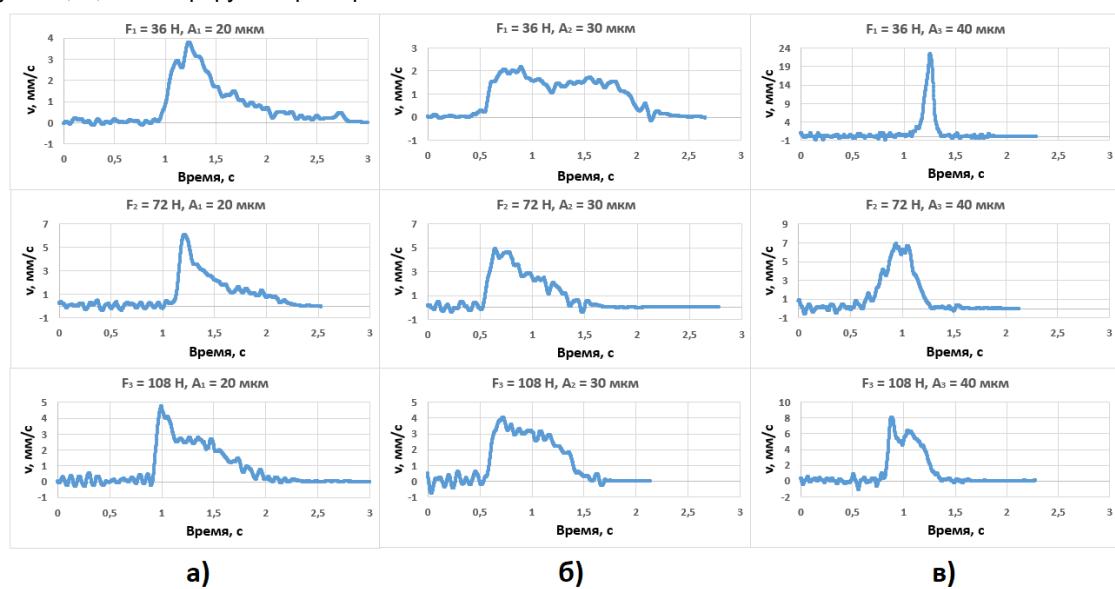


Рисунок 4 – Эволюция профиля скорости в ходе осадки тестового образца для различных установок амплитуды колебаний и статических усилий воздействия на тестируемые образцы

Figure 4 – Evolution of the velocity profile during precipitation of the test sample for various settings of the oscillation amplitude and static forces acting on the test samples

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы было показано, что при воздействии на полимер УЗ колебаниями высокой интенсивности на интервале нахождения

полимера в жидким состоянии, возможно зарождение в нём вторичных акустических эффектов, таких как кавитация, связанные с ней микропотоки и т.п., что выражается в искажении при определенных условиях

ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ И ВТОРИЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ПРОЦЕСС ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

(статическое давление, амплитуда УЗ воздействия), динамики деформации полимерных материалов.

Проведенные исследования являются частью работ, направленных на изучение новых механизмов инициации взаимной диффузии полимеров под действием ультразвука, изучении влияния гидродинамических эффектов (акустических микропотоков, кавитационных явлений, релаксационных эффектов вязкости и т.п.) на реологические свойства полимерных материалов. Результаты данных исследований, в частности, позволят в полной мере раскрыть потенциал ультразвуковой сварки полимерных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Prihod'ko, V.M., Nigmatyanov, R.I., Simonov, D.S., Sundukov, S.K. & Fatyuhin, D.S. (2020). Ultrasound in combined mechanical engineering technologies. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, (9), 21-26. (In Russ.). doi: 10.1063/5.0056988.
2. Asano, Y., Watanabe, H. & Noguchi, H. (2021). Effects of polymers on the cavitating flow around a cylinder: a large-scale molecular dynamics analysis. *The journal of chemical physics*, 155(1), e014905. doi: 10.1063/5.0056988.
3. Chen, Z., Wang, Y., Li, Z., Zhang, H., Wan, M., Zheng, N., Xiong, B. & Zhu, J. (2024). Control of nanocavitation in semi-crystalline polymer nanocomposites during uniaxial tension: in situ synchrotron X-ray study. *Polymer*, (296), e126786. doi: 10.1016/j.polymer.2024.126786.
4. Ohlopkova, T.A., Borisova, R.V., Nikiforov, L.A., Spiridonov, A.M., Sharin, P.P. & Ohlopkova, A.A. (2016). Liquid phase combination technology ultra-high molecular polyethylene with nanoparticles of inorganic compounds under the influence of ultrasonic vibrations. *The journal of applied chemistry*, 89(9), 1179-1186. (In Russ.).
5. Qian, L., Zhang, Y., Zhao, X., Xiang, M., Lu, Y. & Men, Y. (2021). Temperature dependency of cavitation in impact copolymer polypropylene during stretching. *Polymer*, 217(1), e123428. doi: 10.1016/j.polymer.2021.123428.
6. Tzanakis, I., Khavari, M., Titze, M. & Eskin, D.G. (2022). Cavitation in thermoplastic melts: new insights into ultrasound-assisted fibre-impregnation. *Composites Part B: Engineering*, 229(6), e109480. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109480.
7. Ultrasonic technologies and devices. Ultrasonic technological device of the "Volna" series. (2024). Retrieved from https://u-sonic.ru/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protessov_v_zhidkikh_sredakh/volna_v6_. (In Russ.).
8. Khmelev, V.N., Barsukov, R.V., Genne, D.V., Abramenco, D.S. & Barsukov, A.R. (2021). *Ultrasonic. Principles of construction, algorithms and control systems of ultrasonic devices*. Biysk: AltSTU. (In Russ.).
9. Sackmann, J. [et al.]. (2015). Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices. *Ultrasonics*, (56), 189-200. doi: 10.1016/j.ultras.2014.08.007.
10. Benatar, A. & Marcus, M. (2023). Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites. *Power Ultrasonics (Second Edition)*, 205-225. doi: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00006-3.

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

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

Информация об авторах

Р. В. Барсуков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Р. Н. Голых – доктор технических наук, профессор кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

А. Р. Барсуков – старший преподаватель кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

А. Н. Сливин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методов и средств измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

В. А. Шакура – младший научный сотрудник отдела научно-исследовательской работы сотрудников и преподавателей Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Information about the authors

R.V. Barsukov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

R.N. Golykh - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

A.R. Barsukov - Senior Lecturer of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

A.N. Slivin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

V.A. Shakura - Junior Research Fellow, Department of Research Work of Staff and Faculty of the Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 536.74
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.034

EDN: CLTFWQ

РАЗРАБОТКА ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АМ4,5Кд-10%ТiС С УЛУЧШЕННЫМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Альфия Расимовна Луц

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия
alya_luts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7889-9931>

Аннотация. Дисперсно армированные композиционные материалы отличаются уникальным сочетанием прочности, твердости и износостойкости, что позволяет отнести их к группе перспективных конструкционных материалов. В статье рассмотрены результаты армирования сплава АМ4,5Кд методом самораспространяющейся высокотемпературного синтеза фазой карбida титана в количестве 10 масс.%. Показана возможность формирования в расплаве АМ4,5Кд при температуре 900 °C из промышленных порошков титана и технического углерода микронных размеров частиц карбida титана с размерами от 100 нм, а также сохранения уровня дисперсности армирующей фазы и после проведения стандартной для матричного сплава термической обработки в виде закалки с 545 °C и старения при 170 °C в течение 4 ч. Методом рентгенофазового анализа определено, что содержание карбидной фазы составляет не менее 9 масс.%, а после термической обработки происходит дополнительное выделение интерметаллической θ -фазы (Al_2Cu) в количестве 2 масс.%. Проведен комплекс исследований физических, химических, механических и трибологических характеристик. Установлено, что полученный композиционный материал, как и матричный сплав, сохраняет высокую плотность, достаточный уровень электропроводности, стойкость к термическому расширению и коррозии, но при этом демонстрирует повышенные показатели твердости, микротвердости и прочности на сжатие с сохранением достаточного запаса пластичности. Помимо этого, при нагрузке 400Н характеризуется не менее чем трехкратным уменьшением скорости износа и коэффициента трения и повышенной более чем в полтора раза максимальной нагрузкой схватывания при сохранении уровня температурного саморазогрева. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанный композиционный материал АМ4,5Кд-10%ТiС для изготовления деталей трибосопряжений, эксплуатирующихся при повышенных нагрузках и температурах.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, карбид титана, композиционный материал, самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

Для цитирования: Луц А. Р. Разработка дисперсно армированного композиционного материала АМ4,5Кд-10%ТiС с улучшенными трибологическими характеристиками // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 256–261. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.034. EDN: <https://elibrary.ru/CLTFWQ>.

Original article

DEVELOPMENT OF A DISPERSED REINFORCED COMPOSITE MATERIAL AM4.5Kd-10%TiC WITH IMPROVED TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS

Alfiya R. Luts

Samara State Technical University, Samara, Russia
alya_luts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7889-9931>

Abstract. Dispersed reinforced composite materials are distinguished by a unique combination of strength, hardness and wear resistance, which allows them to be classified as a group of promising structural materials. The article considers the results of reinforcement of the AM4.5Kd alloy by the method of self-propagating high-temperature synthesis with a titanium carbide phase in the amount of 10 wt.%. The possibility of formation in the melt of AM4.5Kd at a temperature of 900°C from industrial titanium and carbon black powders of micron-sized titanium carbide particles with sizes from 100 nm, as well as maintaining the level of dispersion is shown. The reinforcing phase and after the standard matrix alloy thermal treatment in the form of quenching at 545°C and aging at 170°C for 4 hours. By X-ray phase analysis, it was determined that the content of the carbide phase is at least 9 wt.%, and after heat treatment, an additional separation of the intermetallic θ -phase (Al_2Cu) occurs in the amount of 2 wt.%. A complex of studies of physical, chemical, mechanical and tribological characteristics has been carried out. It was found that the resulting composite material, like the matrix alloy, retains high density, a sufficient level of electrical conductivity, resistance to thermal expansion and corrosion, but at the same time demonstrates increased hardness, microhardness and compressive strength while maintaining a sufficient margin of plasticity. In addition, at a load of 400H, it is characterized by at least a threefold decrease

РАЗРАБОТКА ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АМ4, 5Кд-10%ТiС С УЛУЧШЕННЫМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

in the wear rate and coefficient of friction and an increased maximum setting load by more than one and a half times while maintaining the level of temperature self-heating. The results obtained allow us to recommend the developed composite material AM4.5Kd-10%TiC for the manufacture of tribo-coupling parts operated under increased loads and temperatures.

Keywords: aluminum alloys, titanium carbide, composite material, self-propagating high-temperature synthesis.

For citation: Luts, A. R. (2025). Development of a dispersed reinforced composite material AM4.5Kd-10%TiC with improved tribological characteristics. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 256-261. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.034. EDN: <https://elibrary.ru/CLTFWQ>.

ВВЕДЕНИЕ

Литые композиционные материалы на алюминиевой основе, включающие дисперсные керамические частицы, отличаются повышенным и трибологическими свойствами, что делает их перспективными для применения в автомобиле- и авиастроении [1, 2]. Однако их прочностные характеристики, особенно при повышенных температурах, остаются недостаточными, что обуславливает активные исследования ученых, которые условно можно разделить на два основных направления.

Во-первых, увеличение прочности можно реализовать за счет повышения степени дисперсности армирующей фазы до наноразмерных значений, что позволит эффективно задействовать механизмы Орована и Петча-Холла [3, 4]. Во-вторых, достигнуть упрочнения можно за счет введения легирующих элементов в состав матричного алюминия. При их небольшом количестве может наблюдаться эффект повышения смачиваемости частиц керамической фазы за счет того, что некоторые легирующие элементы (например, Mg, Mo и др.) сегрегируют на границе раздела, уменьшая ее энергию, и тем самым способствуют повышению уровня адгезии и равномерному распределению частиц по объему композиционного материала [5]. При более значительном содержании легирующих элементов вступают в действие известные традиционные механизмы – твердообразовное и/или дисперсионное упрочнение.

Наиболее перспективным направлением является совмещение представленных технологических приемов, т.е. целесообразна разработка новых композиционных материалов на алюминиевой легированной матрице, содержащей армирующую фазу высокой дисперсности. Для осуществления этого пути необходимо тщательно подойти к выбору способа производства. Твердофазные методы изготовления, как правило, отличаются сложным аппаратурным оформлением и высокой стоимостью процессов. Поэтому более оправданным является применение жидкофазных способов, самый распространенный из которых – метод механического замешивания частиц в расплав – прост в исполнении и доступен технологически, поскольку реализуется на стандартном литьевом оборудовании, однако его использование зачастую затруднено низкой смачиваемостью высокодисперсных частиц и их склонностью к агломерированию, а кроме того, и высокой стоимостью керамических нанопорошков. В этой связи перспективным является применение метода самораспространяющегося синтеза (СВС), который позволяет формировать керамическую дисперсную фазу в результате экзотермического взаимодействия исходных компонентов сразу в расплаве, т.е. *in-situ*. Наиболее

подходящим для реализации СВС в расплаве алюминия является тугоплавкое соединение карбida титана, реакция образования которого из элементных порошков титана и углерода отличается значительным выделением тепла, а близость размерных параметров кристаллической решетки ГЦК у TiC и α -Al позволяет его частицам хорошо смачиваться расплавом и служить эффективными центрами кристаллизации. При этом собственные высокие показатели твердости, модуля упругости и температуры плавления карбида титана способны обеспечить повышение механических характеристик синтезируемых композитов.

В РФ есть ряд примеров получения *in-situ* фазы карбида титана в расплаве алюминия и, например, в работе [6] установлена возможность синтеза данной фазы с размерами до 1 мкм из порошков титана и нанопорошка графита в расплаве алюминия технического Аб при температуре 750 °C в общем количестве до 0,3 масс.%, что позволяет повысить прочность с 69 до 83 МПа. А в исследовании [7] показана возможность получения многофазных композитов систем Al-Ti-SiC-B₄C и Al-Ti-SiC-B путем введения частиц SiC, B₄C микронных размеров и попутного синтеза фаз TiC, TiB₂, TiB, AlB₂, TiAl (о размерах не сообщается) при температуре расплава алюминия 825 °C с использованием комплексного флюса, включающего 9,4%KCl, 6%NaCl, 4,6%Na₃AlF₆ и 80%(Al₂O₃·2SiO). Предполагается, что экзотермические реакции образования сопутствующих армирующих фаз, в т.ч. TiC, повышают температуру расплава и тем самым создают условия для лучшего усвоения карбидов кремния и бора, что позволяет в значительной степени улучшить износостойкость получаемых материалов.

Анализ зарубежных публикаций также показал наличие успешных разработок, позволяющих, например, из смеси порошков титана и графита получать методом СВС в расплаве алюминия 6–12 об. %TiC с размером частиц до 1 мкм [8]. В работе [9] изготавливают композиты путем ввода шихты из лигатурного сплава Al-10%Ti и активированного угля в расплав алюминия при 1250 °C с последующей выдержкой в течение 30 минут. Результатом является получение равномерно распределенных частиц TiC с размером 0,5 мкм в количестве 3, 5 и 10 масс.% и фазы Al₃Ti, что приводит к увеличению твердости и прочности до 32,9, 37, 41 HV и 123, 142, 189 МПа при некотором снижении относительного удлинения до 16, 12 и 5% соответственно. Приведенные технологии позволяют синтезировать карбидную фазу высокой дисперсности в составе исходной алюминиевой основы. Но и в присутствии легирующих элементов возможно формирование высокодисперсной фазы карбида титана, которая оказывает свое положи-

тельное влияние и, например, в исследовании [10] отмечается, что присутствие 0,1–1,0 масс.% наноразмерных частиц TiC в матрице алюминий–медь способствует кратному измельчению зерна и существенному повышению дисперсности θ -фазы (Al₂Cu). Наиболее убедительно преимущество армирования именно наноразмерной карбидной фазой показано в исследовании [11], где проведено сравнение свойств композитов, полученных на основе Al-5%Cu путем механического замешивания 0,1–1,0 масс.% наноразмерных частиц TiC_p и 1,0–5,0 масс.% микроразмерных TiC_p с последующей термической обработкой T6 (выдержка под закалку 12 ч. при 538 °C и старение 10 ч. при 165 °C). Максимальные показатели по износостойкости при 180 °C имел образец, содержащий 0,5 масс.% наночастиц TiC, что оказалось на 83,5 % выше, чем у матричного сплава Al–Cu и на 16,5 % выше, чем у образца с 5 масс.% микроразмерных частиц TiC.

Приведенный обзор публикаций доказывает перспективность работ в этом направлении, но, как видно, большинство исследователей ограничивают количество введенной фазы 1 %, а в немногочисленных работах, где композиты содержат большее количество армирующей фазы, их свойства полноценно не исследованы. Однако в Самарском государственном техническом университете разработана и успешно применяется собственная методика СВС 10 масс.%TiC нано- и субмикронных размеров в расплавах технического алюминия, модельных сплавов Al-5%Cu, Al-5%Cu-2%Mn, Al-5%Cu-4%Ni и промышленных сплавов AMg2, AMg6, AK10M2H, что позволяет существенно повысить их показатели твердости, микротвердости, прочности на сжатие и износостойкости [12, 13]. Полученные результаты могут быть эффективно применены для армирования и других алюминиевых сплавов, к которым предъявляются особые требования по твердости и износостойкости. К числу таких относится литейный сплав AM4,5Кд (ВАЛ10), который по прочности превосходит распространенный сплав AM5 и применяется для изготовления тяжелонагруженных узлов, работающих при температурах до 300 °C преимущественно в аэрокосмическом комплексе [14]. В связи с этим, целью данной работы было поставлено получение методом СВС композиционного материала AM4,5Кд-10%TiC, проведение термической обработки и изучение комплекса его свойств.

МЕТОДЫ

В ходе исследований в качестве матричной основы использовался литейный сплав AM4,5Кд, выплавленный по ГОСТ 1583-93, нагрев которого осуществлялся до температуры 900 °C в плавильной печи ПП20/12. Для синтеза армирующей фазы в расплав вводились в алюминиевой фольге порошки титана ТПП-7 (ТУ 1715-449-05785388) и технического углерода П-701 (ГОСТ 7885-86), взятые в стехиометрическом соотношении, с добавкой в качестве флюса порошка соли Na₂TiF₆ (CAS 17116-13-1) в количестве 5 % от массы шихты. Микроскопический анализ образцов проводился с применением растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6390A, рентгенофазовый анализ – по-

средством автоматизированного дифрактометра ARL X'tra (Thermo Scientific). Количественная обработка рентгенограмм осуществлялась с помощью программы High Skore Plus. Термическая обработка проводилась на цилиндрических образцах с размерами 20x20 мм в лабораторной печи сопротивления Накал ПЛ5/12,5.

Определение плотности образца проводилось путем гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018-74, исследование электропроводности – по ГОСТ 27333-87. Коэффициент термического линейного расширения определялся на механическом дилатометре путем измерения удлинения цилиндрических стержней в течение 5 часов с шагом 25 °C до 300 °C. Коррозионная стойкость исследовалась по ГОСТ 58346-2019 при условиях: водный раствор 5 % NaCl; газовая фаза 1 МПа CO₂, 0,5 МПа H₂S, 3,5 МПа N₂; температура 80 °C; время выдержки 240 часов; общее давление 5 МПа. Расчет показателей коррозионной стойкости осуществлялся по ГОСТ 9.908-85.

Твердость образцов определялась методом Бринелля по ГОСТ 9012-59, микротвердость – по ГОСТ 9450-76. Испытания на одноосное сжатие осуществлялись на машине Instron 5988 по ГОСТ 25.503-97 на образцах III типа с диаметром 20 мм, высотой 40 мм. Трибологические испытания выполнялись на триботехническом комплексе «Универсал-1Б» по схеме трения скольжения: «кольцо (контртело) – плоскость (образец)». Материал контртела – сталь 40Х (закалка, отпуск, HB = 420 кгс/мм²). Средний диаметр кольцевой поверхности трения 5 мм. Частота вращения шпинделя – 600 мин⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе экспериментального синтеза композиционного материала AM4,5Кд-10%TiC наблюдалась активная реакция СВС со значительным искро- и газообразованием, а анализ микроструктуры образца показал формирование множества дисперсных частиц карбида титана с размерами от 100 нм (рисунок 1, а–е). Проведенная далее серия экспериментов с варьированием температурно-временными параметрами термической обработки позволила установить, что максимальную твердость композита 142 HB можно достичь в результате проведения закалки с температуры 545 °C и старения при 170 °C в течение 4 ч., сохранив при этом уровень дисперсности карбидной фазы (рисунок 1, г–е). Результаты рентгенофазового анализа композита AM4,5Кд-10%TiC до и после термической обработки свидетельствуют о присутствии в составе композита не менее, чем 9 % фазы карбида титана (полученные значения в используемой программе High Skore Plus округляются до целых единиц, поэтому реальное содержание возможно до 9,5 масс.% TiC), причем ее наличие не препятствует выделению из твердого раствора 2 масс.% упрочняющей θ -фазы (Al₂Cu) в ходе проведенного старения (рисунок 2).

Исследование комплекса характеристик для сравнения проводилось на образцах матричного сплава AM4,5Кд (с аналогичным режимом термической обработки) и синтезированного композиционного материала, результаты приведены в таблицах 1–3.

РАЗРАБОТКА ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АМ4, 5Кд-10%TiC С УЛУЧШЕННЫМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

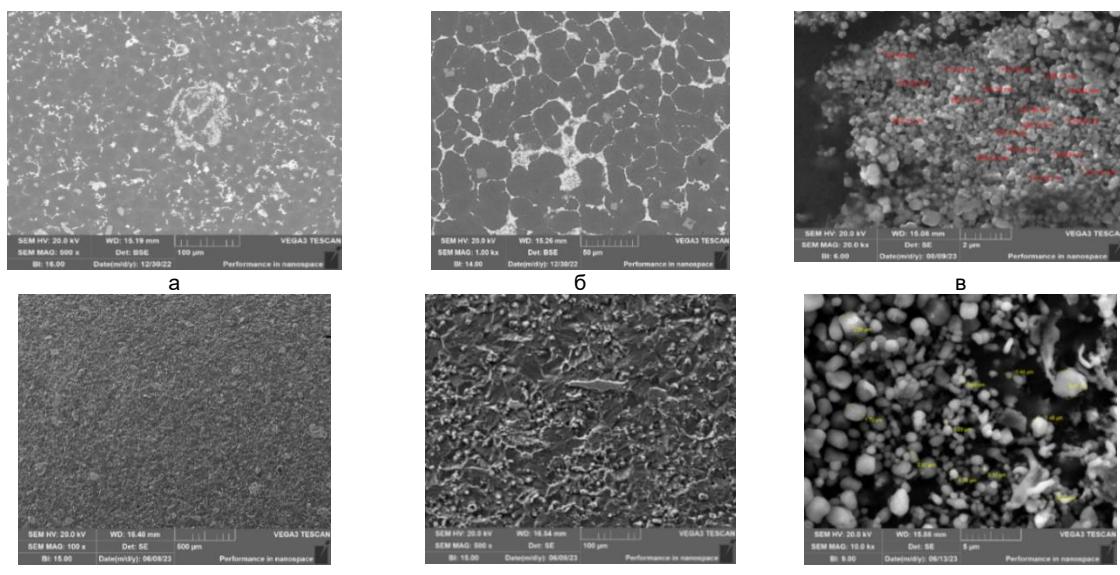


Рисунок 1 – Микроструктура образца АМ4,5Кд-10%ТiС до (а, б, в) и после (г, д, е) термической обработки

Figure 1 – Microstructure of the sample AM4.5Kd-10%TiC before and after heat treatment

Интенсивность

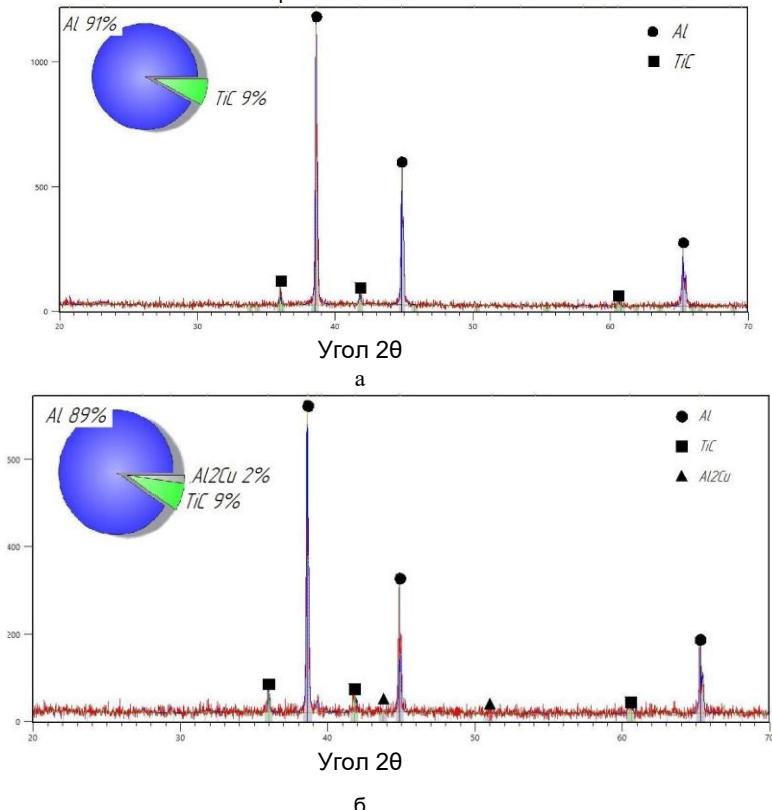


Рисунок 2 – Рентгенофазовый анализ образца АМ4,5Кд-10%ТiС до (а) и после (б) термической обработки

Figure 2 – X-ray phase analysis of the AM4.5Kd-10%TiC sample before and after heat treatment

Таблица 1 – Физические и химические свойства / Table 1 – Physical and chemical properties

Образец	Плотность, ρ , $\text{г}/\text{см}^3$	Электропроводность, G , $\text{МСм}/\text{м}$	КТЛР*, α , 10^{-6} К^{-1}	Скорость коррозии, V , $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Глубинный показатель коррозии, π , $\text{мм}/\text{год}$
AM4,5Кд, без т/o	2,80	15,0	30,8	0,259	0,0008
AM4,5Кд, после т/o	2,80	15,0	29,3	0,399	0,0012
AM4,5Кд-10%TiC, без т/o	2,93	13,5	33,4	0,319	0,0009
AM4,5Кд-10%TiC, после т/o	2,93	13,6	30,8	0,675	0,0019

* при температуре 300 °C

Таблица 2 – Механические свойства / Table 2 – Mechanical properties

Образец	Твердость, НВ 10 ⁻¹	Микротвердость, HV, МПа	Прочность на сжатие	
			σ_s , МПа	ε , %
AM4,5Кд, без т/о	61,3	604	324	65
AM4,5Кд, после т/о	135,9	1323	532	40
AM4,5Кд-10%TiC, без т/о	76,1	1008	355	62
AM4,5Кд-10%TiC, после т/о	142,0	1393	568	32

Таблица 3 – Трибологические свойства [15] / Table 3 – Tribological properties

Образец	Скорость изнашивания*, мкм/час	Коэффициент трения*	Температура саморазогрева, °C	Максимально допустимая нагрузка, Н**
AM4,5Кд, без т/о	11,5	0,12	70	-
AM4,5Кд, после т/о	3	0,08	65	700
AM4,5Кд-10%TiC, без т/о	5,25	0,08	67	-
AM4,5Кд-10%TiC, после т/о	1,25	0,03	65	1200

* при нагрузке 400 Н

** нагружение до достижения схватывания (задир)

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ физических и химических свойств образцов матричного сплава и композиционного материала показал, что показатели плотности и электропроводности в обоих случаях не претерпевают изменений в результате термообработки (таблица 1) и наблюдается некоторое снижение коэффициента линейного термического расширения, что объясняется повышением уровня адгезионной связи на границах раздела фаз. Однако в присутствии частиц карбидной фазы незначительно снижаются показатели коррозионной стойкости, хотя значения все же остаются на уровне, позволяющем отнести полученный композит к группе весьма стойких к коррозии материалов [16].

Данные результаты механических характеристик свидетельствуют о существенно возросших значениях твердости, микротвердости и прочности на сжатие при сохранении достаточной пластичности (таблица 2), что обусловлено высокой дисперсностью и удельной прочностью самих керамических частиц, выделением интерметаллической θ -фазы и повышенной плотностью дислокаций после термообработки [17, 18]. Кроме того, так же, как присутствие кадмия, приводит к микроискажениям матричной решетки и интенсификации распада твердого раствора с образованием более плотных зон ГП, аналогично и наличие множества высокодисперсных керамических частиц, безусловно, привносит дополнительные напряжения, ускоряющих процесс распада твердого раствора.

Наиболее значительным оказалось влияние частиц карбидной фазы на трибологические характеристики (таблица 3) и при постоянно действующей нагрузке 400 Н их присутствие позволяет достигать не менее чем трехкратного снижения скорости износа и коэффициента трения при сохранении уровня температуры саморазогрева, а максимальная нагрузка схватывания до появления задира повышается с 700 до 1200 Н.

ВЫВОДЫ

Полученный методом СВС в расплаве композиционный материал AM4,5Кд-10%TiC характеризуется повышенным комплексом механических и

трибологических характеристик с достаточным уровнем термического расширения и коррозионной стойкости, что позволяет рекомендовать его для изготовления узлов трибосопряжений, эксплуатирующихся при повышенных нагрузках и температурах в различных средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исследование механических свойств перспективных алюмоматричных композиционных материалов, армированных SiC и Al₂O₃ / Ю.А. Курганова [и др.] // Материаловедение. 2021. № 6. С. 34–38. doi.org/10.31044/1684-579X-2021-0-6-34-38.
- Kar A., Sharma A., Kumar S.A. Critical Review on Recent Advancements in Aluminium-Based Metal Matrix Composites // Crystals. 2024. № 14(412). Р. 1–42. doi: 10.3390/cryst14050412.
- Sanaty-Zadeh A. Comparison between current models for the strength of particulate-reinforced metal matrix nanocomposites with emphasis on consideration of Hall-Petch effect // Materials Science and Engineering A. 2012. № 531(1). Р. 112–118. doi: 10.1016/j.msea.2011.10.043.
- Zhang Z., Chen D.L. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites // Materials Science and Engineering A. 2008. № 483(15). Р. 148–152. doi: 10.1016/j.msea.2006.10.184.
- Михеев Р.С., Чернышова Т.А. Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники. М. : Издание РФФИ, 2013. 353 с.
- Терентьев Н.А. Исследование и разработка литьевых технологий при получении дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2017. 19 с.
- Панфилов А.А. Разработка алюмоматричных композиционных сплавов и усовершенствование жидкокристаллической технологии их получения для отливок с повышенными триботехническими свойствами : автореф. дис ... канд. техн. наук. Владимир, 2011. 22 с.
- Cho Y.H., Lee J.M., Kim S.H. Composites Fabricated by a Thermally Activated Reaction Process in an Al Melt Using Al-Ti-C-CuO Powder Mixtures. Part I: Microstructural Evolution and Reaction Mechanism // Metallurgical and Materials Transactions. 2014. № 45. Р. 5667–5678. doi: 10.1007/s11661-014-2476-x.
- Rai R.N., Saha S.C., Chakraborty M. Studies on synthesis of in-situ Al-TiC metal matrix composites // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. № 117. Р. 012042. doi: 10.1088/1757-899X/117/1/012042.
- Zhou D., Qiu F., Jiang Q. The nano-sized TiC par-

РАЗРАБОТКА ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АМ4, 5Кд-10%ТiС С УЛУЧШЕННЫМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

- ticle reinforced Al-Cu matrix composite with superior tensile ductility // Materials Science and Engineering A. 2015. № 622. P. 189–193. doi: 10.1016/j.msea.2014.11.006.
11. The Dry Sliding Wear Properties of Nano-Sized TiCp/Al-Cu Composites at Elevated Temperatures / W.S. Tian [et al] // Materials. 2017. № 10(8). P. 939. doi: 10.3390/ma10080939.
12. Жидкофазное получение методом СВС и термическая обработка композитов на основе алюминиево-магниевых сплавов, упрочненных высокодисперсной фазой карбида титана / А.Р. Луц [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия, 2023. Т. 29. № 4. С. 70–86. doi: 10.17073/0021-3438-2023-4-70-86.
13. Выбор термической обработки и исследование ее влияния на структуру и свойства композиционного материала АК10М2Н-10%ТiС, полученного методом СВС в расплаве / А.Р. Луц [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия, 2024. Т. 30. № 2. С. 30–43. doi: 10.17073/0021-3438-2024-2-30-43.
14. Шеметев Г.Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение : учеб. пособие. Часть 1. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГПУ, 2012. 155 с.
15. Шерина Ю.В. Исследование влияния добавки высокодисперсной фазы карбида титана, синтезированной в расплаве и термообработки на структуру и свойства сплава АМ4,5Кд // Транспортное машиностроение. 2024. № 3. С. 59–69. doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-59-69.
16. Перельгин Ю.П., Лось И.С., Киреев С.Ю. Коррозия и защита металлов от коррозии : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. 81 с.
17. Аксенов А.А. Оптимизация состава и структуры композиционных материалов на алюминиевой и медной основах, получаемых жидкотермическими методами и механическим легированием : автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2007. 51 с.
18. Особенности термической обработки композиционных материалов с алюминиевой матрицей (обзор) / Е.И. Курбаткина [и др.] // Труды ВИАМ. 2017. № 11. С. 82–97. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-9-9.
- Информация об авторах**
- А. Р. Луц – кандидат технических наук, доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» Самарского государственного технического университета.
- REFERENCES**
1. Kurganova, Yu.A., Kolmakov, A.G., Yijin, Chen & Kurganov, S.V. (2021). Study of the mechanical properties of promising aluminum matrix composite materials reinforced with SiC and Al₂O₃. *Materialovedeniye*, (6), 34-38. (In Russ.). doi: 10.31044/1684-579X-2021-0-6-34-38.
 2. Kar, A., Sharma, A. & Kumar, S.A. (2024). Critical Review on Recent Advancements in Aluminium-Based Metal Matrix Composites. *Crystals*, 14(412), 1-42. doi: 10.3390/cryst14050412.
 3. Sanaty-Zadeh, A. (2012). Comparison between current models for the strength of particulate-reinforced metal matrix nanocomposites with emphasis on consideration of Hall-Petch effect. *Materials Science and Engineering A*, (531(1)), 112-118. doi: 10.1016/j.msea.2011.10.043.
 4. Zhang, Z. & Chen, D.L. (2008). Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. *Materials Science and Engineering A*, (483(15)), 148-152. doi: 10.1016/j.msea.2006.10.184.
 5. Mikheyev, R.S. & Chernyshova, T.A. (2013). *Alumi-*
 - num-matrix composite materials with carbide hardening for solving problems of new technology, Moscow: RFFI. (In Russ.).
 6. Terentyev, N.A. (2017). Research and development of casting technologies for the production of dispersed-hardened aluminum alloys. Extended abstract of candidate's thesis. Krasnoyarsk. (In Russ.).
 7. Panfilov, A.A. (2011). Development of aluminum-matrix composite alloys and improvement of liquid-phase technology for their production for castings with enhanced tribotechnical properties. Extended abstract of candidate's thesis. Vladimir. (In Russ.).
 8. Cho, Y.H., Lee, J.M. & Kim, S.H. (2014). Composites Fabricated by a Thermally Activated Reaction Process in an Al Melt Using Al-Ti-C-CuO Powder Mixtures. Part I: Microstructural Evolution and Reaction Mechanism. *Metallurgical and Materials Transactions*, (45), 5667-5678. doi: 10.1007/s11661-014-2476-x.
 9. Rai, R.N., Saha, S.C. & Chakraborty, M. Studies on synthesis of in-situ Al-TiC metal matrix composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. doi: 10.1088/1757-899X/117/1/012042.
 10. Zhou, D., Qiu, F. & Jiang, Q. (2015). The nano-sized TiC particle reinforced Al-Cu matrix composite with superior tensile ductility. *Materials Science and Engineering A*, (622), 189-193. doi: 10.1016/j.msea.2014.11.006.
 11. Tian, W.S., Zhao, Q.-L., Zhao, C.J., Qiu, F. & Jiang, Q.C. (2017). The Dry Sliding Wear Properties of Nano-Sized TiCp/Al-Cu Composites at Elevated Temperatures. *Materials*, (10(8)), 939. doi: 10.3390/ma10080939.
 12. Luts, A.R., Sherina, Yu.V., Amosov, A.P. & Kachura, A.D. (2023). Liquid-phase preparation by the SHS method and heat treatment of composites based on aluminum-magnesium alloys reinforced with a highly dispersed phase of titanium carbide. *News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy*, (29(4)), 70-86. (In Russ.). doi: 10.17073/0021-3438-2023-4-70-86.
 13. Luts, A.R., Sherina, Yu.V., Amosov, A.P., Minakov, E.A. & Ibatullin, I.D. (2024). The choice of heat treatment and the study of its effect on the structure and properties of the composite material AK10M2H-10%TiC obtained by the SHS method in the melt. *News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy*, (30(2)), 30-43. (In Russ.). doi: 10.17073/0021-3438-2024-2-30-43.
 14. Shemetev, G.F. (2012). *Aluminum alloys: compositions, properties, application: A textbook. Part 1*. St. Petersburg: Publishing House of SPbGPU. (In Russ.).
 15. Sherina, Yu.V. (2024). Investigation of the effect of the addition of a highly dispersed phase of titanium carbide synthesized in a melt and heat treatment on the structure and properties of the AM4.5Kd alloy. *Transport engineering*, (3), 59-69. (In Russ.). doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-59-69.
 16. Perelygin, Yu.P., Los, I.S. & Kireev, S.Yu. (2015). *Corrosion and protection of metals from corrosion: A textbook*. Penza: Publishing House of PGU. (In Russ.).
 17. Aksenov, A.A. (2007). Optimization of the composition and structure of composite materials based on aluminum and copper bases obtained by liquid-phase methods and mechanical alloying. Extended abstract of Doctor's thesis. Moscow. (In Russ.).
 18. Kurbatkina, E.I., Shavnev, A.A., Kosolapov, D.V. & Gololobov, A.V. (2017). Features of heat treatment of composite materials with aluminum matrix (overview). *Works of VIAM*, (11), 82-97. (In Russ.). doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-9-9.

Information about the authors

A.R. Luts - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Metallurgy, powder metallurgy, nanomaterials» of the Samara State Technical University.

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

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принятая к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК 621.74:669.018.9620.18

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.035

EDN: CZHNGE

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Денис Владимирович Сухоруков ¹, Евгений Сергеевич Прусов ²,
Владислав Борисович Деев ³, Умар Шахидович Вахидов ⁴

^{1, 2, 3} Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

¹ director@inlittech.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0980-258X>

² eprusov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4189-877X>

³ deev.vb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8349-8072>

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Россия

³ Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

⁴ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

⁴ umar-vahidov@mail.ru

Аннотация. В статье обсуждается возможность использования полимерных композиционных материалов на основе полиуретановой матрицы с добавлением металлических наполнителей для изготовления модельной оснастки с повышенными показателями износостойкости. Проведены трибологические испытания полиуретановых композитов с добавками железного порошка в условиях сухого трения. Показано, что равномерное распределение частиц железа в полиуретановой матрице при содержании 1 % Fe обеспечивает минимальные значения коэффициента трения (0,00378) и низкий уровень массового износа, в то время как увеличение содержания Fe до 6 % приводит к росту усредненных значений коэффициента трения (до 0,12831 на расстоянии 35 мм от торца) из-за локальной концентрации частиц, вызванной седиментацией. Анализ структуры поверхности полученных композитов в исходном состоянии и после испытаний показал качественное распределение наполнителей в матрице и прочную межфазную связь, предотвращающую выкрашивание металлических компонентов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, модельная оснастка, полиуретановые компаунды, износостойкость, коэффициент трения.

Благодарности: Работа подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета по государственному заданию (наименование темы научного исследования «Разработка научно-методических основ и методик производства и внедрения полимерных, композиционных материалов и смазочных композиций в интересах агропромышленного комплекса Российской Федерации»; код научной темы, присвоенный учредителем – FSFM-2024-0018).

Для цитирования: Сухоруков Д. В., Прусов Е. С., Деев В. Б., Вахидов У. Ш. Повышение износостойкости модельной оснастки из полимерных композиционных материалов // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 262–266. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.035. EDN: <https://elibrary.ru/CZHNGE>.

Original article

ENHANCING THE WEAR RESISTANCE OF POLYMER COMPOSITE FOUNDRY PATTERN

Denis V. Sukhorukov ¹, Evgeny S. Prusov ², Vladislav B. Deev ³,
Umar Sh. Vakhidov ⁴

^{1, 2, 3} Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

¹ director@inlittech.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0980-258X>

² eprusov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4189-877X>

³ deev.vb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8349-8072>

² Moscow Automobile and Road State Technical University, Moscow, Russia

³ Wuhan Textile University, Wuhan, China

³ National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

⁴ Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

⁴ umar-vahidov@mail.ru

Abstract. The paper explores the potential application of polymer composite materials based on a polyurethane matrix with the addition of metallic fillers for the production of tooling with enhanced wear resistance. Tribological tests

© Сухоруков Д. В., Прусов Е. С., Деев В. Б., Вахидов У. Ш., 2025

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

were conducted on polyurethane composites with iron powder additives under conditions of dry friction. It was demonstrated that a uniform distribution of iron particles within the polyurethane matrix at a content of 1% Fe ensures minimal friction coefficient values (0.00378) and a low level of mass wear. In contrast, increasing the Fe content to 6% leads to higher average friction coefficient values (up to 0.12831 at a distance of 35 mm from the edge) due to localized particle concentration caused by sedimentation. An analysis of the surface structure of the composites in their initial state and after testing revealed a qualitative distribution of fillers in the matrix and strong interfacial bonding, which prevents the spalling of metallic components.

Keywords: polymer composite materials, foundry pattern, polyurethane compounds, wear resistance, friction coefficient.

Acknowledgements: This work was prepared based on research funded by the federal budget under a state assignment (research topic title: "Development of scientific and methodological foundations and techniques for the production and implementation of polymer, composite materials, and lubricant compositions for the benefit of the agro-industrial complex of the Russian Federation"; research topic code assigned by the founder – FSFM-2024-0018).

For citation: Sukhorukov, D. V., Prusov, E. S., Deev, V. B. & Vakhidov, U. Sh. (2025). Enhancing the wear resistance of polymer composite foundry pattern. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 262-266. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.035. EDN: <https://elibrary.ru/CZHNGE>.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных этапов разработки технологии изготовления отливок методом литья в разовые песчаные формы является выбор рационального материала для модельно-стержневой оснастки. При этом основными критериями являются, как правило, эксплуатационные характеристики, экономическая целесообразность и технологическая пригодность материала.

Древесина исторически является одним из наиболее часто используемых материалов для изготовления модельной оснастки [1]. Она имеет сравнительно низкую стоимость, малый вес, хорошо поддается обработке и текущему ремонту. Вместе с тем, оснастка из древесины подвержена воздействию влаги из формовочной смеси, короблению и изменению размеров, быстрее изнашивается из-за абразивного воздействия песка [2, 3]. Металлические модели (из чугуна, стали, алюминиевых сплавов) более долговечны, отличаются высокой размерной точностью и чистотой поверхности, устойчивы к изнашиванию и истиранию, однако имеют высокую стоимость, трудно поддаются ремонту и требуют особого внимания при обслуживании, что ограничивает их использование, особенно в мелкосерийном производстве.

В последние годы в мировой практике литейного производства для изготовления модельной и стержневой оснастки все более широко применяются полимерные материалы [4]. Они превосходят древесину по эксплуатационным характеристикам и обладают рядом преимуществ в сравнении с металлическими материалами, в частности, относительно невысокой стоимостью, меньшей массой, хорошей технологичностью. Полимерные материалы технологически удобны в использовании при изготовлении литейных моделей, так как хорошо склеиваются различными kleевыми составами, что позволяет получить необходимую конфигурацию заготовки, из которой затем будет изготовлена модель или стержневой ящик. Модельные пластики хорошо поддаются обработке на фрезерных и токарных станках без сколов или разрушения материала [5].

Одним из мировых лидеров в области разработки и производства высокоеффективных полиуретановых и эпоксидных материалов для модельно-стержневой оснастки является RAMPF Tooling Solutions. К примеру, предлагаемые компа-

нией полиуретановые плиты RAKU TOOL WB-1258, по заявлению производителя, отличаются высокой абразивной и химической стойкостью при твердости 80–85 ед. по Шору (D), прочности на сжатие 90–100 МПа и выдерживают не менее 100 тыс. съемов. В отечественном литейном производстве полиуретановые и эпоксидные материалы пока применяются для изготовления модельной оснастки недостаточно широко. Высокоэффективные импортные материалы ограниченно доступны на рынке, а разработка и освоение импортозамещающих аналогов ведутся сравнительно невысокими темпами, не отвечающими в полной мере значительным технико-экономическим преимуществам, предоставляемым этими перспективными материалами.

Как показывает зарубежный опыт, существенного повышения эксплуатационных характеристик модельной оснастки можно достичь за счет применения полимерных композиционных материалов [6]. В частности, армирование полимерной матрицы порошкообразными металлическими или керамическими наполнителями позволяет повысить износостойкость, твердость, прочность на сжатие [7–9], в ряде случаев обеспечивая возможность регулирования теплофизических характеристик материала [10–12]. Так, в работе [13] установлено, что добавление частиц SiC (6,587 мкм) в количестве 13,18 об.% в полиуретановую матрицу способствует повышению теплопроводности с 0,253 до 0,521 Вт/м·К (на 106 %). Показано [14], что армирование полиуретана частицами Al₂O₃ (до 21 масс.%) позволяет в 1,14 раза повысить эрозионную стойкость, при этом композиты, обработанные различными силановыми связующими агентами, обладали разной устойчивостью к эрозии. Более значительное (почти вдвое в сравнении с чистым полиуретаном) повышение эрозионной стойкости отмечено в работе [15] при добавлении 10 масс.% керамических частиц Si₃N₄. Несмотря на достигнутые успехи в данном направлении, вопросы повышения износостойкости полимерных композитов за счет поиска новых составов и отработки технологических процессов их получения остаются актуальными. Необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение влияния различных типов наполнителей, их концентраций и технологии получения и обработки на эксплуатационные ха-

рактеристики модельной оснастки из полимерных композиционных материалов.

Целью настоящей работы является изучение трибологического поведения полимерных композиционных материалов на основе полиуретановой матрицы с добавками железного порошка в условиях сухого трения для оценки перспектив изготовления модельной оснастки с повышенной износостойкостью.

МЕТОДЫ

Для проведения трибологических испытаний были изготовлены опытные образцы полимерных композиционных материалов на основе двухкомпонентного полиуретанового компаунда АДВ 13-2 с добавками порошкового карбонильного железа Р-10 ГОСТ 13610-84 в количестве от 1 до 6 масс.%. Экспериментальные композиции заливали в трубы с внутренним диаметром 20 мм и высотой 155 мм.

Испытания на износостойкость проводились при помощи трибометра TRB (CSM Instruments, Швейцария), используя стальной шарик 6 мм в условиях сухого трения при комнатной температуре. Линейная скорость составляла 20 см/с при нагрузке 10 Н, длина пути – трения 300 м. Оценку износостойкости проводили по изменению массы образца до и после испытаний с точностью $\pm 10^{-4}$ г.

При исследовании микроструктуры синтезируемых полимерных композиционных материалов и треков износа после трибологических испытаний применяли исследовательский инвертированный металлографический микроскоп МИМ 43 (ООО «ЛОМО-МА», Россия). Захват изображений с микроскопа проводили с использованием цифровой камеры МС-20, работающей в комплекте со специализированным программным обеспечением LOMO-Micro systems MC view.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием встроенных средств программных пакетов Origin Pro и Microsoft Excel. При исследовании свойств и характеристик композиционных материалов в ходе прямых измерений для каждой серии опытов вычисляли среднее арифметическое полученных значений измеряемой величины, а также доверительные границы погрешности результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 для примера приведены репрезентативные снимки поверхности образца PUR + 1% Fe на различном расстоянии от торца (в исходном состоянии и после испытаний в условиях сухого трения). По аналогичному принципу были получены и проанализированы снимки для других рассматриваемых составов полимерных композитов.

Анализ снимков исходных композитов позволяет заключить, что поверхность характеризуется равномерным распределением металлических частиц железа в полиуретановой матрице. Металлические включения имеют различную морфологию, включая вытянутые и овальные формы, с отчетливыми границами между фазами. В целом можно сделать заключение о качественном распределении добавок в полимерной матрице и отсутствии значительных агломератов.

Трибологические испытания включали изме-

рение коэффициента трения и массового износа образцов, вырезанных на различных расстояниях от торца формованного изделия (цилиндр) из полимерного композита, чтобы учесть влияние седиментационных процессов. Результаты испытаний показывают значительное варьирование коэффициента трения и массового износа в зависимости от положения образца. К примеру, для образцов с содержанием 1 % Fe наблюдается минимальный коэффициент трения (в среднем 0,00378) на расстоянии 65 мм при массовом износе 0,0018 г. Для образцов с 6 % Fe усредненный коэффициент трения демонстрирует более высокие значения у торца (0,12831 на 35 мм), что связано с концентрацией частиц железа в этой области вследствие седиментации, при этом массовый износ повышается до 0,0044 г.

Вместе с тем, отмечен ряд общих тенденций. Образцы с 1 % Fe имеют относительно стабильный коэффициент трения и низкие значения массового износа независимо от удаленности от торца формованной цилиндрической заготовки. При этом не наблюдалось каких-либо признаков выкрашивания частиц железа, что свидетельствует о прочной межфазной связи с материалом матрицы. При увеличении содержания Fe до 6 % наблюдается значительное увеличение коэффициента трения на некоторых участках (35 мм), что, вероятно, связано с эффектом локальной концентрации частиц железа, увеличивающих адгезию с материалом контртела и сопротивление движению.

После трибологических испытаний на снимках в области трека индентора отмечены характерные признаки износа, включая эрозию матрицы полиуретана и частичное «оголение» металлических включений. Контактное взаимодействие вызывает разрушение краевых областей частиц Fe и образование микротрещин в полимерной матрице. Эти изменения указывают на механическую деградацию материала под воздействием трения, сопровождающуюся возможностью частичной потери металлических компонентов и локальным разогревом, что могло привести к изменению свойств полимерной основы.

В современных исследованиях акцентируется внимание на сложной взаимосвязи между трибологическим поведением полимеров, в частности, полиуретана, и происходящими при трении структурными изменениями. Так, отмечается [16], что полимерный слой, перенесенный на поверхность контртела в результате процесса трения, обладает выраженной ориентацией, что приводит к предположению об аналогии характера его формирования с процессами экструзии полимеров при повышенных температурах. Однако формирование перенесенного слоя приходит при более низких температурах, поэтому не может быть объяснено исключительно внешними условиями, к примеру, давлением на контртело и скоростью скольжения при трении [17].

В целом, полученные результаты согласуются с выводами других работ по данному направлению, указывающих на сложное взаимодействие механических и структурных факторов в трибосистемах с участием полиуретана. В частности, анализ характера изменения поверхности образцов

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

полиуретановых композитов с частицами железа позволяет предположить, что внутренние процессы в материале, включая перераспределение

напряжений и изменение межфазной адгезии, играют значительную роль в его трибологическом поведении.

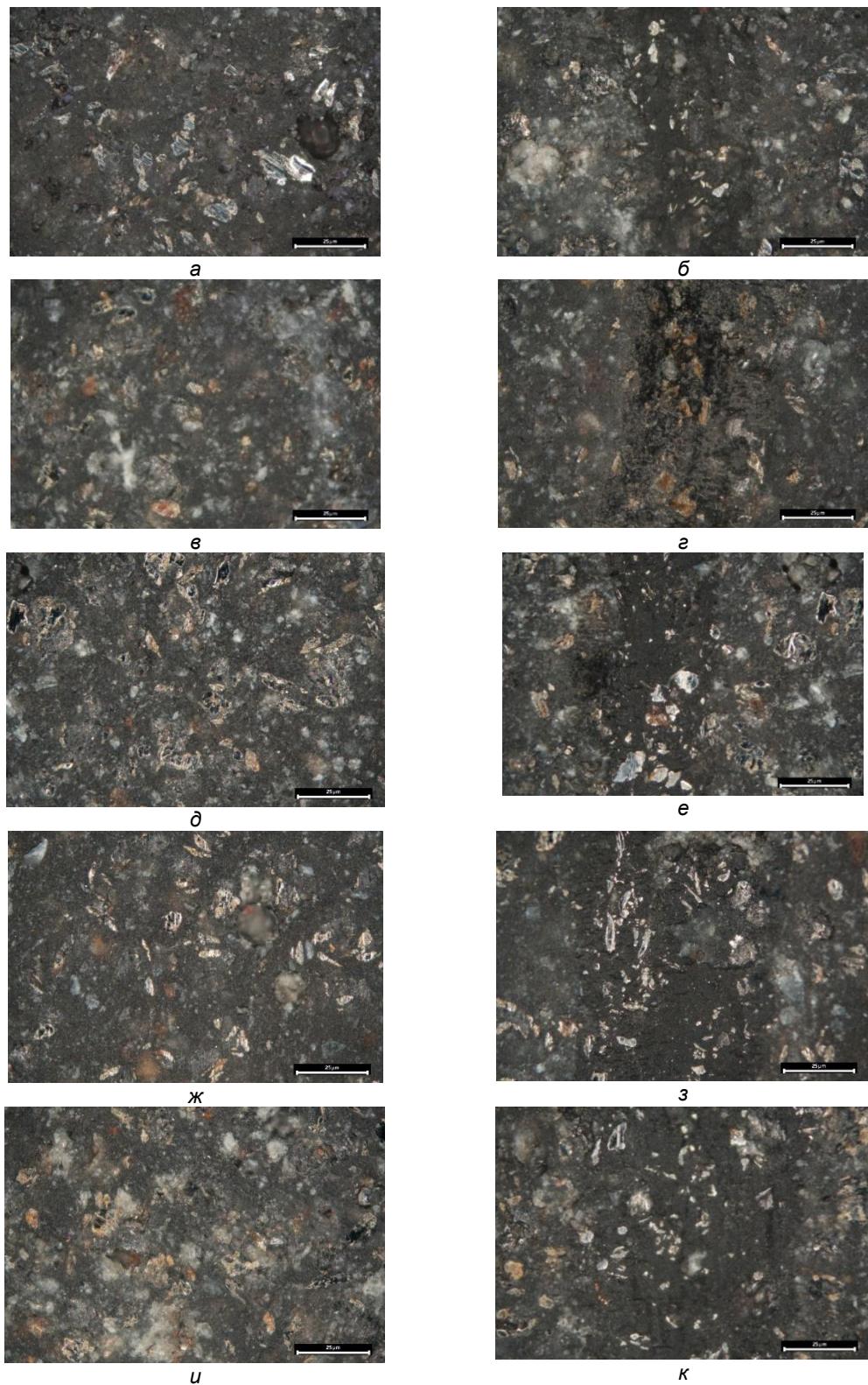


Рисунок 1 – Репрезентативные снимки поверхности образца PUR + 1 % Fe в исходном состоянии (а, в, д, ж, и) и после испытаний (б, г, е, з, к) на расстоянии от торца 35 мм (а, б), 65 мм (в, г), 95 мм (д, е), 125 мм (ж, з), 155 мм (и, к)

Figure 1 – Representative images of the surface of the PUR + 1% Fe sample in the initial state (a, c, d, e, g, i) and after testing (b, d, f, h, k) at a distance from the end face of 35 mm (a, b), 65 mm (c, d), 95 mm (e, f), 125 mm (g, h), 155 mm (i, k)

При этом прочная межфазная связь между компонентами (PUR + 1 % Fe) предотвращает выкрашивание металлических включений, однако с повышением содержания железа до 6 % в условиях сухого трения возможно локальное разрушение краевых областей включений Fe с их частичной эрозией. Фактически, речь в данном случае идет о практической целесообразности подбора рациональной доли армирующих добавок с учетом их физико-химической природы и фракционного состава для адаптации синтезируемых полимерных композиционных материалов к заданным условиям эксплуатации модельных комплектов.

ВЫВОДЫ

Результаты трибологических испытаний образцов полимерных композитов на основе полиуретана с добавками порошкового железа в совокупности с данными металлографических исследований поверхности образцов о возможности повышения износостойкости КМ PUR/Fe за счет обеспечения заданного распределения металлических включений в объеме матрицы. Полученные данные открывают перспективы для дальнейшего изучения механизмов взаимодействия металлических частиц и полимерных матриц в условиях трения, в том числе при абразивном изнашивании, а также разработки новых полимерных композиционных материалов с улучшенными характеристиками для использования при изготовлении модельной оснастки в литейном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Francis J.W. (1984). Practical patternmaking techniques for the foundry industry. *FWP Journal*, (24), 29–44.
2. Ohtani T., Inoue A. & Tanaka C. (2002). Abrasive wear properties of compressed sugi wood. *Journal of Wood Science*, (48), 473–478.
3. Ncube E. (2008). Use of simple abrasive-wear resistance test device to assess the suitability of selected hardwoods for wood flooring. *Scientific Research and Essays*, (3), 168–173.
4. Sukhorukov D., Kreshchik A., Sharshin V. & Sukhorukova E. (2020). Recycling of polymer materials for foundry patterns. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (919), 062037.
5. Nassar M.M.A., Arunachalam R. & Alzebdeh K.I. Machinability of natural fiber reinforced composites: a review. (2017). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (88), 2985–3004.
6. Czarnecka-Komorowska D., Gawdzińska K. & Popielarzki P. (2022). Microscopic Analysis of the Aluminium Castings Produced with the use of Polymer Composite Patterns. *Archives of Foundry Engineering*, (22), 113–117.
7. Durand J.M., Vardavoulias M. & Jeandin M. (1995). Role of reinforcing ceramic particles in the wear behaviour of polymer-based model composites. *Wear*, (181–183), 833–839.
8. Sedakova E.B. & Kozyrev Y.P. (2018). Influence of Particle Size on the Wear Resistance and Strength of Polymer Composites. *Russian Engineering Research*, (38), 513–516.
9. Bardushkin V.V., Yakovlev V.B., Sychev A.P. & Lapitskii A.V. (2017). Predicting the limiting strength of chaotically reinforced polymer composites with dispersed antifrictional additives. *Russian Engineering Research*, (37), 471–474.
10. Sukhorukov D.V., Kechin V.A. & Sharshin V.N. (2008). Investigation of thermophysical properties of mold material for the production of gasified patterns. *Litejshchik Rossii*, (7), 38–41. (In Russ.).
11. Singh R. & Sharma P. (2008). Effective thermal conductivity of polymer composites. *Advanced Engineering Materials*, (10), 366–370.
12. Abbasov H. (2022). The effective thermal conductivity of polymer composites filled with high conductive particles and the shell structure. *Polymer Composites*, (43), 2593–2601.
13. Somdee P., Ansari M.A., Szabo T. & Marossy K. (2023). Improved thermal conductivity of polyurethane (PU)-/SiC composite fabricated via solution casting method and its mechanical model for prediction and comparison. *Helijon*, (9), e15571.
14. Zhou R., Lu D.H., Jiang Y.H. & Li Q.N. (2005). Mechanical properties and erosion wear resistance of polyurethane matrix composites. *Wear*, (259), 676–683.
15. Li M., Luan D., Ding W. & Zhang G. (2006). Effect of different ceramic powder on the erosive wear resistance of polyurethane composite. *Run Hua Yu Mi Feng/Lubrication Engineering*, (8), 58–60.
16. Laux K.A., Jean-Fulcrand A., Sue H.J., Bremner T. & Wong J.S.S. (2016). The influence of surface properties on slipping contact temperature and friction polyetheretherketone. *Wear*, (103), 397–404.
17. Ligier K., Olejniczak K., Napiórkowski J. (2021). Wear of polyethylene and polyurethane elastomers used for components working in natural abrasive environments. *Polymer Testing*, (100), 107247.

Информация об авторах

Д. В. Сухоруков – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» Владимира государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Е. С. Прусов – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» Владимира государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; ведущий научный сотрудник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета.

В. Б. Деев – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Владимира государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; профессор Уханьского текстильного университета; профессор кафедры «Обработка металлов давлением» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

У. Ш. Вахидов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Information about the authors

D.V. Sukhorukov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Technologies of Functional and Structural Materials" of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.

E.S. Prusov - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Technologies of Functional and Structural Materials" of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; leading researcher of the Moscow Automobile and Road State Technical University.

V.B. Deev - Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; Professor of the Wuhan Textile University; Professor of the Department "Metal Forming" of the National University of Science and Technology MISIS.

U.Sh. Vakhidov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of "Construction and Road Machines" of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.



Научная статья

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)

УДК 678.027.776 (043.2)

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.036

EDN: UCBMUF

ПОВЫШЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Блазнов Алексей Николаевич¹, Головина Елена Анатольевна²,
Савин Дмитрий Алексеевич³, Бычин Николай Валерьевич⁴,

^{1, 3, 4} Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Бийск, Россия

^{1, 2} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ blaznov74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9123-159X>,

² gea62@yandex.ru,

³ dmitro-srost2000@mail.ru,

⁴ labmineral@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7251-7741>

Аннотация. Проблема повышения огнестойкости особенно актуальна для полимерных композитов, армированных органическими (растительными и древесными) волокнами. Проведены исследования методом ДСК веществ, содержащих кристаллогидраты: гипс, жидкое стекло, пропитывающий состав АПС-1500 и показаны эндоэффекты, снижающие горючесть. Проведены экспериментальные исследования пропитки жидким стеклом древесины сосны в течение 1, 2 и 3-х дней. По термограммам ТГА пропитанной древесины установлено огнезащитное действие жидкого стекла, которое заключается в уменьшении тепловыделения древесины и увеличении несгораемого остатка с 20 % до 50 %.

Ключевые слова: огнестойкость, горючесть, полимерные композиты, растительные волокна, кристаллогидраты, гипс, жидкое стекло.

Финансирование: Исследования ИПХЭТ СО РАН выполнены в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ (код научной темы FUFE-2024-0008, № госрегистрации темы 124021200031-4) при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Для цитирования: Блазнов А. Н., Головина Е. А., Савин Д. А., Бычин Н. В. Повышение огнестойкости полимерных композитов // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 267–271. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.036. EDN: <https://elibrary.ru/UCBMUF>.

Original article

INCREASING THE FIRE RESISTANCE OF POLYMER COMPOSITIONS

Aleksey N. Blaznov¹, Elena A. Golovina², Dmitry A. Savin³,
Nikolay V. Bychin⁴

^{1, 3, 4} Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IP-CET SB RAS), Biysk, Russia

^{1, 2} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ blaznov74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9123-159X>,

² gea62@yandex.ru,

³ dmitro-srost2000@mail.ru,

⁴ labmineral@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7251-7741>

Abstract. The problem of increasing fire resistance is especially relevant for polymer composites reinforced with organic (plant and wood) fibers. DSC studies were carried out on substances containing crystalline hydrates: gypsum, liquid glass, impregnating composition APS-1500 and endo-effects were shown that reduce flammability. Experimental studies were carried out on the impregnation of pine wood with liquid glass for 1, 2 and 3 days. Based on TGA thermograms of impregnated wood, the fire-retardant effect of liquid glass was established, which consists in reducing the heat generation of wood and increasing the fireproof residue from 20% to 50%.

Keywords: fire resistance, flammability, polymer composites, plant fibers, crystalline hydrates, gypsum, liquid glass.

Funding: Research at the IPCET SB RAS was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (scientific topic code FUFE-2024-0008, state registration number of the topic 124021200031-4) using the equipment of the Biysk Regional Center for Shared Use of Scientific Equipment of the SB RAS (IPCET SB RAS, Biysk).

For citation: Blaznov, A. N., Golovina, E. A., Savin, D. A. & Bychin, N. V. (2025). Increasing the fire resistance of polymer compositions. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 267-271. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.036. EDN: <https://elibrary.ru/UCBMUF>.

© Блазнов А. Н., Головина Е. А., Савин Д. А., Бычин Н. В., 2025

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из приоритетных задач в сфере производства полимерных композиционных материалов (ПКМ) является улучшение их огнестойкости, учитывая их широкое применение в энергетике, здравоохранении, электронике, сырьевой промышленности, транспорте и строительстве. В последние годы полимерные композиты на основе растительных волокон активно внедряются в производственные процессы благодаря своим преимуществам: высокой прочности, низкому удельному весу, возобновляемости и биоразлагаемости [1–4]. Однако при рассмотрении возможности использования натуральных волокон следует учитывать, что как матрица, так и волокна будут являться горючими материалами.

Исследование горючести и огнестойкости материалов регламентируется стандартами: ГОСТ 30244-94 [5] и ГОСТ 30247.0-94 [6] соответственно.

ГОСТ 30244-94 регламентирует определение горючести строительных материалов и отнесение их к группе негорючих (НГ) или горючих (Г1–Г4). Сущность метода заключается в размещении испытуемых образцов материалов в специальной установке на заданном расстоянии от источника огня и измерении температуры дымовых газов после образца. Материал относят к негорючим при следующих параметрах испытаний:

- прирост температуры в печи не более 50 °С;
- потеря массы образца не более 50 %;
- продолжительность устойчивого пламенно-го горения не более 10 с.

При невыполнении хотя бы одного из параметров материал относят к горючим.

Сущность метода испытаний по ГОСТ 30247.0-94 заключается в нагревании конструкций, целиком помещенных в камеру нагревательной печи по заданному графику роста температур во времени и фиксации времени наступления предельных состояний для данной конструкции.

Различают следующие основные виды предельных состояний строительных конструкций по огнестойкости [5].

1 Потеря несущей способности вследствие обрушения конструкции или возникновения предельных деформаций (R).

2 Потеря целостности в результате образования в конструкциях сквозных трещин или отверстий, через которые на необогреваемую поверхность проникают продукты горения или пламя (E).

3 Потеря теплоизолирующей способности вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции до предельных для данной конструкции значений (J).

Предел огнестойкости по ГОСТ 30247.0-94 измеряется в минутах при наступлении одного из предельных состояний (или всех одновременно) и включает обозначение соответствующей буквы, например, $R180$ или $RE/30$ и т.д.

Приведенные стандарты приняты для крупногабаритных строительных изделий, испытательные установки и печи являются материалеми, и испытания проводят сертифицированные лаборатории. Для научных исследований образцов материалов такие методы являются дорогостоящими и малодоступными.

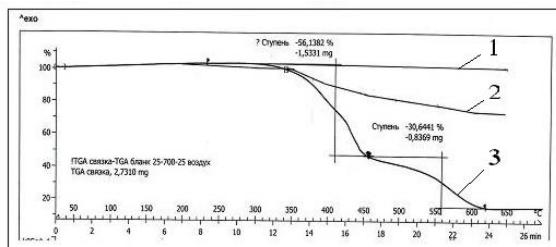
В литературе [7] для оценки огнестойкости композитов в лабораторных условиях применяют конусную калориметрию, тест на предельный кислородный индекс (LOI), тест на вертикальное горение UL-94, термогравиметрический анализ (TGA) и тест на плотность дыма и другие методы. В связи с этим в настоящей работе выбраны методы лабораторных исследований ДСК и ТГА, как наиболее доступные.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

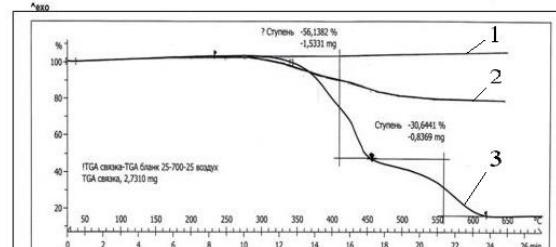
Материалами для исследований являлись эпоксидные связующие на основе смолы ЭД-20 и отвердителей Этал-23Х, ХТ-152Б, ИМТГФА. В качестве армирующих наполнителей использовали стеклянный ровинг, базальтовый ровинг, лубяные волокна льна и древесину сосны.

С целью исследования свойств веществ, содержащих кристаллогидраты, были взяты пробы от трех исходных материалов: двуводного гипса, жидкого стекла и пропиточного состава АПС-1500 [8].

С целью исследования огнезащитных свойств жидкого стекла были проведены экспериментальные исследования пропитки на примере древесины. Исследование процесса пропитки и структуры композита проводили методом оптической и электронной микроскопии, исследование тепловых эффектов – методами термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Метод ТГА представляет собой метод анализа изменения массы испытуемого образца в зависимости от температуры. Соответственно, ДСК – метод анализа количества теплоты, поглощаемой образцом, также в зависимости от температуры. Методы ТГА и ДСК позволяют выявить и исследовать физические изменения в образцах материалов, проявляющиеся при различных температурах.



а



б

Рисунок 1 – Термограммы ТГА стеклопластика (а) и базальтопластика (б), где 1 – наполнитель; 2 – композит; 3 – матрица

Figure 1 – TGA thermograms of fiberglass (a) and basalt plastic (b), where 1 – filler; 2 - composite; 3 - matrix

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проблема горючести особенно актуальна для композиционных материалов на полимерной осно-

ПОВЫШЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

ве. В случае, если наполнителем являются минеральные волокна – такие как базальтовые и стеклянные – материал с высоким наполнением относят к группе трудногорючих Г1 [5]. На термограммах (рисунок 1) видно, что связующее без наполнителя выгорает практически полностью, наполнитель до температуры нагрева 650 °C массу не теряет, а композиты теряют массу до 20 %, что соответствует содержанию в них полимерного связующего.

Иначе дело обстоит, если и наполнитель, и матрица полимерные или органические. На рисунке 2 для примера приведены термограммы эпоксидного связующего и растительного наполнителя – волокон льна.

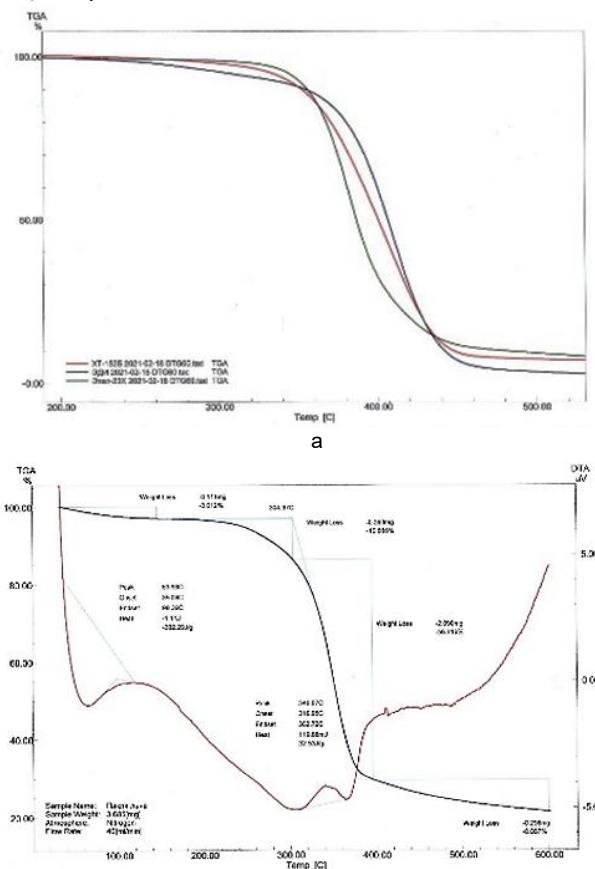


Рисунок 2 – Термограммы эпоксидных связующих (а) и волокон льна (б)

Figure 2 – Thermograms of epoxy binders (a) and flax fibers (b)

В этом случае и матрица, и наполнитель являются горючими – интенсивное разложение происходит в диапазоне температур 350–450 °C для связующего и 300–400 °C – для волокон льна. Несгораемый остаток до 20 % у льна определяет зольность. Связующее выгорает практически полностью.

Одними из эффективных веществ для огнезащиты являются вещества, содержащие кристаллогидраты в твердом состоянии [9]. К таким веществам относятся гипс, жидкое стекло и композиции на их основе. Характерная особенность в том, что при повышении температуры более 100 °C начинает испаряться химически связанный водой, что приводит к поглощению тепла. За счет такого эффекта эти вещества применяются для огнезащиты материалов.

Кривые ДСК проб гипса двуводного, жидкого стекла и пропитывающего состава АПС-1500 приведены на рисунке 3, а–в. Кривые для всех исходных веществ подобны – в диапазоне температур 100–200 °C проявляются эндотермические пики, которые свидетельствуют о разложении кристаллогидратов и удалении связанный воды с поглощением тепла. Площадь эндотермических эффектов различная: у гипса – минус 613,9 Дж/г, у жидкого стекла – минус 654,2 Дж/г, у АПС-1500 – минус 383,4 Дж/г. Знак «–» (минус) означает, что соответствующее количество тепла поглощается образцом. Границы пики также разнятся – у гипса два пика четко выражены в диапазоне от 100 до 200 °C, у АПС – первый пик от 50 до 200 °C и второй эндотермический пик – в диапазоне от 250 до 300 °C.

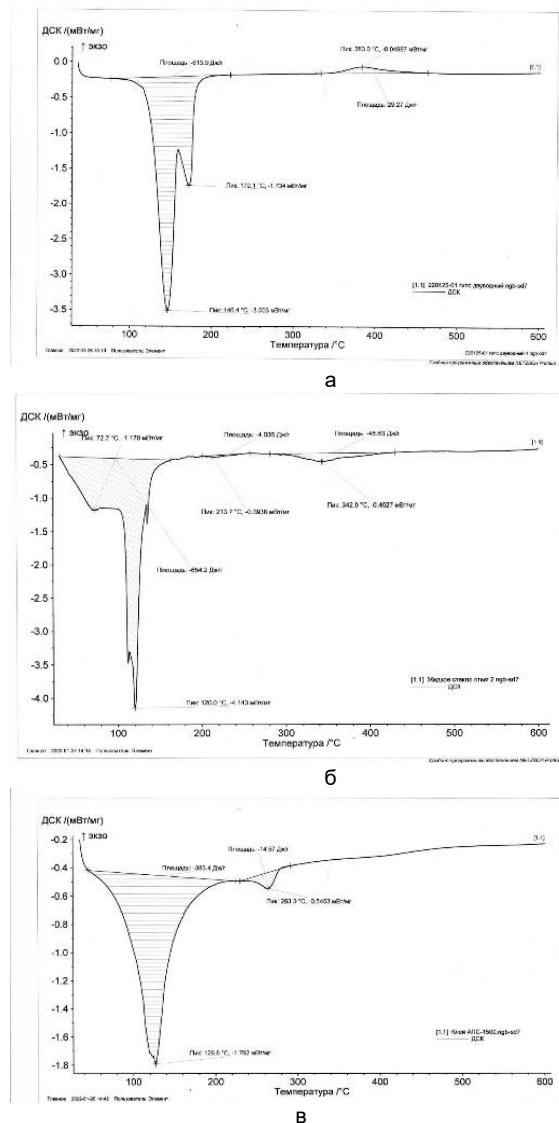


Рисунок 3 – Кривые ДСК для образцов, где а) двуводный гипс, б) жидкое стекло, в) пропиточный состав АПС-1500

Figure 3 – DSC curves for samples, where a) dihydrate gypsum, b) liquid glass, в) impregnating composition APS-1500

У жидкого стекла присутствует несколько эндотермических пиков, в диапазонах температур от 60 до 100 °C (один пик), от 100 до 160 °C (три пика), от 200 до 260 °C (один пик), от 280 до 430 °C (один пик).

Наличие нескольких пиков свидетельствует о ступенчатом механизме удаления кристаллизационной воды – разные молекулы воды удаляются от основной молекулы минерала при различных температурах.

Таким образом, все три исследованных состава могут применяться для эффективной огнезащиты и снижения горючести в качестве вяжущих, пропитывающих и связующих в композитах или покрытий.

На рисунке 4 показаны фотографии скола образцов древесины после пропитки жидким стеклом в течение 1, 2 и 3 суток. Наиболее быстро пропитка происходила вдоль волокон. Отмечено, что наиболее эффективно пропитка происходила в первый день – 1,48 мм, затем скорость пропитки плавно снижалась.

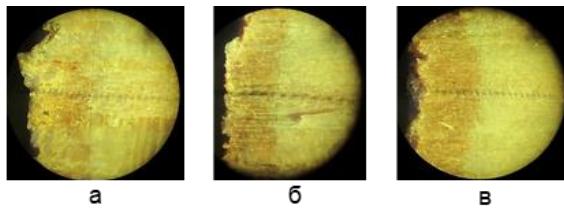


Рисунок 4 – Фотографии под оптическим микроскопом глубины пропитки древесины жидким стеклом вдоль волокон: а – 1 сутки, 1,48 мм; б – 2 суток, 1,63 мм; в – 3 суток, 1,88 мм

Figure 4 – Photographs under an optical microscope of the depth of wood impregnation with liquid glass along the fibers: a - 1 day, 1.48 mm; б - 2 days, 1.63 mm; в - 3 days, 1.88 mm

На рисунке 5 приведены фотографии скола структуры древесины под электронным микроскопом до и после пропитки жидким стеклом.

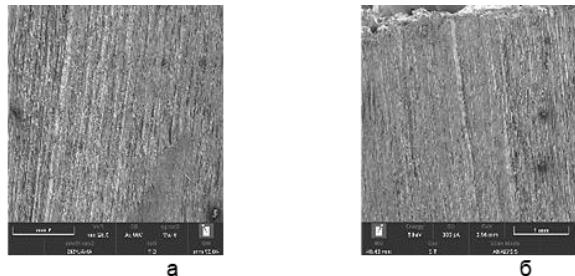


Рисунок 5 – Фотографии под электронным микроскопом структуры древесины до (а) и после пропитки (б) жидким стеклом

Figure 5 – Photographs under an electron microscope of the structure of wood before (а) and after impregnation (б) with liquid glass

Исходную поверхность скола древесины (рисунок 5, а) можно охарактеризовать как неровную, содержащую отдельные волокна и лигноцеллюлозную матрицу, а также пустоты. Поверхность скола после пропитки (рисунок 5, б) выглядит монолитно, без пустот и дефектов. Отличить здесь жидкое стекло от древесины невозможно, т.е. пропитка произошла качественно.

Для оценки огнезащиты древесного композита провели исследования методом ТГА. Исследовались как исходные составляющие отдельно – жидкое стекло и древесина, так и образец композита после пропитки. Кривые ТГА приведены на рисунке 6.

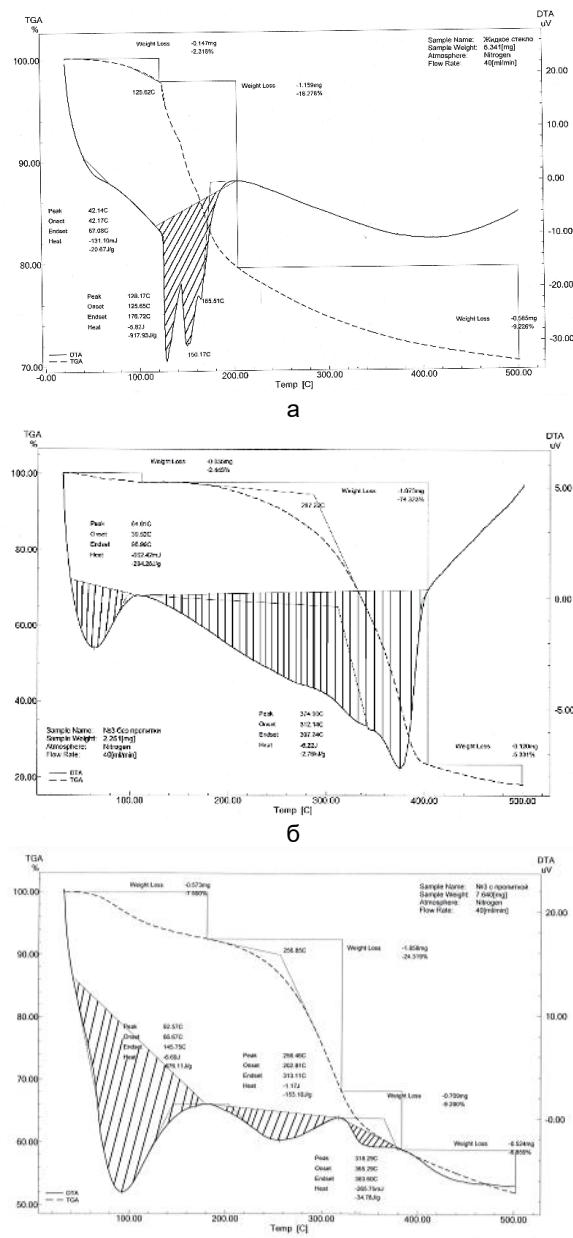


Рисунок 6 – ТГА-кривые жидкого стекла (а), древесины (б) и древесины, пропитанной жидким стеклом (в)

Figure 6 – TGA curves of liquid glass (а), wood (б) and wood impregnated with liquid glass (в)

ОБСУЖДЕНИЕ

Можно отметить, что кривая ДТА жидкого стекла (рисунок 6, а) аналогична кривой ДСК на рисунке 3 с присутствием нескольких эндотермиков в диапазоне температур от 100 °C до 200 °C и поглощением тепловой энергии минус 917,3 Дж/г. Это свидетельствует о разложении кристаллогидратной воды с поглощением тепла. Несгораемый остаток по кривой ТГА – около 70 %, после нагрева до 600–700 °C жидкое стекло превращается в пористую керамическую массу, и удаление кристаллогидратов носит необратимый характер (при повторном нагреве эндотермические пики отсутствуют).

ПОВЫШЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

В исходной древесине на кривой DTA (рисунок 6, а) присутствует эндотермический пик до 100 °C, свидетельствующий об удалении из древесины естественной влаги (высыхании) с небольшой площадью минус 294,28 Дж/г. Потери массы древесины по кривой ТГА вплоть до 20 % обусловлены содержанием несгораемых остатков (зольностью).

Термограммы древесины после пропитки жидким стеклом (рисунок 6, в) являются комбинацией термограмм исходных компонентов – жидкого стекла и древесины. Эндотермический пик на кривой DTA начинается раньше, чем у жидкого стекла – при температуре около 50 °C, и заканчивается позже, чем у древесины – около 180 °C. Поглощение тепловой энергии минус 876,11 Дж/г немногим меньше, чем у жидкого стекла, но больше, чем у древесины. Несгораемый остаток около 50 % (по кривой ТГА) также меньше, чем у жидкого стекла, но больше, чем у древесины. Таким образом, пропитка жидким стеклом на примере древесины позволяет повысить огнестойкость композитов на растительной основе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом ДСК установлены эндотермические эффекты для всех исследованных веществ (гипс, жидкое стекло и пропитывающий состав АПС-1500), природа которых – удаление химически связанный кристаллизационной воды. Температура отделения и последующего испарения молекул кристаллизационной воды от молекул минерала и проявления эндотермических пиков находится в диапазоне 100–200 °C.

Дальнейшие исследования гипса, жидкого стекла и пропитки АПС-1500 представляют интерес для изучения их свойств и применения в качестве огнезащитных вяжущих, связующих, пропитывающих составов композиционных материалов или защитных покрытий.

Были изготовлены и исследованы образцы древесины сосны, пропитанные жидким стеклом в течение 1–3 суток.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают эффективность пропитки жидким стеклом на примере древесины с получением композита с повышенной огнестойкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Morphological and physicomechanical characterization of synthetic and natural fibers / Z.G. Sakoshev [et al] // Journal of Polymer Research. 2024. Vol. 31, № 3. 86. DOI: 10.1007/s10965-024-03938-0.
2. Чащилов Д.В., Атаксова Е.В., Блазнов А.Н. Растворительные волокна и применение полимерных композиционных материалов на их основе. Обзор // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 12. С. 18–27. DOI: 10.31044/1994-6260-2021-0-12-18-27.
3. Чащилов Д.В. Гидротермическая обработка зерна гречихи. Формирование технологических, потребительских и нутрицевтических свойств ядра. Возможности

использования лузги // Ползуновский вестник. 2024. № 4. С. 139–148. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.021, EDN: <https://elibrary.ru/XEFPIM>.

4. Биополимеры – перспективный субстрат для биоконверсии и сырья растительного происхождения / Н.Ю. Демиденко [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 4. С. 208–212. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.031, EDN: <https://elibrary.ru/YVDBMC>.

5. ГОСТ 30244-94 Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть. М. : Стандартинформ, 2008. 16 с.

6. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. М. : ИГК Изд-во стандартов, 2003. 8 с.

7. Felix Sahayaraaj A.M.T.S., Sasi Kumar M., Sathish S., Gokulkumar S., Jenish I. & Makeshkumar M. Fire retardant potential of natural fiber reinforced polymer composites: a review // Polymer-Plastics Technology and Materials. 2024. Vol. 63. №. 7. P 771–797. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2303608>.

8. Огнеупорный алюмосиликатный пропитывающий состав-отвердитель АПС-1500 [Электронный ресурс]. URL: <https://otm59.ru/aps1500> (дата обращения: 22.02.2025).

9. Исследование гипсовых образцов с добавками минеральных частиц / А.Н. Блазнов [и др.] // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2023. № 9. С. 34–40. DOI: 10.31044/1994-6260-2023-0-9-34-40.

Информация об авторах

А. Н. Блазнов – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Материаловедения минерального сырья ИПХЭТ СО РАН, профессор кафедры «Машины и аппараты химических и пищевых производств» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Е. А. Головина – кандидат технических наук, доцент кафедры «Современные специальные материалы» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Д. А. Савин – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории Материаловедения минерального сырья ИПХЭТ СО РАН.

Н. В. Бычин – старший научный сотрудник лаборатории Материаловедения минерального сырья ИПХЭТ СО РАН.

Information about the authors

A.N. Blaznov - Doctor of Technical Sciences, Chief of the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, IPCET SB RAS, Professor of the Department of «Machines and apparatus for chemical and food production» of the Polzunov Altai State Technical University.

E.A. Golovina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Modern special materials» of the Polzunov Altai State Technical University.

D.A. Savin - Ph.D. student, Junior Research Scientist at the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, IPCET SB RAS.

N.V. Bychin - Senior Research Scientist at the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, IPCET SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принятая к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аббазова В. Н.	58	Кох Д. А.	97
Адонина М. Н.	84	Кох Ж. А.	97
Алексеева Е. В.	69	Крюк Р. В.	51
Анисимова Л. В.	155	Кудайнетова С. К.	168
Антонникова А. А.	238	Куклин В. А.	242
Арышенинский Е. В.	187	Курбанова М. Г.	51
Афонин Е. Г.	178	Куркина И. И.	247
Балаба А. Д.	51	Курцева В. Г.	127
Балахнина А. В.	238	Лазуткина Ю. С.	232
Барсуков А. Р.	251	Левагина А. А.	187
Барсуков Р. В.	251	Лунев И. В.	242
Беззертова Д. М.	168	Луц А. Р.	256
Беляевцева Т. А.	168	Марьин В. А.	136
Билялова А. С.	150	Маюрикова Л. А.	142
Блазнов А. Н.	267	Мирошина Т. А.	7
Бобина Е. А.	242	Неустроев Е. П.	247
Бугаева Н. Н.	168	Никитюк Д. Б.	150
Бурак Л. Ч.	32	Николаев Д. В.	247
Бычин Н. В.	267	Новоселов С. В.	142
Вайтанис М. А.	16	Панченко И. А.	203
Василишин М. С.	238	Причко Т. Г.	161
Васинкина Е. Ю.	212	Прудников А. Н.	203
Вахидов У. Ш.	262	Прусов Е. С.	262
Верещагин А. Л.	136	Пусенкова Л. И.	76
Вистовская В. П.	103	Раков Н. О.	24
Головина Е. А.	267	Резниченко И. Ю.	7
Голых Р. Н.	251	Рожнов Е. Д.	58
Горелова О. М.	232	Рязанов С. С.	51
Гурьев А. М.	197	Саевин Д. А.	267
Гурьев М. А.	197	Сантурян Т. А.	24
Данилаев М. П.	242	Свириденко Г. М.	69
Деев В. Б.	262	Серебренникова Е. С.	155
Дорофеев Р. В.	92	Сивак А. С.	212
Дриц А. М.	187	Сивак Т. П.	212
Дрофичева Н. В.	161	Синкин А. А.	225
Елисеева Л. Г.	24	Скорикова Д. П.	232
Ермолова Е. О.	110	Сливин А. Н.	251
Жукова В. Ф.	84	Соколова А. Х.	24
Загорничная А. Д.	76	Сомин В. А.	220
Загуляев Д. В.	203	Степанова С. В.	220
Захаров В. Л.	58	Сухоруков Д. В.	262
Захарова А. С.	120	Тармаева И. Ю.	150
Земляков С. А.	197	Тептерев М. С.	187
Зенин М. Н.	197	Титоренко Е. Ю.	110
Иванов А. А.	136	Токарев П. И.	24
Иванов О. С.	238	Тригорлык С. В.	212
Иванов С. Г.	197	Трубицына Ю. М.	92
Иванов Ю. Ф.	203	Файзуллин К. В.	242
Исаева Н. В.	142	Хатко З. Н.	168
Кадыкова Ю. А.	212	Хмелев В. Н.	225
Калабушкин В. В.	69	Ходырева З. Р.	16
Калганова С. Г.	212	Цыганок С. Н.	225
Калужина О. Ю.	76	Шайхиев И. Г.	220
Каменская Е. П.	103	Шакура В. А.	251
Карман Т. В.	84	Шалунов А. В.	225
Карпов А. Г.	238	Шевченко К. Е.	92
Кашлакова Е. А.	92	Шишкина А. Н.	69
Кожемякин Д. С.	103	Школьникова М. Н.	58
Кокорина Д. С.	24	Шляров В. В.	203
Колесниченко М. Н.	127	Шлярова Ю. А.	203
Колодина Е. М.	168	Щетинина Е. М.	150
Конева С. И.	120	Ямаев А. М.	242
Коновалов С. В.	187		

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

Статья объемом 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 прошлом 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.

Подписано в печать 10.04.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Усл. п. л. 31,85 Тираж 100 экз. Заказ 2025 – 10.

Отпечатано в типографии АлтГТУ им. И. И. Ползунова

Адрес типографии: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина 46

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

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);

• 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 учётом 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 подчёркивания 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.

**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**