



ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК

ISSN 2072-8921 (Print)

ISSN 3034-3941(Online)

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

№ 2

2025

Ползуновский ВЕСТНИК

№ 2 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 23.06.2025 г.
Цена 800 рублей.



Polzunovskiy VESTNIK

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

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

Publication frequency: quarterly

№ 2 2025 г.

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 23.06.2025



СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Л. А. Маюрикова, С. В. Новоселов, А. А. Кокшаров, Т. В. Крапива, В. О. Мешков Методологический подход обоснования разработки обогащенных продуктов питания.....	7	Е. П. Каменская, Г. В. Саберзянова Исследование влияния дрожжей верхового брожения на качественные показатели пшеничного пива	74
Н. К. Александров, Д. Л. Альшевский Разработка и оценка качества структурированной добавки на основе гидролизата коллагенсодержащего сырья	15	И. В. Мозжерина, В. Г. Попов, Е. Ю. Леонова Исследование длительности хранения свежей рыбы с применением диоксида углерода	81
М. В. Горбачева, И. А. Зачесова, Н. Н. Шагаева, С. Я. Ляхомский Коллаген как дополнительный источник белка в рецептуре напитка для здорового питания.....	20	Т. А. Павлова, А. А. Афанасьев, Ю. С. Сумеркина Особенности микроструктуры и состава жировой фазы сливочного масла из молочных и подсырных сливок	88
Д. И. Болдинов, Е. В. Аверьянова, М. Н. Зенин, Е. С. Ананьева Оптимизация условий модификации пектиновых веществ в технологии упаковочного материала	27	И. Ю. Резниченко, Т. А. Мирошина Разработка и оценка качества заварного полуфабриката специализированной направленности	94
К. Е. Буркин, А. Г. Мухамметшина, А. З. Мухарлямова, М. В. Балымова, А. М. Сайфутдинов, С. Л. Мохтарова Исследование образцов сливочного масла низкой ценовой категории на некоторые показатели качества и безопасности.....	34	А. А. Рядинская, С. А. Чуев Влияние цукатов из местного овощного сырья на качество мучных кондитерских изделий на примере соевого печенья.....	100
О. К. Зарифуллина, Н. В. Бураковская, Е. А. Молибога Обеспечение безопасности при производстве кисломолочного десерта на основе козьего молока	40	А. Л. Новокшанова Технологические функции белков молочной сыворотки в энтеральном питании	108
О. С. Якубова, Л. Н. Вострикова, С. В. Еремеева, А. А. Кушбанова Формирование бактериостатических свойств пищевой биодеградируемой пленки на основе рыбного коллагена	46	Т. В. Першакова, Г. А. Купин, Т. В. Яковлева, В. Н. Алёшин Влияние обработки томатов и кабачков липидным плёнкообразующим раствором на потерю массы и химический состав при хранении	112
М. В. Беляков, И. Ю. Ефременков Оптические спектральные исследования фракционного состава молока.....	53	О. Н. Мусина, Д. А. Усатюк, Н. И. Бондаренко Бетулин - перспективный ингредиент для молочной промышленности	121
Е. О. Ермолаева, Ю. В. Безносов, Е. Ю. Титоренко, Ю. В. Устинова Типовые проблемы производительности труда технологических процессов на мясоперерабатывающих предприятиях ..	59	Л. В. Анисимова, Е. С. Серебренникова Влияние способа обработки зерна на стойкость сорговой муки при хранении	127
Д. А. Самсонова, В. Д. Кийски, М. С. Иванов, Н. В. Яковченко Влияние растительных экстрактов родиолы и элеутерококка на ферментацию бобово-злаковой супензии.....	66	Ю. А. Ускова, Р. Х. Кандроков Исследование влияния конопляной муки на гигроскопические свойства сахарного печенья с применением модели Гуггенхайма-Андерсона-де Бура	132
		Н. Г. Ли, Е. П. Иванова, А. Н. Емельянов, Т. А. Ершова, Т. А. Сенотрусова, В. А. Лях, Т. В. Левчук, Ю. И. Мелишкевич Использование люцерны изменчивой для получения компонентов специализированных пищевых продуктов.....	137

РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Д. С. Клементьев, И. В. Минаев, А. Н. Чуканов, С. С. Гончаров, С. Н. Кутепов Влияние лазерного микроструктурирования на качество поверхностного слоя деталей из стали марки 30ХГСА143	О. С. Бондарева Высокотемпературное цинкование крепежных изделий199
В. И. Мосоров, К.С. Коробков, Б.Д. Лыгденов Исследование микроструктуры и свойств углеродистых сталей при диффузационном насыщении бором и никелем152	О. В. Гоголева, П. Н. Петрова, А. Л Федоров Исследование изменения свойств и структуры сверхвысокомолекулярного полиэтилена и его композита в процессе натурной экспозиции в условиях Якутии 207
В. В. Соловьев, М. А. Аревков, А. Д. Рычкова, В. П.Березовская Оценка механических свойств углепластиков157	В. Ю. Верещагин, А. Ю. Погиба, А. П. Кондратов Плеохроизм бесцветных полимерных покрытий на светоотражающей поверхности 214
И. Д. Твердов, Е. М. Готлиб, А. Р. Валеева, Е. С. Ямалеева Получение диопсида на основе золы рисовой шелухи методом твердофазного синтеза163	Н. Н. Минакова Оценка влияния технологии на электропроводность наполненного техническим углеродом эластомера методом сканирующей электронной микроскопии ... 220
С. Н. Данилова, Е. С. Ямалеева, Е. М. Готлиб, С. Б. Ярусова, П. С. Гордиенко, А. А. Охлопкова, Л. Н. Иванова Наполнение сверхвысокомолекулярного полиэтилена синтетическим волластонитом, полученным на основе разных видов побочных продуктов168	А. А. Зенкова Получение бактериальной наноцеллюлозы из различного целлюлозосодержащего сырья 224
О. Ю Сартакова, О. М. Горелова Исследования по фиторемедиации при очистке почв от тяжелых металлов176	В. Ю. Филимонов, М. В. Логинова, А. В. Собачкин, А. А. Ситников, В. И. Яковлев, А. Ю. Мясников, А. З. Негодяев, А. А. Розный Особенности процессов структуроформообразования в активированных порошковых смесях Ti-Al при экстремальном термическом воздействии 231
В. Н. Хмелёв, А. Н. Сливин, Р. Н. Голых, А. Р. Барсуков Ультразвуковой аппарат для повышения эффективности технологических процессов при избыточном давлении182	С. А. Халёрских, Е. С. Ананьева, А. В. Собачкин Исследование шероховатости поверхности древесно-волокнистого композита 237
А. Ш. Хисамова, С. В. Степанова, А. А. Алексеева Использование шелухи пшеницы в качестве природного сорбционного материала для ликвидации разливов нефти187	А. А. Зенкова, Н. А. Шавыркина Культивирование бактериальной наноцеллюлозы на полусинтетической питательной среде для последующей функционализации 244
А. П. Федорова, Д. Р. Юдин Изучение кинетики процесса сушки поликапроамида193	АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ 251

CONTENTS

SECTION 1. FOOD TECHNOLOGY

<i>L. A. Maiurnikova, S. V. Novoselov, A. A. Koksharov, T. V. Krapiva, V. O Meshkov.</i> A methodological approach to substantiate development of fortified foods 7	<i>E. P. Kamenskaya, G. V. Sabrezyanova</i> Study of influence of top fermenting yeast on quality indicators of wheat beer ... 74
<i>N. K. Aleksandrov, D.L. Al'shevskiy</i> Development and quality assessing of a structured additive based on collagen-containing raw materials hydrolyzate..... 15	<i>I. V. Mozzherina, V. G. Popov, E. Y. Leonova</i> Study on duration of storage of fresh fish using carbon dioxide..... 81
<i>M. V. Gorbacheva, I. A. Zachesova, N. N. Shagaeva, S. Ya. Lyakhomsky</i> Collagen as an additional source of protein in formulation of a drink for healthy nutrition 20	<i>T. A. Pavlova, A. A. Afanasyeva, Yu. S. Sumerkina</i> Peculiarities of microstructure and composition fat phase of butter from dairy and whey cream 88
<i>D. I. Boldinov, E. V. Averyanova, M. N. Zenin, E. S. Anan'eva</i> Optimization of conditions for modification of pectin substances in packaging material technology 27	<i>I. Yu. Reznichenko, T. A. Miroshina</i> Development and quality evaluation of specialised choux semi-finished product ... 94
<i>K. E. Burkin, A. G. Mukhammetshina, A. Z. Mukharlyamova, M. V. Balyanova, A. M. Saifutdinov, S. L. Mokhtarova</i> Study of low price butter samples for some quality and safety indicators 34	<i>A. A. Ryadinskaya, S. A. Chuev</i> Effect of candied fruits from local vegetable raw materials on quality of flour confectionery products using example of soy cookies 100
<i>O. K. Zarifulina, N. V. Burakovskaya, E. A. Moliboga</i> Safety assurance in production of sour-milk dessert based on goat's milk..... 40	<i>A. L. Novokshanova</i> Technological functions of whey proteins in enteral nutrition 108
<i>O. S. Yakubova, L. N. Vostrikova, S. V. Eremeeva, A. A. Kushbanova</i> Formation of bacteriostatic properties of food biodegradable film based on fish collagen 46	<i>T. V. Pershakova, G. A. Kupin, T. V. Yakovleva, V. N. Aleshin</i> Effect of treating tomatoes and courgettes with a lipid film-forming solution on weight loss and chemical composition during storage 112
<i>M. V. Belyakov, I. Yu. Efremenkov</i> Optical spectral studies of the fractional composition of milk..... 53	<i>O. N. Musina, D. A. Usatyuk, N. I. Bondarenko</i> Betulin is a promising ingredient for dairy industry 121
<i>E. O. Ermolaeva, Yu. V. Beznosov, E. Yu. Torenko, Yu V. Ustinova</i> Typical problems of labor productivity of technological processes at meat processing enterprises 59	<i>L. V. Anisimova, E. S. Serebrenikova</i> Effect of grain processing method on durability of sorghum flour during storage ... 127
<i>D. A. Samsonova, V. D. Kiiski, M.S. Ivanov, N. V. Iakovchenko</i> Influence of rhodiola and eleutherococcus plant extracts on the fermentation of legume-cereal suspension..... 66	<i>Yu. A. Uskova, R. Kh. Kandrokov</i> Hygroscopic properties of sugar cookies with hemp flour: application of guggenheim-anderson-de boer model 132
	<i>N. G. Li, E. P. Ivanova, A. N. Emelyanov, T. A. Ershova, T. A. Senotrusova, V. A. Lyakh, T. V. Levchuk, Yu. I. Melishkevich</i> Use of alfalfa to obtain components of specialty food products 137

SECTION 2. CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

<i>D. S. Klementev, I. V. Minaev, A. N. Chukanov, S. S. Goncharov, S. N. Kutepov</i> Influence of laser microstructure on structure and properties of surface layer of parts made of 30KhGSA steel	143
<i>V. I. Mosorov, K. S. Korobkov, B. D. Lygdenov</i> Investigation of microstructure and properties of carbon steels in diffusion saturation with boron and nickel	152
<i>V. V. Solovyov, M. A. Arevkov, A. D. Rychkova, V. P. Berezovskaya</i> Evaluation of mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics	157
<i>I. D. Tverdov, E. M. Gotlib, A. R. Valeeva, E. S. Yamaleeva</i> Production of diopside based on rice husk ash by solid-phase synthesis method	163
<i>S. N. Danilova, E. S. Yamaleeva, E. M. Gotlib, S. B. Yarusova, P. S. Gordienko, A. A. Okhlopkova, L. N. Ivanova</i> Filling of ultra-high molecular weight polyethylene with synthetic wollastonite obtained from various types of by-products	168
<i>O. Y. Sartakova, O. M. Gorelova</i> Research on phytoremediation of heavy metals in soil	176
<i>V. N. Khmelev, A. N. Slivin, R. N. Golykh, A. R. Barsukov</i> Ultrasonic device to increase efficiency technological processes under excessive pressure	182
<i>A. Sh. Khisamova, S. V. Stepanova, A. A. Alekseeva</i> Use of wheat husk as a natural sorption material for oil spill response	187
<i>A. P. Fedorova, D. R. Yudin</i> Studying kinetics of polycapramide drying process	193
<i>O. S. Bondareva</i> High temperature hot-dip galvanizing of fasteners	199
<i>O. V. Gogoleva, P. N. Petrova, A. L. Fedorov</i> Investigation of changes in properties and structure of ultra-high molecular weight polyethylene and its composite during full-scale exposure in Yakutia	207
<i>V. Yu. Vereshchagin, A. Yu. Pogiba, A. P. Kondratov</i> Pleochroism of colorless polymer coatings on a reflective surface	214
<i>N. N. Minakova</i> Comparing properties of carbon black filled polymer scanning microscopy macrostructure images to estimate influence of production stages on electric conductivity of polymers	220
<i>A. A. Zenkova</i> Production of bacterial nanocellulose from various cellulose-containing raw materials	224
<i>V. Yu. Filimonov, M. V. Loginova, A. V. Sobachkin, A. A. Sitnikov, V. I. Yakovlev, A. Yu. Myasnikov, A. Z. Negodyaev, A. A. Roznyj</i> Features of structure and phase formation processes in activated Ti-Al powder mixtures under extreme thermal conditions	231
<i>S. A. Khaperskikh, E. S. Anan'eva, A. V. Sobachkin</i> Production of bacterial nanocellulose from various cellulose-containing raw materials	237
<i>A. A. Zenkova, N. A. Shavyrkina</i> Cultivation of bacterial nanocellulose on a semisynthetic nutrient medium for subsequent functionalization	244
AUTHOR'S INDEX	251



РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Научная статья

4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)

УДК 65.00.01

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.001

EDN: MFDHGN

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД ОБОСНОВАНИЯ РАЗРАБОТКИ ОБОГАЩЕННЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Лариса Александровна Маюрикова ¹, Сергей Владимирович Новоселов ²,
Аркадий Андреевич Кокшаров ³, Татьяна Валерьевна Крапива ⁴,
Владислав Олегович Мешков ⁵

^{1, 3, 4, 5} Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ Nir30@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4592-8382>

² sv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8247-2356>

³ Koksharov.arkadiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2782-5833>

⁴ t.krapiva@mail.ru, ID <https://orcid.org/0000-0002-9441-8744>

⁵ vlad.meshkov.1998@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3643-03902>

Аннотация. Одна из современных проблем цивилизации – неинфекционные хронические заболевания, требующие пересмотра парадигмы питания с точки зрения министерств, ведомств, органов и организаций, имеющих прямое или косвенное отношение к разработке, производству и реализации специализированных продуктов питания. Определяющими для разных секторов являются доктринальные и нормативные документы как часть политики питания в рамках Всемирной организации здравоохранения, так и каждой отдельно взятой страны. Как правило, эти документы имеют обобщающий характер с учетом принципа унификации и зачастую требуют анализа и разработки рекомендаций более частного характера. Проведен критический анализ нормативных и доктринальных документов относительно перспектив разработки и требований к разработке, производству и обороту обогащенных продуктов питания как подгруппы специализированных. Установлено, что в анализируемых документах в большей степени речь идет о пищевой продукции в целом, за исключением случаев, когда без определенной информации невозможно провести экспертизу с целью подтверждения качества и безопасности для реализации населению. Учитывая необходимость разработки обогащенных пищевых продуктов как одного из всемирно признанного эффективного пути профилактики алиментарных заболеваний, выявлено противоречие между наличием многочисленных разработок, в том числе имеющих патентную поддержку и отсутствием этой группы продуктов на рынке. Анализ сложившейся ситуации позволил авторам предложить способ разрешения противоречия – разработать методологические подходы к концептуализации процесса формирования вкуса обогащенных пищевых продуктов, так как основной фактор при выборе потребителем пищевой продукции является вкус.

Ключевые слова: алиментарные заболевания, профилактика, обогащенные продукты питания, нормативные документы, доктринальные документы, критический анализ, методология, концептуализация вкуса.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования: Методологический подход обоснования разработки обогащенных продуктов питания / Л. А. Маюрикова [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 7–14. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.001. EDN: <https://elibrary.ru/MFDHGN>.

Original article

A METHODOLOGICAL APPROACH TO SUBSTANTIATE DEVELOPMENT OF FORTIFIED FOODS

Larisa A. Maiurnikova ¹, Sergey V. Novoselov ², Arkady A. Koksharov ³,
Tatyana V. Krapiva ⁴, Vladislav O. Meshkov ⁵

^{1, 3, 4, 5} Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

² Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ Nir30@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4592-8382>

² sv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8247-2356>

³ Koksharov.arkadiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2782-5833>

⁴ t.krapiva@mail.ru, ID <https://orcid.org/0000-0002-9441-8744>

⁵ vlad.meshkov.1998@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3643-03902>

© Маюрикова Л. А., Новоселов С. В., Кокшаров А. А., Крапива Т. В., Мешков В. О., 2025

Abstract. One of the modern problems of civilization is non-communicable chronic diseases, which require a revision of the nutrition paradigm from the point of view of ministries, departments, bodies and organizations directly or indirectly related to the development, production and sale of specialized food products. Doctrinal and regulatory documents are crucial for different sectors, both as part of nutrition policy within the World Health Organization and for each individual country. A critical analysis of normative and doctrinal documents regarding the prospects for the development and requirements for the development, production and turnover of fortified foods has been conducted. It has been established that to a greater extent we are talking about food products in general, except in cases where, without certain information, it is impossible to conduct an expert examination in order to confirm the quality and safety for sale to the public. Given the need to develop fortified foods as one of the internationally recognized effective ways to prevent nutritional diseases, a contradiction has been revealed between the presence of numerous developments, including those with patent support, and the absence of this group of products on the market. The analysis of the current situation allowed the authors to propose a way to resolve the contradiction - to develop methodological approaches to conceptualizing the process of taste formation of fortified foods, since taste is the main factor in the consumer's choice of food products.

Keywords: nutrition-related diseases, prevention, fortified foods, regulatory documents, doctrinal documents, in-depth analysis, methodology, conceptualization of taste.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to his / her colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.

For citation: Maiurnikova, L.A., Novoselov, S.V., Koksharov, A.A., Krapiva, T.V. & Meshkov, V.O. (2025). A methodological approach to substantiate development of fortified foods. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 7-14. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.001. EDN: <https://elibrary.ru/MFDHGN>.

ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), неинфекционные заболевания (НИЗ) представляют постоянно растущую угрозу для здоровья человека в настоящем и будущем независимо от совокупности факторов, их формирующих в разных странах мира. Общепринято, что под профилактикой НИЗ понимается разработка и реализация мероприятий по недопущению возникновения заболеваний, в частности связанных с неправильным питанием.

Анализ научной литературы по обсуждаемой теме свидетельствует о том, что независимо от «знания» проблемы и реализации разного рода профилактических программ в хронологии наблюдается низкий уровень их эффективности. Так, в России (2015–2017 гг.), по данным исследований, обеспеченности витаминами у взрослого населения приоритетными дефицитами являлись витамин D, витамин B2 и каротин. В результате анализа статистических данных (2015–2018 гг.) исследований обеспеченности витаминами C, B1, B2 и B6 детского населения был выявлен недостаток витамина B2 у каждого второго-третьего – витамина B1 – у 39,5–68,6 %, а недостаток витамина B6 был характерен для 2/3 обследованных детей [1]. У 20–40 % студентов России, по данным 2021 года, выявляются признаки выраженного гиповитаминоза, особенно кальциферола, что обусловлено не только его дефицитом в пищевом рационе, но и физико-географическими, климатическими и сезонными факторами [2–5]. Недостаточная обеспеченность витаминами и минеральными веществами относится к факторам риска многих алиментарно-зависимых заболеваний (А33), которые могут быть скорректированы питанием.

Многие специалисты в области питания сходятся во мнении, что одним из эффективных путей коррекции дефицитов являются специализированные продукты питания для разных групп населения. В этой связи существует необходимость разработки и расширения ассортимента специализированных продуктов питания, в том числе

обогащенных незаменимыми нутриентами. Это подтверждается не только большим количеством научных публикаций, но и доктринальными документами.

Однако ретроспективный анализ научной литературы выявляет в основном исследования по разработке обогащенных продуктов питания разных однородных групп, но ограниченное количество публикаций по теории обоснования и концептуализации процесса этих разработок [6].

Концептуализация – это осмысление имеющейся/поступающей информации, мысленное конструирование предметов и явлений, которое приводит к образованию определенных представлений о «мире» в виде концептов [7]. Под «миром» в данном случае авторы понимают систему «Теоретико-методологическое обоснование нового продукта – проектирование – производство – рынок (доведение обогащенных продуктов питания до потребителя) – профилактика А33».

МЕТОДЫ

Анализ существующих исследований в области подходов к разработке специализированных продуктов питания включал критический подход, основывающийся на углубленном изучении законодательной, нормативной документации, а также стратегий и программ развития отраслей экономики Российской Федерации. Выявление аспектов применяемых принципов обогащения позволило выявить факторы, формирующие качество продукции специализированного назначения. По принципу метода синтеза на основе обобщенных данных удалось сформулировать подходы в обеспечении населения качественной специализированной пищевой продукции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью исследований является критический анализ нормативных и доктринальных документов, определяющих перспективные направления создания специализированных продуктов питания для снижения алиментарных заболеваний, порядок и процедуру формирования и оценки их качества для выработки рекомендаций методологического

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД ОБОСНОВАНИЯ РАЗРАБОТКИ ОБОГАЩЕННЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

подхода к разработке на основе гибридных технологий.

Проблема АЗЗ многоаспектна, обусловлена разнообразием причин из возникновения, индивидуальностью протекания, методами профилактики (популяционная, групповая, индивидуальная), специфическими и функциональными особенностями применения в рационе и т.д. Обоснованное множество специализированных продуктов питания вызывает необходимость их классификации. Анализ и обобщение информации научной литературы выявили различные видения авторов относительно классификации СПП. Отчасти это обусловлено выбором аспекта, в рамках которого рассматривается вопрос с разных точек зрения специалистами, с учетом проблемного поля (междисциплинарности) в организации питания населения.

Например, существуют классификации СПП, в основу которых положены признаки, обозначенные ниже:

- в зависимости от вида (однородные группы) и природы происхождения применяемого продовольственного сырья;
- по применению готовой продукции (для каких групп населения с учетом специфических потребностей организма (дети, беременные, спортсмены и т.д.);

- по видам питания: традиционное (функциональные ПП с повышенным содержанием нутриентов), диетическое (в том числе с учетом конкретного НИХЗ), лечебно-профилактическое (в т.ч. с учетом специфики профессиональной деятельности, лечебное питание (товарная форма – жидкие смеси, пастообразные и сухие смеси).

На рисунке 1 представлена классификация, дающая более полную характеристику и понятие общности и различий СПП.

Среди перечня групп продуктов, относящихся к специализированным, представляют интерес обогащенные, которые должны занимать значительную часть современного продовольственного рынка в связи с их функциональностью в профилактике АЗЗ разных группах населения.

Предыстория развития вопроса обогащения пищевой продукции – это первый этап формирования Государственной политики, который датировался 1937–1939 гг., когда было принято решение Совнаркома СССР об обогащении муки витаминами В1, В₂, и РР. Второй этап решения вопроса снижения дефицита МИН в питании населения – 1960–1972 гг. – обозначен Приказом Минздрава СССР о С-витаминизации первых и третьих блюд в ряде коллективов с организованным питанием.



Рисунок 1 – Классификация специализированных продуктов питания

Figure 1 – Classification of specialized food products

Начало 2000-х годов в России характеризуется кардинальной сменой парадигмы питания, формирование которой вызывает необходимость пересмотра государственной политики, ее трансформации с учетом меняющейся социально-экономической ситуации, в том числе определяемой внутренней и внешней политической ситуацией.

Большая Российская Энциклопедия определяет Политику (Policy) как процесс обсуждения, принятия и реализации политico-управленческих решений, деятельность институтов власти по решению актуальных для общества социально-экономических и иных проблем, по обеспечению устойчивости экономики страны и обеспечению достойной жизни для

жителей страны. Государственная политика в области здорового питания – это комплекс мероприятий, направленных на создание условий, обеспечивающих удовлетворение потребностей различных групп населения в здоровом питании с учётом их традиций, привычек и экономического положения.

Государственное регулирование как составляющая Государственной политики включает в себя три самостоятельные, но взаимоувязанные направления: разработку нормативно-правовых актов, поддержку государства (организационную, финансовую) и контроль/надзор.

На основе анализа как отечественного, так и зарубежного опыта использования обогащенных

продуктов питания для снижения дефицита макро- и микроэлементов в питании населения и, как следствие, НИХЗ, в России для обеспечения развития этого направления разработана нормативно-правовая база специализированных продуктов питания. Это ряд технических регламентов (Таможенного союза) Евразийского экономического союза, устанавливающие, в частности, обязательные для применения и исполнения требования к специализированной пищевой продукции: «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011), «Пищевая продукция в части ее маркировки» (ТР ТС 022/2011), «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания» (ТР ТС 027/2012), «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств» (ТР ТС 029/2012), «Технический регламент на соковую продукцию из фруктов и овощей» (ТР ТС 023/2011), «О безопасности молока и молочной продукции» (ТР ТС 033/2013), «О безопасности мяса и мясной продукции» (ТР ТС 034/2013), «О безопасности рыбы и рыбной продукции» (ТР ЕАЭС 040/2016), «О безопасности упакованной питьевой воды, включая природную минеральную воду» (ТР ЕАЭС 044/2017). Требования к обеспечению качества и безопасности, изложенные в перечисленных нормативных документах, в большей степени затрагивают в целом группу специализированных продуктов питания и только отчасти группу обогащенных продуктов питания.

Разработаны и функционируют государственные стандарты: ГОСТ Р 52349–2005 «Продукты пищевые. Продукты пищевые функциональные. Термины и определения», устанавливающий понятие «функциональный пищевой продукт» и «обогащенный пищевой продукт».

1 Функциональный пищевой продукт: пищевой продукт, предназначенный для систематического употребления в составе пищевых рационов всеми возрастными группами здорового населения, снижающий риск развития заболеваний, связанных с питанием, сохраняющий и улучшающий здоровье за счет наличия в его составе физиологически функциональных пищевых ингредиентов.

2 Обогащенный пищевой продукт: функциональный пищевой продукт, получаемый добавлением одного или нескольких физиологически функциональных пищевых ингредиентов к традиционным пищевым продуктам с целью предотвращения возникновения или исправления имеющегося в организме человека дефицита питательных веществ.

3 Физиологически функциональный пищевой ингредиент: вещество или комплекс веществ животного, растительного, микробиологического, минерального происхождения или идентичные натуральным, а также живые микроорганизмы, входящие в состав функционального пищевого продукта, обладающие способностью оказывать благоприятный эффект на одну или несколько физиологических функций, процессы обмена веществ в организме человека при систематическом употреблении в количествах, составляющих от 10 % до 50 % от суточной физиологической потребности.

ГОСТ Р 55577–2013 «Продукты пищевые

функциональные. Информация об отличительных признаках и эффективности» распространяется на оценку сведений (информации об отличительных признаках) о пищевой ценности и эффективности специализированных и функциональных пищевых продуктов, и функциональных пищевых ингредиентов, для которых изготовитель декларирует данные сведения в маркировке и/или в рекламе данной пищевой продукции.

Согласно терминологии, ФПП – это традиционные продукты питания, реализуемые на продовольственном рынке, без «модификации» на этапе производства. ПЦ таких продуктов определяется «по факту» и может быть низкой, т.е. функциональные ингредиенты содержатся в минимальных количествах, не обеспечивающих потребности организма человека. В этом случае повышается роль обогащенных ПП в рационе населения.

Более конкретные требования к группе обогащенных продуктов питания изложены в Санитарно-эпидемиологические правилах и нормативах Сан-ПиН 2.3.2.2804-10 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов». Анализ п. 8.1. «Основные требования к обогащению пищевых продуктов микронутриентами» свидетельствует о том, что в основу требований положены известные и широко используемые при разработке обогащенных продуктов питания (ОПП) «Принципы обогащения» [8]. Отличительной информацией, внесенной в Требования пункта, является «обогащению подлежат пищевые продукты массового потребления, используемые регулярно и повсеместно в повседневном питании взрослого населения и детей старше 3 лет...» и «...обогащение пищевых продуктов витаминами и минеральными веществами не должно влиять на показатели безопасности» [9].

В данном документе изложены требования

- к Формам и перечню витаминов и минеральных веществ, используемых для обогащения пищевых продуктов (п.8.2.);

- к Регламентируемым уровням содержания витаминов и минеральных веществ в обогащенных продуктах (п.8.3.);

- к Специальным требованиям к обогащенным витаминами и минеральными веществами пищевым продуктам (п.8.4.);

- к Требованиям к информации при маркировке пищевых продуктов, обогащенных витаминами и минеральными веществами (п.8.5).

Известно, что в решении проблем глобального, национального уровней важную роль играет процесс формирования Политики государства в обозначенном направлении (принципиальное руководство к действию для органов государственной власти). Для решения национальной проблемы «обеспечения продовольственной безопасности» в России разработан ряд доктринальных документов, в частности «Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации» и «Стратегия повышения качества пищевой продукции Российской Федерации». Содержание документов имеет целью обозначить цели, задачи, перспективные направления науки и техники в решении

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД ОБОСНОВАНИЯ РАЗРАБОТКИ ОБОГАЩЕННЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

поставленной проблемы.

Доктрина продовольственной безопасности (Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20) – документ стратегического планирования, отражающий официальные взгляды на цели, задачи и основные направления государственной социально-экономической политики в области обеспечения продовольственной безопасности РФ. Критический анализ направлений государственной политики в сфере обеспечения продовольственной безопасности выявил только два пункта, в которых напрямую или опосредованно излагается точка зрения относительно СПП и, в частности, ОПП.

Пункт 21:

- продолжить гармонизацию международных требований, характеристик и параметров качества и безопасности пищевой продукции на основе фундаментальных исследований в области гигиены и науки о питании;

- совершенствовать механизмы стимулирования производителей к выпуску пищевой продукции, отвечающей принципам здорового питания.

Пункт 25:

- проведения фундаментальных и прикладных научных исследований, по медико-биологической оценке, безопасности продовольственной продукции, наращивания производства новой обогащенной, специализированной, в том числе диетической, пищевой продукции;

- расширения ассортимента и объемов производства пищевой продукции массового потребления со сниженным содержанием жира, насыщенных жирных кислот и трансизомеров жирных кислот, сахара и поваренной соли.

Проведен критический анализ Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 г. на предмет адаптации отдельных пунктов применительно к формированию концепции разработки обогащенных пищевых продуктов.

Целью Стратегии являются обеспечение качества пищевой продукции как важнейшей составляющей укрепления здоровья, увеличения продолжительности и повышения качества жизни населения

Данная цель отражает проблему обеспечения населения ОПП, так как пищевая ценность и функциональные свойства ПП являются составляющими качества продукции.

Задачи:

1. Совершенствование и развитие нормативной базы в сфере качества пищевой продукции.

Процесс разработки ОПП, включая оценку качества и установление регламентируемых показателей в целом, обеспечен нормативными документами ТР/ТС, СанПиН, ГОСТы, МУ, МР. Проблемой является то, что практически все разработки осуществлены в рамках ТУ/ТИ. Держателями, а одновременно и владельцами этой формы технологической документации являются сами разработчики, что не позволяет проводить унификацию показателей качества (функциональности) и безопасности ОПП.

2. Обеспечение мониторинга качества пищевой продукции.

Для реализации этой задачи Стратегии

разработан документ "МР 2.3.7.0168-20 Оценка качества пищевой продукции и оценка доступа населения к отечественной пищевой продукции, способствующей устранению дефицита макро- и микроэлементов (МН)», который предусматривает проведение оценки доступа населения (физической и экономической доступности) к отечественной пищевой продукции, способствующей устранению дефицита МН, в том числе пищевой продукции, обогащенной, позволяет:

- проводить мониторинг наличия пищевой продукции и доступа населения к ней для устранения дефицита МН;

- разрабатывать для пищевой промышленности предложения по расширению ассортимента и объемов производства отечественной пищевой продукции для устранения дефицита МН;

- вести учет предприятий пищевой промышленности, ассортимента и объемов производства в субъектах РФ обогащенной отечественной пищевой продукции.

Однако анализ отчетов РПН регионов РФ на 01.05.2024 г. не выявил информации в открытом доступе об отчетности по проведенным проверкам в рамках указанного в МР мониторинга.

3. Создание единой информационной системы прослеживаемости пищевой продукции.

Эта задача Стратегии может решаться совместно в комплексе с задачей № 2.

4. Разработка и внедрение системы управления качеством пищевой продукции.

Эта задача согласуется с задачей № 2 и требует проведения комплексных научных исследований в области управления качеством применительно к ОПП. За основу разработки может быть взята система управления качеством традиционных ПП с последующей доработкой.

5. Создание механизмов стимулирования производителей к выпуску пищевой продукции, отвечающей критериям качества и принципам здорового питания.

На наш взгляд, это самая сложная задача. Причина сложности ее решения заключается в отсутствии взаимосвязи между элементами-участниками инновационного развития отраслей сферы питания «Наука и Образование – Производство – Рынок». При плановом ведении хозяйства (СССР) осуществлялось планирование и прогнозирование количества разных однородных групп продуктов, в т.ч. и специализированного назначения. В рыночных условиях, в которых находится развитие России, начиная с конца 1990-х гг. изменился подход к формированию рынка. Предприятия выпускают в основном продукцию, востребованную рынком (потребителем). В настоящее время не сформированы потребительские предпочтения к ОПП/СПП, в связи с чем предприятия не стремятся к выпуску таких продуктов питания. Это задача на первом этапе научная, которая заключается разработке методологии/методов/способов выведения на рынок ОПП на основе сформированных предпочтений. Патентный поиск показывает достаточно большое количество ОПП, однако на рынке они отсутствуют.

6. Создание условий для производства пищевой продукции нового поколения с заданными

характеристиками качества;

7. Возрождение в Российской Федерации производства пищевых ингредиентов;

8 – разработка и реализация обогащающих добавок отечественного производства.

Считаем, что задачи 7 и 8 взаимосвязаны. В принципе, предприятия, выпускающие пищевую продукцию, имеют возможности и перспективы выпуска ОПП. Для обеспечения качества и безопасности рекомендуется на этих предприятиях разработать и внедрить системы безопасности НАССР.

Что касается проблем, они в большей степени связаны с задачей № 8 – разработка и реализация обогащающих добавок отечественного производства. Известно, что значительная часть обогащающих добавок/премиксов закупается за рубежом (валюта), что удорожает себестоимость ОПП.

При проведении критического анализа нормативных и доктринальных документов, лежащих в основе разработки и реализации Политики здорового питания, важно определить приоритетность исследований, имеющих важное значение для обеспечения национальной безопасности.

Ниже представлена выписка из Критических технологий, относящихся к приоритетным в области обеспечения продовольственной безопасности, как части национальной по указу Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529:

- Биомедицинские и когнитивные технологии здорового и активного долголетия.
- Технологии персонализированного, лечебного и функционального питания для здоровьесбережения.
- Технологии повышения продуктивности (в том числе с помощью селекции) сельскохозяйственных животных и их устойчивости к заболеваниям.
- Технологии получения устойчивых к изменениям природной среды новых сортов и гибридов растений.
- Технологии, основанные на методах синтетической биологии и генной инженерии.
- Природоподобные технологии.

Принципиальная особенность критических технологий – высокий уровень требований к их качеству и эффективности, в основу этих технологий, как правило, положена конвергенция (многоаспектность). Это еще раз подтверждает необходимость разработки теоретико-методологических подходов к проектированию специализированных/обогащенных продуктов питания.

Целесообразно обозначить задачи, изложенные в Стратегии научно-технологического развития РФ до

Таблица 1 – Факторы, формирующие и сохраняющие потребительские свойства обогащенных продуктов питания, как совокупности ТТР и ОЭР

Table 1 – Factors that form and preserve the consumer properties of fortified foods as a set of technical, technological, organizational and economic decisions

Технико-технологическое решение (ТТР)		Организационно-экономическое решение (ОЭР)
Факторы формирующие	Факторы сохраняющие	Факторы стимулирующие
1	2	3
Демонстрируемый дефицит микро- и макронутриентов	Состав и количество обогащающих добавок	Рост НИЗ, в т.ч. А33
Существующий спрос на ОПП	Востребованность ОПП	Социально-экономическая целесообразность
Выбор целевой группы для разработки ОПП	Возможности предприятий для производства ОПП	Повышение работоспособности населения

2035, имеющие отношение к реализации Политики здорового питания, через обеспечение населения РФ обогащенной пищевой продукцией. Наиболее значимым вызовом для научно-технологического развития в этом направлении является «демографический переход, обусловленный снижением рождаемости, увеличением продолжительности жизни, изменением образа жизни, и связанное с этим старение населения, что в совокупности приводит к новым социальным и медицинским проблемам». Для достижения цели научно-технологического развития отраслей сферы питания необходимо:

- сформировать эффективную систему взаимодействия науки, технологий и производства, обеспечив повышение восприимчивости экономики и общества к новым технологиям, создав условия для развития наукоемкого предпринимательства;

- создать инфраструктуру и условия для проведения научных исследований, и разработок, внедрения наукоемких технологий, отвечающих современным принципам организации научной, научно-технической и инновационной деятельности, на основе лучших российских и мировых практик;

Указанные задачи напрямую связаны с разработкой теоретических основ как совокупности методологии, концепций, способов, подходов к проектированию, разработке, практической реализации в производственных условиях, выведению на рынок и доведению до потребителя обогащенных продуктов питания с последующим мониторингом их эффективности.

Так, надо отметить существующую проблему низкой востребованности ОПП на отечественном рынке, которая, в свою очередь, формирует проблему постановки их на производство, напрямую зависящую от сформированного спроса. В научной литературе можно обнаружить достаточно большое количество результатов исследований потребительских предпочтений различных групп населения к обогащенным продуктам питания [10]. Обобщение и систематизация результатов позволяет выявить наиболее часто отмечаемые факторы выбора:

- вкус (собственные представления о вкусе);
- качество (собственное представление о качестве);
 - цена;
 - свежесть/натуральность;
 - полезность;
 - безопасность;
 - марка.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД ОБОСНОВАНИЯ РАЗРАБОТКИ ОБОГАЩЕННЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

1	2	3
Разработка регламентируемых показателей для конкретных ОПП	Разработка технологической документации для производителя и контроля	Обеспечение качества на предприятии за счет внедренных систем качества и безопасности
Качество и безопасность продовольственного сырья для ОПП	Пищевая ценность сырья для рецептурного состава ОПП	Затраты на производство
Наличие апробированных (разрабатываемых) технологий обогащения	Выбор этапов обогащения и режимов технологии	Мотивация, интересы производителя и потребителя
Уровень качества (функциональности) ОПП	Подтверждение профилактической эффективности ОПП	Требования контроля к ОПП, субъекты контроля

Анализ нормативных документов, регламентирующих качество и безопасность обогащенных продуктов питания, не всегда отражает всю полноту требований к потребительским свойствам. Например, касаюмо органолептических свойств, которым потребители уделяют достаточно большое внимание, отражены только в одном из принципов обогащения и/или требованиян СанПиН 2.3.2.2804-10 (п.8.1.1.): «обогащение пищевых продуктов витаминами и минеральными веществами не должно ухудшать потребительские свойства этих продуктов...». При этом анализ многочисленных исследований потребителей пищевой продукции, реализуемой на рынке, свидетельствует о снижении вкуса продуктов, независимо от применения пищевых добавок в рецептурах с целью улучшения органолептических показателей.

Анализ существующих технологий обогащения продуктов питания незаменимыми нутриентами показывает наличие двух подходов:

- технологии механистического формирования состава ОПП с необходимым для жизнедеятельности человека набором макро- и микронутриентов;
- технологии, основанные на изучении и учете потребительских предпочтений при разработке ОПП.

В практической деятельности наиболее часто используются технологии механистического формирования состава ОПП для решения задачи снижения дефицитов в питании и как следствие снижения АЗЗ их вызывающих.

Разработка инновационного проекта нового ОПП осуществляется на базе синтеза технико-технологического решения (ТТР) и организационно-экономического решения (ОЭР). Процесс разработки новых ОПП включает в себя выявление и учет факторов, формирующих потребительские свойства продукта независимо от выбранной технологии обогащения (табл. 1).

Среди семи факторов, формирующих качество ОПП, только последний имеет прямое отношение к качеству. Т.е. речь идет об уровне качества готового продукта питания, обогащенного витаминами и микро-макронутриентами. Уровень качества продукции – относительная характеристика качества продукции, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемой продукции с базовыми значениями соответствующих показателей. Для ОПП в соответствии с принципами обогащения по органолептическим показателям он не должен отличаться от традиционного.

ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая слабую наполняемость отечественного рынка специализированными, в т.ч.

обогащенными продуктами питания, считаем перспективным направлением исследований на этапе проектирования и разработки этой группы продуктов «концептуализацию процесса формирования вкуса»: выявление и анализ факторов, объективно и субъективно формирующих вкус; новые подходы к оценке вкуса, так как вкус пищи невозможно установить с точностью и объективностью и т.д.

Анализ патентной литературы показывает широкий ассортимент обогащенных продуктов питания, где интеллектуальной собственностью являются состав, способы внесения обогащающих добавок, технологические режимы, упаковочные материалы и т.д. Не патентуется только «вкус пищи». Несмотря на большое количество квалиметрических моделей, применяемых при разработке «идеального» продукта, описание органолептических показателей, как правило, сводится к унификации, а оценку качества (дегустационную оценку) дают люди, хотя и подготовленные для этих целей. Вкус не подчиняется законам, существуют разные факторы, влияющие на вкусовое восприятие пищи [11]. Некоторые из них:

- генетика – интенсивность восприятия отдельных вкусовых оттенков пищи;
- традиции и/или национальные особенности приготовления пищи и ее вкусов, не всегда воспринимаемы широкой аудиторией;
- стереотипы пищевого поведения;
- сознание – индивидуальный выбор и установка одной из перечня существующих концепций питания (вегетарианство, раздельное питание и т.д.);
- мотивация – здоровое питание;
- когнитивное побуждение/восприятие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обозначенные проблемы обеспечения населения качественной пищевой продукцией и пути их решения, изложенные в доктринальных документах, требуют применения принципа «конкретизации» в более узких граничных условиях. Результаты анализа такого рода документов целесообразно обобщать, систематизировать и формулировать в виде концептуальных документов применительно к конкретной группе пищевой продукции, в данном случае – продукты питания, обогащенные дефицитными МН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витамины / В.М. Коденцова. 2-е изд., перераб. Москва: ООО «Издательство «Медицинское информационное агентство», 2023. 528 с. : ил. + вкл. 16 с.
2. Кругликова Е.В., Чанчева Е.А., Айзман Р.И. Структура питания российских студентов как фактор риска развития алиментарных заболеваний // *Actabiomedicascientifica*. 2021. Т.

6. № 5. С. 68–80.

3. Коденцова В.М. [и др.]. Характеристика обеспеченности витаминами взрослого населения Российской Федерации // *Profilakticheskaya Meditsina*. 2018. Т. 21. № 4. С. 32–37. DOI 10.17116/profmed201821432.

4. Обогащение пищевых продуктов как фактор профилактики микронутриентной недостаточности / Л.А. Маюрникова, А.А. Кокшаров, Т.В. Крапива, С.В. Новоселов // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50, № 1. С. 124–139. DOI 10.21603/2074-9414-2020-1-124-139.

5. Спиричев В.Б. Обогащение пищевых продуктов витаминами и минеральными веществами / В.Б. Спиричев, Л.Н. Шатнюк, В.М. Позняковский ; под общ. ред. Б.В. Спиричева ; Институт питания. Новосибирск : Сибирское университетское издательство, 2005. 548 с.

6. Новоселов С.В. Теоретическая инноватика: научно-инновационная деятельность и управление инновациями : учеб. пособие / С.В. Новоселов, Л.А. Маюрникова. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2017.

7. Методология разработки продуктов питания с высокой антиоксидантной активностью / Л.А. Маюрникова, Е.С. Бычкова, И.О. Ломовский [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 90–96. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.012.

8. Методология создания продуктов питания для школьников с применением инкапсулированных форм микронутриентов / Е.П. Викторова, Е.В. Лисовая, А.В. Свердличенко, Т.А. Шахрай // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2022. № 1(385). С. 44–47. DOI 10.26297/0579-3009.2022.1.9.

9. Астратова Г.В. (1999). Факторы формирования потребительского спроса на продовольственные товары. *Journal of new economy*. (2). С. 65–74.

10. Штерман С.В., Сидоренко М.Ю., Сидоренко Ю.И., Чеботарев Н.И. О современном понятии вкуса еды // Пищевая промышленность, 2020, № 8. С. 32–35.

11. Анализ рынка функционального питания: российский и международный аспект / Е.А. Молибога, Е.В. Сухостав, О.А. Козлова, А.В. Зинич // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52, № 4. С. 775–786. DOI 10.21603/2074-9414-2022-4-2405.

Информация об авторах

Л. А. Маюрникова – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и организация общественного питания» Кемеровского государственного университета.

С. В. Новоселов – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механики и Инновации» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. А. Кокшаров – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология и организация общественного питания» Кемеровского государственного университета.

Т. В. Крапива – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология и организация общественного питания» Кемеровского государственного университета.

В. О. Мешков – аспирант кафедры «Технология и организация общественного питания» Кемеровского государственного университета.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 02 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

REFERENCES

1. Kodentsova, V.M. (2023). Vitamins. Moscow: Publishing House "Medical Information Agency" LLC. (In Russ.).
2. Kruglikova, E.V. & Chanchaeva, E.A. & Aizman, R.I. (2021). The nutrition structure of Russian students as a risk factor for the development of nutritional diseases. *Acta biomedical scientifica*. (5). 68-80. (In Russ.).
3. Kodentsova, V.M. [et al.]. (2018). Characteristics of vitamin availability in the adult population of the Russian Federation. *Profilakticheskaya Meditsina*. (4). 32-37. (In Russ.). DOI 10.17116/profmed201821432.
4. Mayurnikova, L.A. & Koksharov, A.A. & Krapiva, T.V. & Novoselov, S.V. (2020). Fortification of food products as a factor of prevention of micronutrient deficiency. *Machinery and technology of food production*. (1). 124-139. (In Russ.). DOI 10.21603/2074-9414-2020-1-124-139.
5. Spirichev, V.B. & Shatnyuk, L.N. & Poznyakovsky, V.M. (2005). Fortification of food products with vitamins and minerals. Novosibirsk: Siberian University Publishing House. (In Russ.).
6. Novoselov, S.V. & Mayurnikova, L.A. (2017). Theoretical innovation: scientific and innovative activity and innovation management. St. Petersburg: GIORD. (In Russ.).
7. Mayurnikova, L.A. & Bychkova, E.S. & Lomovsky, I.O. [et al.]. (2021). Methodology for the development of food products with high antioxidant activity. *Polzunovsky Bulletin*. (4). 90-96. (In Russ.). DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.012.
8. Viktorova, E.P., Lisovaya, E.V., Sverdlichenko, A.V. & Shakhray, T.A. (2022). Methodology of creating food products for schoolchildren using encapsulated forms of micronutrients. *News of higher educational institutions. Food Technology*. (1). 44-47. (In Russ.). DOI 10.26297/0579-3009.2022.1.9.
9. Astratova, G.V. (1999). Factors of formation of consumer demand for food products. *Journal of new economy*. (2), 65-74. (In Russ.).
10. Shterman, S.V. & Sidorenko, M.Y. & Sidorenko, Y.I. & Chebotarev, N.I. (2020). About the modern concept of the taste of food. *Food industry*. (8). 32-35. (In Russ.).
11. Moliboga, E.A. & Sukhostav, E.V. & Kozlova, O.A. & Zinich, A.V. (2022). Functional nutrition market analysis: Russian and international aspects. *Machinery and technology of food production*. (4). 775-786. (In Russ.). DOI 10.21603/2074-9414-2022-4-2405.

Information about the authors

1. Mayurnikova L.A. - Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of «Technology and Organization of Public Catering», of the Kemerovo State University.

2. Novoselov S.V. - Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of «Mechanics and innovation» of the Polzunov Altai State Technical University.

3. Koksharov A.A. - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of «Technology and Organization of Public Catering», of the Kemerovo State University.

4. Krapiva T.V. - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of «Technology and Organization of Public Catering» of the Kemerovo State University.

5. Meshkov V.O. - Graduate student of the Department of «Technology and Organization of Public Catering», of the Kemerovo State University.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.38
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.002

EDN: GRBBAG

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТРУКТУРИРОВАННОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛИЗАТА КОЛЛАГЕНСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Никита Константинович Александров¹,
Дмитрий Леонидович Альшевский²

^{1,2} Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹ nikesha98@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-1624-6220>

² alshevsky@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-2998>

Аннотация. На сегодняшний день в связи с ростом объемов производства продукции аквакультуры все большую актуальность приобретает вопрос эффективного использования вторичного сырья от переработки рыб. Содержащиеся в данном сырье соединительнотканые белки, будучи извлечеными в виде гидролизата, представляют большой интерес как компонент здравого питания, поскольку находящиеся в нем коллаген и пептиды обладают физиологической значимостью. Одним из способов переработки гидролизатов является получение структурированного продукта, который может выступать добавкой в формованных рыбных изделиях, полностью заменяя собой жировое и частично мышечное сырье. Однако данная добавка обладает невзрачным цветом, что делает ее малопригодной для формирования рисунка на разрезе рыбных изделий. В рамках настоящего исследования были получены образцы структурированной добавки на основе гидролизата из голов карпа обыкновенного, цветовые свойства которых были улучшены за счет использования риса ферментированного и печени окуня. На основании органолептических, реологических и физических методов исследования определены оптимальные образцы. Данные методы предложено использовать в качестве основы комплексной оценки качества структурированных добавок.

Ключевые слова: гидролизат коллагена, структурированная добавка, белковый наполнитель, глубокая переработка, карп обыкновенный.

Для цитирования: Александров Н. К, Альшевский Д. Л. Разработка и оценка качества структурированной добавки на основе гидролизата коллагенсодержащего сырья // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 15–19. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.002. EDN: <https://elibrary.ru/GRBBAG>.

Original article

DEVELOPMENT AND QUALITY ASSESSING OF A STRUCTURED ADDITIVE BASED ON COLLAGEN-CONTAINING RAW MATERIALS HYDROLYZATE

Nikita K. Aleksandrov¹, Dmitriy L. Al'shevskiy²

^{1,2} Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ nikesha98@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-1624-6220>

² alshevsky@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-2998>

Abstract. Today, due to the growing volumes of aquaculture production, the efficient usage of secondary raw materials obtained from fish processing is becoming increasingly relevant issue. The connective tissue proteins contained in this raw material that are extracted in the form of a hydrolyzate, are of great interest as a component of a healthy diet including collagen and peptides that have physiological significance. One of the methods for processing hydrolysates is to obtain a structured product, that can be used as an additive in formed fish products, completely replacing fat and partially muscle raw materials. However, this additive has a pale color, that makes it unsuitable for creating a pattern on the fish products cut. In this study, samples of a structured additive based on the common carp heads hydrolyzate were obtained. Color characteristics of the samples were improved with coloring components use, including fermented rice and perch liver. Optimal structured additive samples were determined by organoleptic, rheological and physical methods of the research. These methods are proposed to be used as the basis for a comprehensive assessment of the structured additives quality.

Keywords: collagen hydrolyzate, structured additive, protein filler, deep processing, common carp.

For citation: Aleksandrov, N.K. & Al'shevskiy, D.L. (2025). Development and quality assessing of a structured additive based on collagen-containing raw materials hydrolyzate. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 15-19. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.002. EDN: <https://elibrary.ru/GRBBAG>.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия прослеживается тенденция роста выработки продукции аквакультуры. Так, в России за период 2010–2020 гг. объем выращенной во внутренних водоемах загонным и садковым способом рыбы вырос с 30 до 69 тыс. тонн в год [1]. В таких условиях перед отечественными рыбопромышленными предприятиями более явно встает проблема нереализованного потенциала безотходных технологий, которые позволили бы снизить расходы, связанные с утилизацией малоценного сырья.

К числу отходов продукции аквакультуры относят такие побочные продукты разделки, как костные хребты, головы, хвосты, плавники, чешуя, что являются источником белка коллагена. Извлечение коллагена из побочного рыбного сырья на пищевые цели представляет интерес за счет его биосовместимости, биоактивности, биоразлагаемости и безопасности [2]. Основным методом извлечения коллагена из побочного рыбного сырья является процесс гидролиза, при котором пептиды и протеины переходят в раствор (гидролизат). В зависимости от источника сырья и метода получения такой раствор может обладать антиоксидантным, противовоспалительным, нейропротекторным и антигипертензивным действием [3].

Исходя из вышесказанного, переработанный рыбный коллаген имеет широкий потенциал использования при разработке продуктов здорового питания [5]. Ограничивающим фактором в реализации данного потенциала является низкая способность рыбного гидролизата образовывать плотные гели даже при невысоких температурах [2]. Поэтому требуется его дальнейшая переработка путем удаления влаги (высушиванием) или ее связыванием (структурообразованием).

Для создания продуктов заданной структуры на основе гидролизата коллагена возможно внесение полисахаридов различного происхождения: растительного (целлюлоза, пектины, альгинаты), животного (хитин, хондроитин), микробиального (ксантановая камедь, глюкан) [6]. Получаемый материал может применяться для создания капсул, пищевых пленок и гранул [2, 7].

Ранее в исследованиях была отмечена перспектива получения белковой добавки для рыбных изделий на основе гидролизата голов карпа с использованием в качестве структурообразователя альгината [8]. Данная структурированная добавка обладает плотной консистенцией, способной выдержать тепловое воздействие, а потому она может использоваться в измельченном виде в составе рыбных формованных изделий в качестве полной замены жирового сырья (шпика) и частичной мышечного (фарша). Недостатком получаемой добавки является невзрачный серо-бежевый оттенок, вследствие которого она не способна сформировать рисунок на разрезе изделия. Устранить этот недостаток возможно путем внесения в состав добавки придающих окраску компонентов, например, пищевых красителей. Помимо этого, возможно применение в этом качестве получаемой

из малоценного сырья разделки субпродуктовой массы [9]. Таким образом, актуальна отработка механизма регулирования цвета структурированной добавки, включающая подбор цветокорректирующего компонента с определением оптимальной по комплексу показателей качества доли его внесения.

Целью настоящей работы является разработка и оценка качества структурированной добавки, получаемой на основе гидролизата коллагенсодержащего сырья карпа с использованием придающих окраску компонентов.

Поставлены следующие задачи исследования:

- получить образцы структурированной добавки с различным внесением придающих окраску компонентов;
- оценить влияние концентрации придающих окраску компонентов на органолептические и реологические свойства образцов, физические характеристики их цвета;
- на основании полученных данных определить оптимальные образцы структурированной добавки.

МЕТОДЫ

Объектами данного исследования являются образцы структурированной добавки, полученные с использованием гидролизата коллагенсодержащего сырья (голов карпа *Cyprinus carpio*), комплексной пищевой добавки КФ СТАБИПРО ФЭТ и придающих окраску компонентов. В качестве придающих окраску компонентов выступают рис ферментированный (порошок красного цвета, получаемый культтивированием *Monascus purpureus* на рисе) и печень рыб, полученная в ходе разделки окуня обыкновенного (*Perca fluviatilis*).

Для получения гидролизата головы карпа измельчались, соединялись с равным количеством воды. Полученная смесь нагревалась до 85 °C и обрабатывалась при данном режиме 25 минут, после чего оставала до 40 °C. Далее осуществлялось внесение ферментного препарата протеолитического действия (0,1 % к массе сырья) и термостатирование смеси при данной температуре 150 минут. Ферментную обработку проводили препаратом Энзи-Микс У (комплекс кислых протеаз, протеолитическая активность которого составляет 100 единиц на грамм, оптимум действия 40 °C и pH 4,5–6,0). После ферментации производилось разрушение (инактивирование) препарата в смеси путем нагрева до 75 °C с поддержанием температуры 15 минут. Затем смесь оставала, а жидкую часть (гидролизат) отделялась от твердого остатка [8].

Для получения образцов структурированной добавки приготовлялась однородно перемешанная основа, содержащая КФ СТАБИПРО ФЭТ (4 % массы основы), гидролизат и придающий окраску компонент. Основа выдерживалась в течение 1,5 часа при 4 °C.

За это время комплексная пищевая добавка связывает влагу, формируя однородную плотную консистенцию структурированной добавки.

В рамках исследований в зависимости от внесенного на этапе перемешивания придающего окраску компонента получены следующие группы образцов структурированной добавки: с рисом,

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТРУКТУРИРОВАННОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛИЗАТА КОЛЛАГЕНСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

ферментированным в количестве 0,2 %, 0,4 %, 0,8 % от массы основы; с печенью окуня в количестве 12 %, 24 %, 36 %; контрольный образец без окрашивающих продуктов. Качество разработанных образцов оценивалось по органолептическим, реологическим и физическим показателям.

Органолептические свойства образцов (внешний вид, консистенция, цвет, запах) оценивались по общепринятым методам исследования.

Реологические свойства образцов оценивались по прочностным свойствам в соответствии с ГОСТ 26185-84 «Водоросли морские, травы морские и продукты их переработки. Методы анализа» (п.п. 4.4.2). Результат выражен в граммах нагрузки на прорыв поверхности структурированной добавки и представлен как среднеарифметическое значение пяти параллельных измерений с не превышающим 10 % (допускаемым) отклонением.

Физическим методом настоящего исследования

Таблица 1 – Органолептическая характеристика образцов структурированной добавки

Table 1 – Organoleptic characteristic of the structured additive samples

Показатель	Структурированная добавка без внесения придающих окраску компонентов (контрольный образец)		
Внешний вид	Однородная масса		
Консистенция	Твердая, упругая		
Цвет	Серо-бежевый		
Запах	Свойственный слабовыраженный		
	Образцы структурированной добавки с внесением риса ферментированного в количестве:		
	0,2 %	0,4 %	0,8 %
Внешний вид	Однородная масса	Однородная масса	Однородная масса
Консистенция	Плотная, упругая	Плотная, упругая	Плотная, упругая
Цвет	Ярко-красный	Красный	Темно-красный
Запах	Свойственный слабовыраженный	Свойственный слабовыраженный	Свойственный слабовыраженный
	Образцы структурированной добавки с внесением печени рыб в количестве:		
	12 %	24 %	36 %
Внешний вид	Однородная масса	Однородная масса	Однородная масса
Консистенция	Плотная	Слегка упругая	Упруго-вязкая
Цвет	Серо-оранжевый	Розово-оранжевый	Красно-оранжевый
Запах	Свойственный выраженный	Выраженный рыбный запах	Выраженный рыбный запах

Исходя из представленных в таблице 1 данных видно, что с внесением придающих окраску компонентов образцы структурированной добавки приобретают новые цветовые свойства, положительно отличающиеся от контрольного образца.

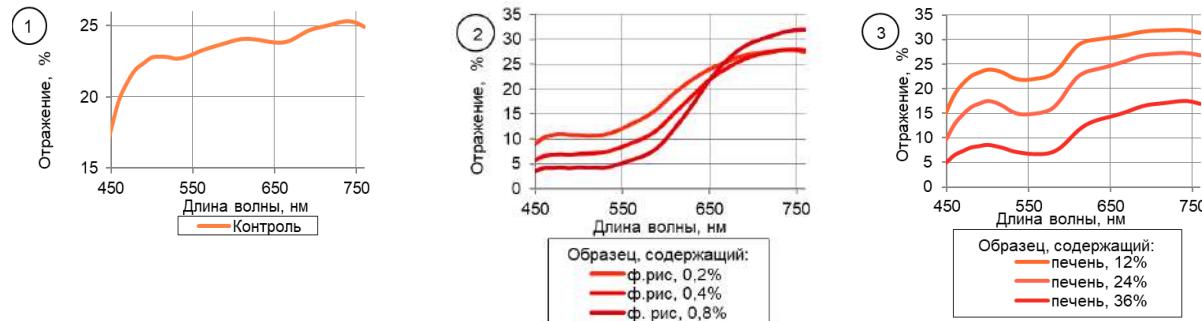


Рисунок 1 – Спектры отражения образцов структурированной добавки: 1 – контрольный образец; 2 – группа образцов с внесением ферментированного риса; 3 – группа образцов с внесением печени рыб

Figure 1 – Reflectance spectra of the structured additive samples: 1 – control sample; 2 – group of the samples with fermented rice use; 3 – group of the samples with fish liver use

На основании полученных спектров были определены цветовые координаты в системе $L^*a^*b^*$.

ния являлся анализ цвета образцов на основании спектров отражения и цветовых координат. Спектры образцов структурированной добавки измерялись в диапазоне 450–760 нм на спектрофотометре СФ-2000 с помощью приставки зеркального и диффузного отражения СФО-2000. Предел допускаемой абсолютной погрешности данного спектрофотометра равен $\pm 1\%$, допускаемое среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности измерения находится в пределах $\pm 0,2\%$. Цветовые координаты в системе $L^*a^*b^*$ рассчитывались в соответствии со стандартом Международной комиссии по освещению [10]. Полученные значения координат округлялись до второго знака.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Органолептическая характеристика образцов структурированной добавки представлена в таблице 1.

Для численного описания характеристик цвета и изучения глубины его изменения измерены спектры отражения поверхности образцов. Полученные спектры представлены на рисунке 1.

Цветовые координаты образцов структурированной добавки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Цветовые координаты поверхности образцов структурированной добавки
Table 2 – Color coordinates of the structured additive samples surface

Образец	Примерное цифровое представление по RGB	Цветовые координаты		
		<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *
Контроль		68,38	48,56	60,92
С внесением риса ферментированного в количестве:	0,2 %	65,25	80,40	68,80
	0,4 %	64,05	92,14	73,76
	0,8 %	62,27	107,55	79,58
С внесением печени рыб в количестве:	12 %	67,24	59,98	62,60
	24 %	65,80	62,87	49,62
	36 %	64,75	73,45	51,10

Таким образом, образцы добавок с использованием ферментированного риса по мере увеличения его концентрации становятся более красными. Это подтверждается соответствующим повышением значений цветовых координат *a** и *b**, говорящим о более глубоком смещении спектра в красный цвет. Из рисунка 1.2 это можно увидеть по относительному росту отражательной способности красной области спектра (начиная с 650 нм).

С органолептической точки зрения использование 0,2 % ферментированного риса характеризуется визуально слабым цветообразованием (яркий оттенок); внесение 0,4 % образует в меру интенсивную окраску, имитирующую натуральный «мясной» цвет; при внесении 0,8 % формируется излишне выраженный и неестественный темный цвет.

Образцы добавок, в которые вносились печень окуня, с увеличением ее массовой доли приобретали более интенсивный красно-оранжевый цвет. Это видно по тому, как растут значения координат *a** и уменьшаются *b**, что говорит о переходе от оранжево-коричневых оттенков в сторону розово-оранжевых (коралловых). На рисунке 1, 3

это видно по сохранению характерных пиковых значений на противоположных цветовых волнах (зеленой при 500 нм и красной при 720 нм), при смешивании дающих искомые цветовые координаты. Данные пики формируются за счет пигментов печени, флюоресцирующие свойств которых с повышением концентрации снижают степень отражения образцов во всей области видимого света.

Помимо этого, благодаря печени рыб образцы приобретают более выраженный приятный рыбный запах. Однако вместе с этим консистенция образцов становится мягче, повышается деформируемость образцов вследствие снижения массовой доли гидролизата, что приводит к снижению водосвязывающих свойств.

Исходя из этого, для оценки пригодности образцов структурированной добавки к использованию в пищевых продуктах помимо органолептической характеристики консистенции требуется реологическая оценка данного показателя. Для этого были измерены прочностные свойства образцов структурированной добавки. Прочностные свойства образцов представлены на рисунке 2.

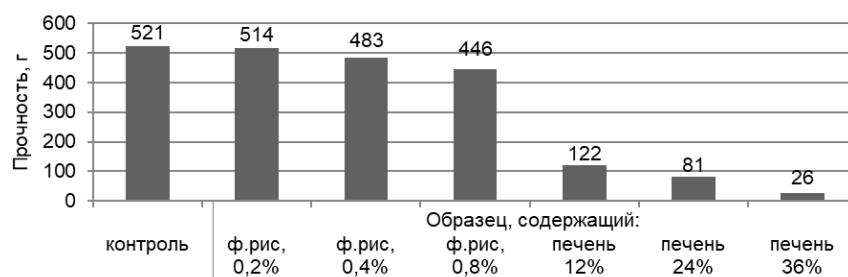


Рисунок 2 – Прочность образцов структурированной добавки

Figure 2 – Strength of the structured additive samples

На основании данных с рисунка 2 ясно, что использование придающих окраску компонентов уменьшает прочность относительно контрольного образца. Так, снижение прочности в образцах с ферментированным рисом при его внесении в количестве 0,2 % происходит на 1,3; % при 0,4 % риса – на 7,3 %; при 0,8 % – на 14,4 %. Данное снижение является приемлемым и не накладывает ограничений на использование добавки. В то же время образцы с печенью существенно менее прочные, чем контрольный – внесение 12 % печени понижает показатель на 76,6 %; 24 % печени – на 84,5 %; 36 % – на 95 %. Данный фактор делает их малоприменимыми для использования в копченых и сырокопченых рыбных формованных изделиях, требующих добавок с высокими реологиче-

скими свойствами. Тем не менее, применение образцов с содержанием печени до 24 % все еще возможно в прочих формованных изделиях (фаршевых, запеченных, вареных).

Исходя из полученных данных об органолептических и реологических свойствах образцов структурированной добавки, оптимальными являются образцы с внесением 0,4 % риса ферментированного и с 24 % печени окуня.

Таким образом, в результате исследования рассмотрены органолептические свойства образцов структурированной добавки, в которых с помощью использования придающих окраску компонентов возможно регулировать цветовые свойства. Физическими и реологическими методами

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТРУКТУРИРОВАННОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛИЗАТА КОЛЛАГЕНСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

получено числовое выражение показателей цвета и консистенции в виде цветовых координат и прочности, что позволяет более эффективно отслеживать качество структурированной добавки путем сравнения со значениями оптимальных образцов. Данные добавки можно использовать для формирования рисунка на разрезе формованных изделий, что расширяет ассортимент рыбных продуктов, в том числе здорового питания. Разработанные структурированные добавки могут выступать в качестве замены сырья с насыщенными жирами (шпика); в них содержатся ценные пептиды и аминокислоты, а при использовании печени рыб дополнительно витамины и омега-3 жирные кислоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы получены образцы структурированной добавки на основе гидролизата рыбного коллагена с внесением придающих окраску компонентов – риса ферментированного и печени рыб. Предложен комплекс оценки показателей качества этих добавок, включающий органолептические, реологические и физические методы.

По результатам комплексной оценки качества изучена динамика изменения показателей качества в зависимости от концентрации придающих окраску компонентов. Определены образцы с оптимальным их количеством, а именно: с внесением 0,4 % ферментированного риса; с использованием печени рыб в количестве 24 %. Полученные добавки предлагаются использовать в технологии формованных рыбных изделий в качестве частичной замены основного и жирового сырья для формирования рисунка на разрезе характерного цвета.

На основании исследованных в настоящей работе сенсорных, прочностных и спектральных характеристик образцов в дальнейшем возможна разработка экспресс-методов определения концентрации придающего окраску компонента в составе структурированной добавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. The State of World Fisheries and Aqua-culture 2022. Towards Blue Transformation. Rome: FAO. 2022. doi: 10.4060/cc0461en.
2. Rajabimashhadi Z., Gallo N., Salvatore L. & Lionetto F. (2023). Collagen Derived from Fish Industry Waste: Progresses and Challenges. *Polymers*, (15(544)). doi: 10.3390/polym15030544.
3. Espinale C., Romero-Pena M., Calderon G., Veragua K., Caceres P.J. & Castillo P. (2023). Collagen, protein hydrolysates and chitin from by-products of fish and shellfish: An overview. *Helijon*, (9). doi: 10.1016/j.helijon.2023.e14937.
4. Sivaraman K. & Shanthi C. (2021). Role of fish collagen hydrolysate in attenuating inflammation - an in vitro study. *J Food Biochemistry*, (9). doi: 10.1111/jfbc.13876.
5. Gaikwad S. & Kim M.J. (2024). Fish By-Product Collagen Extraction Using Different Methods and Their Application. *Mar. Drugs*, (22). doi: 10.3390/md22020060.
6. Lu Y., Luo Q., Chu Y., Tao N., Deng S., Wang L. & Li L. (2022). Application of Gelatin in Food Packaging: A Review. *Polymers*, (14). doi: 10.3390/polym14030436.
7. Belousova O.S., Dyshlyuk L.S., Avstrevskikh A.N., Shchetinin M.P. (2014). Investigation of thermodynamic and rheological properties of natural polymers fit for pharmaceutical capsules production. *Food Processing: Techniques and Technology*, (4), 13-19 (In Russ.).
8. Aleksandrov N.K. & Al'shevskiy D.L. Scientific substantiation of technological parameters and recipe of protein filler from collagen-containing carp processing wastes. *KSTU news*, (71), 73-83 (In Russ.). doi: 10.46845/1997-3071-2023-71-73-83.
9. Gerasimov A.V., Bazhenova B.A., Burkhanova A.G. & Zabalueva Yu.Yu. (2019). Method for production of meat granules for semi-smoked sausages. Pat. 2783534. Russian Federation, published on 18.07.2019. Bull. No. 20. (In Russ.).
10. The Basis of Physical Photometry, 3rd Edition. (2019). CIE 018:2019 from 2019. Vienna: International Commission on Illumination. doi: 10.25039/TR.018.2019.

Информация об авторах

Н. К. Александров – аспирант кафедры технологии продуктов питания Калининградского государственного технического университета.

Д. Л. Альшевский – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов питания Калининградского государственного технического университета.

Information about the authors

N. K. Aleksandrov - post-graduate student of the Department of Food Technology of the Kaliningrad State Technical University.

D. L. Al'shevskiy - candidate of technical sciences, associate professor of the department of food technology of the Kaliningrad State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 20 июня 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 20 June 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



КОЛЛАГЕН КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК БЕЛКА В РЕЦЕПТУРЕ НАПИТКА ДЛЯ ЗДОРОВОГО ПИТАНИЯ

**Мария Владимировна Горбачева¹, Инесса Александровна Зачесова²,
Наталья Николаевна Шагаева³, Святослав Ярославович Ляхомский⁴**

^{1, 2, 3, 4} ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина», Москва, Россия

¹ gmv76@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3654-4440>

² inessa_zachesova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2743-0305>

³ nata-shag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1271-4030>

⁴ sportsmen@gmail.com

Аннотация. Рынок обогащенных напитков имеет хорошие устойчивые показатели в развитии спроса на долгосрочную перспективу. При этом отмечен переход от «универсальных» напитков к узкоспециализированным, что продиктовано возрастающим интересом потребителей к здоровому образу жизни и профилактике заболеваний. Настоящие исследования посвящены разработке рецептуры и обоснованию компонентного состава обогащенного напитка на основе творожной сыворотки с добавлением гидролизата белка коллагена. Аргументировано, что напиток обладает сочетанием полезных свойств, благодаря синергетическому действию компонентов творожной сыворотки, коллагена и дополнительно введенных в состав ингредиентов, таких как сок сельдерея, яблочное пюре и витаминно-минеральный премикс. Отмечено, что с повышением количества яблочного пюре улучшались такие органолептические показатели напитка, как запах, интенсивность аромата, вкусовые нотки, сывороточный тон. Наиболее предпочтительным в рецептуре признано соотношение яблочного пюре и сока сельдерея 2:1 соответственно. Использование в рецептуре гидролизата коллагена не снижает органолептических показателей продукта, а добавление его в количестве 2,5г/100г удовлетворяет потребность организма в белке не менее чем в 33,86 % от суточной нормы. Проведенные исследования доказывают возможность и преимущества использования гидролизата коллагена как обогатителя в рецептурах напитка. Принимая во внимание низкую энергетическую ценность (66,7/280,2 ккал/кДж на 100г) при необходимом содержании белка (5,13±0,10 %), макро-и микроэлементов, а также отсутствие в составе сахара, напиток можно рекомендовать для широкого круга потребителей, и, в частности, для людей, ведущих активный образ жизни и, соблюдающих низкокалорийную диету.

Ключевые слова: коллаген, высокобелковые напитки, молочная сыворотка, функциональное питание.

Для цитирования: Горбачева М. В., Зачесова И. А., Шагаева Н. Н., Ляхомский С. Я. Коллаген как дополнительный источник белка в рецептуре напитка для здорового питания // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 20–26. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.003. EDN: <https://elibrary.ru/FGXPWP>.

Original article

COLLAGEN AS AN ADDITIONAL SOURCE OF PROTEIN IN FORMULATION OF A DRINK FOR A HEALTHY DIET

**Maria V. Gorbacheva¹, Inessa A. Zachesova², Natalia N. Shagaeva³,
Svyatoslav Ya. Lyakhomsky⁴**

^{1, 2, 3, 4} Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology - MVA named after K.I. Skryabin», Moscow, Russia

¹ gmv76@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3654-4440>

² inessa_zachesova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2743-0305>

³ nata-shag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1271-4030>

⁴ sportsmen@gmail.com

Abstract. The fortified drinks market has good stable indicators in the development of demand in the long term. At the same time, the transition from "universal" drinks to highly specialized ones was noted, which is dictated by the increasing interest of consumers in a healthy lifestyle and disease prevention. The present research is devoted to the development of a formulation and substantiation of the component composition of an enriched drink based on curd whey

КОЛЛАГЕН КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК БЕЛКА В РЕЦЕПТУРЕ НАПИТКА ДЛЯ ЗДОРОВОГО ПИТАНИЯ

with the addition of collagen protein hydrolysate. It is argued that the drink has a combination of beneficial properties due to the synergistic action of the components of curd whey, collagen and additional ingredients introduced into the composition, such as celery juice, applesauce and vitamin and mineral premix. It was noted that with an increase in the amount of applesauce, such organoleptic characteristics of the drink as odor, aroma intensity, flavor notes, and serum tone improved. The ratio of applesauce and celery juice 2:1, respectively, is recognized as the most preferable in the formulation. The use of collagen in the formulation does not reduce the organoleptic characteristics of the product, and its addition in an amount of 2,5 g / 100g satisfies the body's protein requirement of at least 33,86 % of the daily value. The conducted research proves the possibility and advantages of using collagen as an enriching agent in beverage formulations. Taking into account the low energy value (66,7/280,2 kcal/ kJ per 100g) with the required protein content (5,13±0.10 %), macro- and microelements, as well as the absence of sugar and syrup in the composition, the drink can be recommended for a wide range of consumers, and in particular for people leading an active lifestyle and who follow a low-calorie diet.

Keywords: collagen, high-protein drinks, whey, functional nutrition.

For citation: Gorbacheva, M.V., Zachesova, I.A., Shagaeva, N.N. & Lyakhomsky, S.Ya. (2025). Collagen as an additional source of protein in formulation of a drink for healthy nutrition. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 20-26. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.003. EDN: <https://elibrary.ru/FGXPWP>.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы рынок напитков с добавленной ценностью показывает стабильный рост, что связано с растущим интересом потребителей к здоровому образу жизни и профилактике заболеваний [1]. При этом важной тенденцией является таргетирование на определенные группы потребителей. Так, наблюдается переход от универсальных напитков к специализированным, привычным решать конкретные задачи. Производители предлагают уникальные продукты для различных категорий клиентов: для женщин – с фокусом на красоту и молодость; для мужчин – для повышения энергии и выносливости; а также находят спрос отдельные линейки для детей и пожилых людей [2]. Особым вниманием пользуются напитки с пробиотиками и пребиотиками, с витаминами и растительными экстрактами, улучшающие пищеварение, нормализующие сон и нервную систему. Спрос на натуральные напитки растет, поскольку потребители чаще выбирают продукты с простым и безопасным составом без добавления синтетических добавок. Использование молочной сыворотки в пищевой промышленности обусловлено ее высокими биологическими характеристиками и многофункциональностью, что благоприятно сказывается на производстве обогащенных продуктов питания и напитков [3, 4].

Анализ научно-технической и патентной информации в области разработки рецептур функциональных и специализированных напитков показал, что в качестве одного из часто используемых компонентов выступает коллаген.

Коллаген представляет собой высокомолекулярное соединение в природе. Являясь ключевым структурным элементом всех типов соединительной ткани, коллаген существенно влияет на основополагающие физиологические функции, такие как механическая поддержка, питание, защита и пластичность.

Поскольку коллаген может выступать в формах золей, гелей и волокнообразных структур, его удобно использовать для создания различных биоматериалов. Важно отметить, что этот биополимер безопасен, обладает низкой антигенностью, а также хорошими гидратирующими и регенерирующими

свойствами, способностью к образованию комплексов с активными веществами и полностью усваивается организмом. Благодаря множеству функциональных групп на своей поверхности коллаген может служить матрицей для иммобилизации различных биосубстанций и препаратов [5, 6].

Исследования отечественных ученых привели к созданию новых рецептов лечебных и функциональных молочных напитков с добавлением фруктов и овощей, что позволило улучшить их текстуру и органолептические качества [7, 8]. Учитывая растущий спрос на фортифицированные продукты питания, разработка напитка с добавлением коллагена и витаминов представляется актуальной и своевременной.

Цель исследования – разработать рецептуру и обосновать компонентный состав обогащенного напитка на основе творожной сыворотки с добавлением гидролизата белка коллагена.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования были выбраны: сухая творожная сыворотка (производитель ООО «АРМАДА ПЛЮС», Москва, РФ); яблочное пюре, сок сельдерея, полученные по базовой технологии; коллаген «Veganova» – натуральный гидролизированный говяжий без добавления ароматизаторов, красителей и искусственных добавок; витаминный премикс, производитель (UTSGroup, РФ, Москва); консервант «Натамикс», (производитель МКС групп, РФ, Тольятти). Яблочное пюре готовили из свежих яблок помологического сорта «Ренет-Симиренко», которые отвечали характеристикам и нормам для первого товарного сорта по ГОСТ 27572-2017. Для изготовления сока сельдерея использовали свежий корневой сельдерей, качество которого соответствовало ГОСТ 34320-2017. Для проведения исследований были приготовлены опытные варианты рецептуры обогащенного напитка на основе творожной сыворотки с добавлением гидролизата белка коллагена при следующем соотношении компонентов, указанном на рисунке 1. Контролем служила рецептура напитка без добавления коллагена.

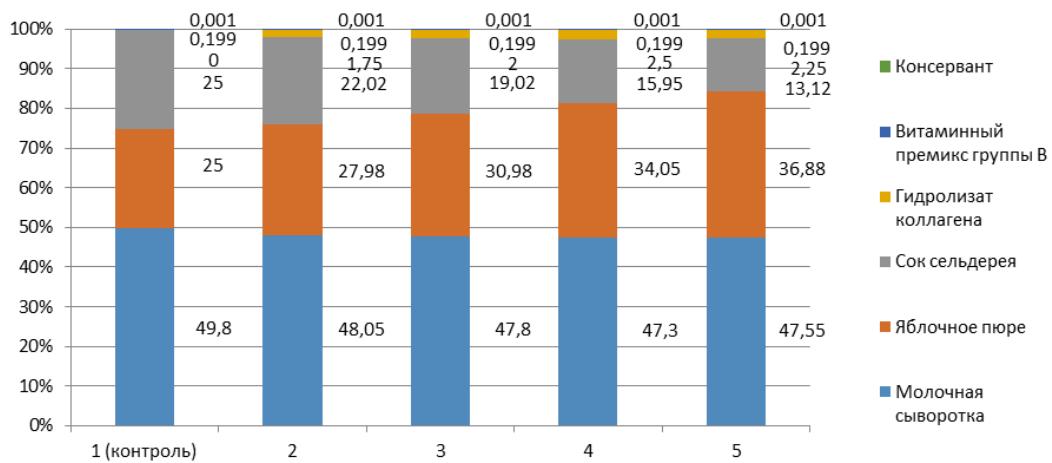


Рисунок 1 – Характеристика опытных вариантов рецептуры напитка на основе молочной сыворотки (без учёта потерь)

Figure 1 – Characteristics of experimental versions of the formulation of a drink based on whey (excluding losses)

Процесс создания обогащенного напитка включал несколько ключевых этапов: подготовку исходных материалов, формирование белково-углеводной базы, термическую обработку, охлаждение основы, добавление и смешивание ингредиентов, фильтрацию, окончательное охлаждение готового продукта и его упаковку (рис. 2).

Органолептическую оценку сырьевых компонентов и напитка проводили по ГОСТ 29245-91, ГОСТ 56833-2015, ГОСТ 32770-2014, ГОСТ 8756.1-2017, ГОСТ 32100-2013, ГОСТ Р 56303-2014. Массовую долю белка в сыворотке, гидролизате белка и опытных образцах напитка определяли методом Кельдяля по ГОСТ 23327-98, ГОСТ Р 56303-2014 и ГОСТ 34454-2018. Массовую долю жира в творожной сыворотке устанавливали кислотным методом по ГОСТ 56833-2015. Для определения углеводов в молочной сыворотке использовали метод Бертрана, основанный на способности углеводов восстанавливать фенилидендиамин до розового окрашивания. Массовую долю влаги и сухих веществ в сыворотке – по ГОСТ 56833-2015. Определение массовой доли жира в приготовленных образцах напитка осуществляли рефрактометрическим методом по ГОСТ 5867-90. Сухие вещества в напитке определяли согласно ГОСТ 33957-2016. Массовую долю золы – по ГОСТ 56833-2015. Метод основан на измерении показателя преломления, меняющегося в зависимости от массовой доли сухих веществ в анализируемой продукции в диапазоне значений от 5,0 % до 15,0 %, при помощи рефрактометра, фиксирующего преломление луча света в момент перехода из одной среды в другую (одна среда – стеклянная призма, другая – продукция).

Качественный и количественный анализ отдельных сахаров проводили методом жидкостной хроматографии высокого разрешения (хроматограф жидкостной Prominence LC-20, рефрактометрический детектор RID-20AL2010547961, L214654020) по ГОСТ Р 54760-2011. Для определения моно- и олигосахаридов использовали их восстанавливающую способность. Сначала их извлекали из продукта 80 %-м этиловым спиртом.

Осадок отфильтровывали, а в фильтрате устанавливали восстанавливающие (редуцирующие) сахара с использованием гесацианоферрата (III) калия, фелинговой жидкости. Для определения сахарозы (совместно с редуцирующими сахарами) ее предварительно подвергали гидролизу. При повышении температуры происходит частичное ферментативное расщепление дисахаридов, полисахаридов, а также фосфорных эфиров сахаров.

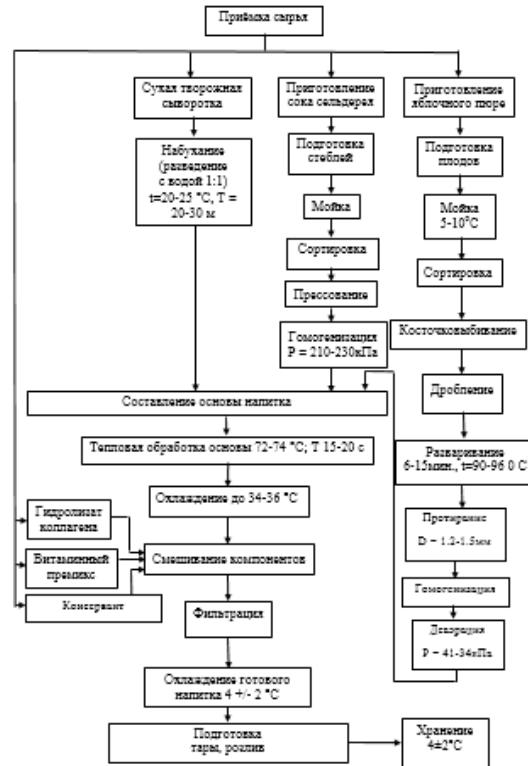


Рисунок 2 – Технологическая схема производства обогащенного напитка

Figure 2 – Technological scheme for the production of an enriched beverage

КОЛЛАГЕН КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК БЕЛКА В РЕЦЕПТУРЕ НАПИТКА ДЛЯ ЗДОРОВОГО ПИТАНИЯ

Эксперимент выполнен в трехкратной повторности. Погрешность измерений оценивали по нормальному закону распределения ошибок (закону Гаусса) определением среднеквадратичного отклонения усредненного результата от истинного значения. В работе использованы общепринятые и стандартные методы, удовлетворяющие цели и задачам исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обогащённые напитки представляют собой сложные системы, качество которых в значительной степени зависит от свойств сырья, а также от изменений, происходящих с его составом и структурой в процессе технологической обработки и последующего хранения. Соответственно, важной частью исследования стало изучение органолептических и физико-химических характеристик выбранных сырьевых ингредиентов (рис. 3).

Установлено, что по органолептическим показателям сырьевые компоненты, используемые для приготовления напитка, соответствовали нормам.

Определено высокое содержание белка ($93,0 \pm 0,3$ %) в сухом веществе исследуемого гид-

ролизата коллагена. Введение его в состав разрабатываемого напитка будет способствовать повышению биологической ценности продукта за счет таких важнейших для организма аминокислот, как пролин, глицин, оксипролин, участвующих в синтезе собственного коллагена. Дополнительным технологическим преимуществом является то, что коллагеновые гидролизаты характеризуются более простой пептидной структурой, хорошей растворимостью и способностью связывать ионы кальция, благодаря чему улучшается их усвоение организмом. Эти свойства позволяют широко использовать природный биополимер коллаген в пищевых технологиях и, в частности, фортифицированных напитках [9, 10].

Важно отметить, что при разведении гидролизата коллагена в рекомендованных дозах не было зафиксировано значительных изменений во вкусе и аромате напитка.

В ходе визуального анализа также было установлено, что консистенция яблочного пюре однородная, без комков и крупинок, его можно легко намазывать на тосты, не опасаясь стекания продукта.

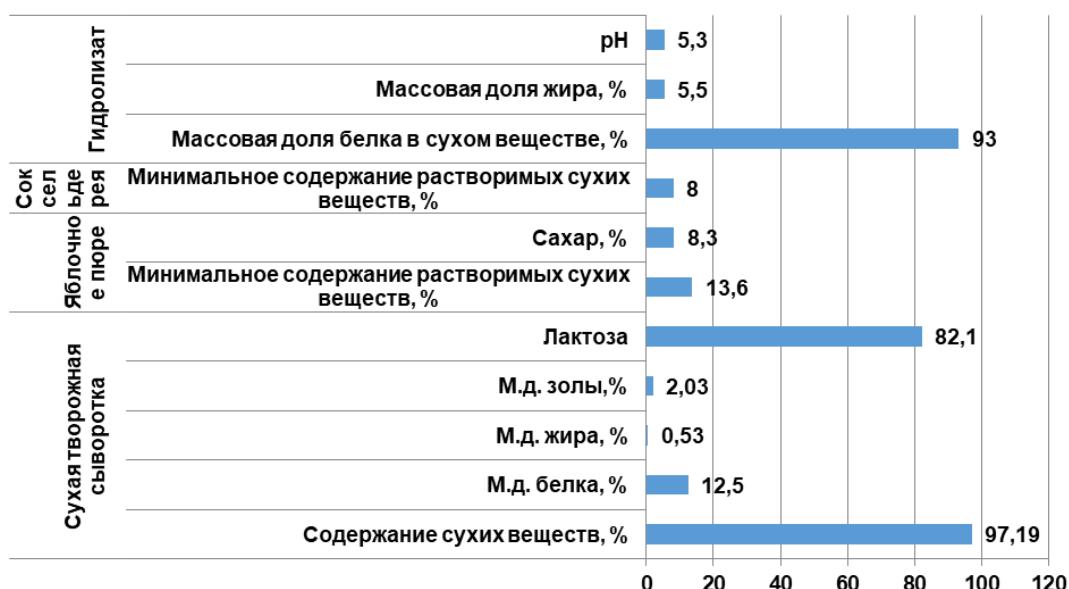


Рисунок 3 – Физико-химические показатели сырьевых компонентов

Figure 3 – Physico-chemical parameters of raw materials

Вкусовые характеристики пюре можно охарактеризовать как кисло-сладкие. Содержание сухих растворимых веществ в пюре определено на уровне 13,6 %. Этот показатель является важным с технологической точки зрения. Так органические кислоты, пектин, сахара, макроэлементы и прочие компоненты обеспечивают не только высокую пищевую ценность создаваемого напитка, но и улучшают его вкусовые и ароматические качества. В составе сухого остатка пюре доминирующими элементами оказались сахара, общее количество которых в среднем составило 8,3 % (рис. 3).

Сельдерей, выбранный как еще один компонент напитка, относится к категории низкокалорийных овощей. Массовая доля сухих растворимых

веществ в соке сельдерея равна $8,0 \pm 0,1$ % (рис. 3). Общеизвестно, что сок сельдерея – ценный источник множества полезных микроэлементов и аминокислот, благотворно влияющих на иммунную систему и способствующих предотвращению различных заболеваний. В 100 граммах свежего продукта содержится всего 14 ккал, в нем практически отсутствуют жиры (0,17 %) и белки (0,69 %), а также отмечено низкое содержание углеводов (2,97 %). При этом сок сельдерея богат витаминами группы В, С, Е и К [11].

Что касается основного ингредиента разрабатываемого напитка – творожной сыворотки, то на долю лактозы в ее составе приходится 84,5 % (рис. 3). Массовая доля белка и золы в сухих ве-

ществах сыворотки составили соответственно $12,53 \pm 0,22\%$ и $2,03 \pm 0,04\%$, что позволяет её отнести к 70 % степени деминерализации в соответствии с требованиями ГОСТ 56833-2015. Как и следовало ожидать, массовая доля жира в образцах не превышала 0,5 %.

Таким образом, комбинация творожной сыворотки, яблочного пюре, гидролизата коллагена и сока сельдерея демонстрирует высокую степень совместимости. Купаж этих ингредиентов обеспечит поступление разнообразных ценных питательных веществ, а также микро- и макроэлементов. Можно предположить, что разрабатываемый напиток будет обладать особым набором полезных характеристик, который станет возможным благодаря синергетическому взаимодействию сыворотки, коллагена и добавленных компонентов, таких как сока сельдерея, яблочного пюре и витаминно-минерального комплекса.

Для подтверждения выдвигаемой гипотезы проводили дегустационную оценку приготовленных образцов напитка (рис. 4). Для этого была выбрана 5-балльная оценка и разработана шкала оценивания. О качестве полученных экспериментальных образцов судили по сумме баллов по всем показателям. Образец, получивший 4,5–5,0 баллов, соответствовал оценке отлично, 4,0–4,4 – хорошо, 3,0–3,9 – удовлетворительно. В состав комиссии вошли 5 экспертов.

Согласно полученным данным, исследуемые образцы характеризовались относительно высокими органолептическими показателями качества. Лучшие показатели вкусо-ароматических свойств расположены в верхней части профилограммы. Наиболее высокие баллы набрали образцы 5 и 4 (4,7 и 4,6 соответственно). Наименьший балл установлен для образца 1 (контроль) – 3,8. Цвет напитка варьировал от кремового до светлокоричневого (рис. 4).

Следует отметить, что увеличение доли яблочного пюре способствовало улучшению таких органолептических характеристик напитка, как

аромат, его насыщенность, вкусовые оттенки и сывороточный тон. Тем не менее, при использовании максимальной дозы пюре продукт становился более густым и вязким, а также образовывал увеличенный осадок в виде волокон.

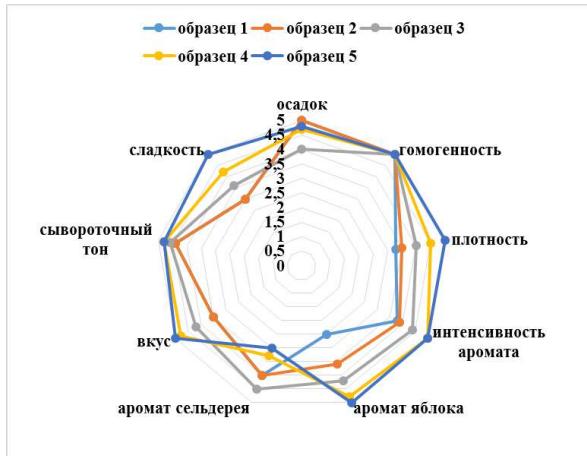


Рисунок 4 – Профилограмма органолептических показателей качества образцов напитка

Figure 4 – Profilogram of organoleptic quality indicators of beverage samples

Полученные результаты показали, что изменения во вкусовых и ароматических качествах, а также консистенции напитка в значительной степени зависели от количества добавленного яблочного пюре. Оптимальным соотношением яблочного пюре и сока сельдерея в рецептуре было признано 2:1. Важно отметить, что введение гидролизата коллагена в состав не оказалось негативного влияния на органолептические свойства продукта.

Для установления эффективности разработанной рецептуры продукта проводили ряд исследований физико-химических свойств опытных образцов (табл. 1).

Таблица 1 – Физико-химические показатели обогащенного напитка

Table 1 – Physico-chemical parameters of the enriched beverage

Наименование показателя	Образец 1 (контроль)	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
Массовая доля сухих веществ, в т.ч., %:					
белок	$14,83 \pm 0,1$	$15,40 \pm 0,1$	$15,90 \pm 0,1$	$16,90 \pm 0,1$	$16,50 \pm 0,1$
жир	$3,45 \pm 0,10$	$3,81 \pm 0,10$	$4,17 \pm 0,10$	$5,13 \pm 0,10$	$4,36 \pm 0,10$
углеводы, в т.ч. моно и дисахариды, в т.ч.:	$<0,5$				
фруктоза	$9,9 \pm 0,2$	$10,1 \pm 0,2$	$10,2 \pm 0,2$	$10,3 \pm 0,2$	$10,8 \pm 0,2$
глюкоза	$1,5 \pm 0,01$	$1,7 \pm 0,02$	$1,9 \pm 0,02$	$2,2 \pm 0,03$	$2,8 \pm 0,03$
сахароза	$0,4 \pm 0,01$	$0,4 \pm 0,01$	$0,4 \pm 0,01$	$0,6 \pm 0,01$	$0,5 \pm 0,01$
зола	$0,3 \pm 0,01$	$0,3 \pm 0,01$	$0,4 \pm 0,01$	$0,4 \pm 0,01$	$0,4 \pm 0,01$
Массовая доля влаги, %	$1,45 \pm 0,04$	$1,45 \pm 0,04$	$1,45 \pm 0,04$	$1,41 \pm 0,04$	$1,46 \pm 0,04$
Энергетическая ценность, ккал/ кДж на 100г	$85,1 \pm 0,5$	$84,6 \pm 0,5$	$84,1 \pm 0,5$	$83,1 \pm 0,5$	$83,5 \pm 0,5$
	$57,9/252,6$	$60,1/253$	$62,4/262$	$66,7/280,2$	$65,1/273,6$

КОЛЛАГЕН КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК БЕЛКА В РЕЦЕПТУРЕ НАПИТКА ДЛЯ ЗДОРОВОГО ПИТАНИЯ

Установлено, что с повышением вносимой дозы яблочного пюре и коллагена увеличивается массовая доля сухих веществ в напитке. Более высокий процент их определен в образце 4 ($16,90 \pm 0,1\%$), в который добавлено максимально заданное количество гидролизата белка коллагена 2,5 г/100г по сравнению с 5 вариантом (рис. 1). Это обусловило также большее содержание белка (5,13 %) в напитке, выработанном по рецептуре 4 варианта.

Выбранный сырьевой состав для получения обогащенного напитка обеспечил низкий процент жировых веществ – менее 0,5 %. Достоверной разницы между средними значениями массовой доли золы обнаружено не было, в среднем она составила 1,44 %.

Выявлена тенденция к увеличению общего количества углеводов в зависимости от концентрации яблочного пюре, так наименьшие значения данного показателя зафиксированы в контроле ($9,9 \pm 0,2\%$), а наибольшие – в образце 5 ($10,8 \pm 0,2\%$).

При разработке состава продукта было учтено, что яблочное пюре, являющееся источником натуральных сахаров, придаст напитку нужную сладость, а добавленный премикс дополнительно

насытит его витаминами. Особо следует отметить, что в яблочных соках соотношение фруктозы и глюкозы составляет 4:1, что является существенным преимуществом, так как фруктоза в 1,5 раза слаще сахарозы и в три раза слаще глюкозы, не вызывая резкой инсулиновой реакции. Этот факт открывает возможность использовать фруктозу в качестве заменителя сахара, что рекомендуется в низкокалорийных диетах и для людей с диабетом.

Зафиксировано, что количество сахарозы и глюкозы во всех анализируемых образцах минимально (табл. 1). Наблюдаемая тенденция в отношении массовой доли фруктозы подтверждает, что ее количество зависит от дозы добавленного пюре в напиток. Важно также подчеркнуть, что все образцы не содержали добавленного сахара.

Расчеты энергетической ценности опытных образцов обогащенного напитка подтвердили, что более высокие значения имели образцы 4 (66,7 ккал/100г) и 5 (65,1 ккал/100г).

На основании проведенных органолептических и физико-химических исследований была составлена окончательная рецептура обогащенного напитка, представленная в таблице 2.

Таблица 2 – Рецептура обогащенного напитка на основе творожной сыворотки с добавлением гидролизата коллагена, кг/100кг

Table 2 – Formulation of an enriched drink based on curd whey with the addition of collagen hydrolysate, kg / 100 kg

Наименование ингредиента	Содержание
Творожная сыворотка	47,30
Яблочное пюре	34,05
Сок сельдерея	15,95
Гидролизат коллагена	2,50
Витаминный премикс группы В	0,199
Консервант	0,001

Для обоснования полезности разработанного обогащенного напитка определяли количество белка в одной порции предлагаемого продукта, равной 0,33 л. В ходе произведенных расчетов установлено, что образец 4 удовлетворяет потребность организма в белке не менее, чем на 33,86 % от суточной нормы, что позволяет его считать обогащенным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования доказывают возможность и преимущества использования коллагена как обогатителя в рецептуре напитка. Принимая во внимание низкую энергетическую ценность при необходимом содержании белка, макро- и микроэлементов, а также отсутствие в составе сахара, напиток можно рекомендовать для широкого круга потребителей и особенно – для людей, ведущих активный образ жизни и соблюдающих низкокалорийную диету.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Функциональные напитки. Основные мировые тренды 2023 года. URL: <https://www.agroinvestor.ru/column/artur-khasanov/39389-funktionalnye-napitki-osnovnye-mirovye-trendy-2023-goda/> (дата обращения: 07.07.2024).
2. Радионова А.В. Анализ состояния и перспектив развития российского рынка функциональных напитков //
3. Витушкина М.А. Использование молочной сыворотки в пищевой промышленности // Вестник науки. 2021. №1 (34). Т 5. С. 127–132.
4. Бодрякова Н.П., Едомина Д.Й., Белевцова Д.В. Перспективы использования вторичного молочного сырья в пищевых технологиях // Актуальные проблемы ветеринарной медицины, зоотехнии, биотехнологии и экспертизы сырья и продуктов животного происхождения : Сборник трудов 2-й научно-практической конференции, Москва, 23 июня 2023 года / Под общей редакцией С.В. Позябина, Л.А. Гнездиловой. М. : Сельскохозяйственные технологии, 2023. С. 494–495.
5. Сапожникова А.И., Горбачева М.В., Гордиенко И.М. Товары нового поколения на основе продуктов рециклирования отходов животного происхождения // Товароведение, технология и экспертиза: инновационные решения и перспективы развития : Материалы национальной научно-практической конференции, Москва, 28 октября 2020 года. М. : ЗооВетКнига, 2020. С. 11–16.
6. Богданова С.А., Сысоева М.А., Шигабиева Ю.А. Физико-химические свойства гидролизатов коллагена и их применение в создании лечебно-косметических композиций // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165. кн. 3. С. 345–356.
7. Неповинных Н.В. Теоретическое обоснование и практические аспекты использования пищевых волокон в технологиях молокосодержащих продуктов диетического профилактического питания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.15. Краснодар, 2016. 48 с.

8. Антипова Л.В., Сторублевцев С.А., Гетманова А.А. Коллагенсодержащие напитки для функционального питания // Вестник ВГУИТ. 2018. № 3 (80). С. 97–103.

9. In vitro assessment of the multifunctional bioactive potential of Alaska pollock skin collagen following simulated gastrointestinal digestion / Guo L., Harnedy P.A., Zhang L. and others // Food Agric. 2015, 95, 1514–1520.

10. Pal G.K., Suresh P.V. Sustainable valorization of seafood by-products: recovery of collagen and development of collagen-based novel functional food ingredients // Food Sci. Emerg. Technol. 2016, 37, 201–215.

11. Елисеева Т., Ткачева Н. Сок сельдерея – природный эликсир энергии и здоровья // Журнал здорового питания и диетологии. 2023. № 2. Т. 24 Режим доступа. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sok-seldereya-prirodnyy-eliksir-energii-i-zdorovya> (дата обращения: 07.07.2024).

Информация об авторах

М. В. Горбачева – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии и управления качеством продукции АПК им С.А. Каспарьянца» ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К.И. Скрябина.

И. А. Зачесова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и управления качеством продукции АПК им С.А. Каспарьянца» ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К.И. Скрябина.

Н. Н. Шагаева – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технологии и управления качеством продукции АПК им С.А. Каспарьянца» ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К.И. Скрябина.

С. Я. Ляхомский – магистрант факультета биотехнологии и экологии ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К.И. Скрябина.

REFERENCES

1. Functional drinks. The main global trends of 2023. URL: <https://www.agroinvestor.ru/column/artur-khasanov/39389-funktionalnye-napitki-osnovnye-mirovye-trendy-2023-goda/> (date of application: 07.07.2024). (In Russ.).

2. Radionova, A.V. (2014). Analysis of the state and prospects of development of the Russian market of functional beverages. Scientific Journal of the National Research University of ITMO. The series "Processes and devices of food production". 2014. (1). 208-217. (In Russ.).

3. Vitushkina, M.A. The use of whey in the food industry // Bulletin of Science. 2021. No.1 (34). T5. pp. 127-132. (In Russ.).

4. Bodryakova, N.P., Edomina, D.Y. & Belevtsova, D.V. (2023). Prospects for the use of secondary dairy raw materials in food technologies. Actual problems of veterinary medicine, animal science, biotechnology and expertise of raw materials and products of animal origin : Proceedings of the 2nd Scientific and Practical Conference, Moscow, June 23, 2023 / Under the general editorship of S.V. Pozyabin, L.A. Gnedilova. M.: Agricultural technologies, 2023. 494-495. (In Russ.).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 25 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 25 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

5. Sapozhnikova, A.I., Gorbacheva, M.V. & Gordienko, I.M. (2020). New generation goods based on waste recycling products of animal origin. Commodity science, technology and expertise: innovative solutions and development prospects : Materials of the national scientific and practical conference, Moscow, October 28, 2020. Moscow: ZooVet Kniga, 11-16. (In Russ.).

6. Bogdanova, S.A., Sysoeva, M.A. & Shigabieva, Yu.A. (2023). Physico-chemical properties of collagen hydrolysates and their application in the creation of therapeutic and cosmetic compositions. The cauldron. un-ta. Ser. Of course. science. (165). book 3. 345-356. (In Russ.).

7. Nevodinykh, N.V. (2016). Theoretical justification and practical aspects of the use of dietary fibers in technologies of dairy products of dietary preventive nutrition: abstract of the dissertation of the Doctor of technical Sciences: 05.18.15. Krasnodar, 2016. 48 p. (In Russ.).

8. Antipova, L.V., Storublevtsev, S.A. & Getmanova, A.A. (2015). Collagen-containing drinks for functional nutrition. Bulletin of VGU. 2018. No.3 (80). pp. 97-103. (In Russ.).

9. Guo, L., Harnedy, P.A., Zhang, L. and others (2015). In vitro assessment of the multifunctional bioactive potential of Alaska pollock skin collagen following simulated gastrointestinal digestion. Food Agric. (95), 1514-1520.

10. Pal, G.K. & Suresh, P.V. (2016). Sustainable valorisation of seafood by-products: recovery of collagen and development of collagen-based novel functional food ingredients. Food Sci. Emerg. Technol. (37), 201-215.

11. Eliseeva, T. & Tkacheva, N. (2023). Celery juice - a natural elixir of energy and health // Journal of Healthy Nutrition and Dietetics. (2). Vol.24 Access mode. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sok-seldereya-prirodnyy-eliksir-energii-i-zdorovya> (date of application: 07.07.2024). (In Russ.).

Information about the authors

M.V. Gorbacheva - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of "Technologies and Quality Management of S.A. Kasparyants Agro-Industrial Complex" of the K.I. Scriabin Moscow State Pedagogical University.

I.A. Zachesova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Technologies and Product Quality Management of the S.A. Kasparyants Agro-Industrial Complex" of the K.I. Scriabin Moscow State Pedagogical University.

N.N. Shagaeva - Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of "Technologies and Product Quality Management of the S.A. Kasparyants Agro-Industrial Complex" FGBOU IN MGAVMIB - MBA named after K.I. Scriabin.

S.Ya. Lyakhomsky - Master's student at the Faculty of Biotechnology and Ecology FGBOU IN MGAVMIB - MBA named after K.I. Scriabin.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.8.036.72
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.004

EDN: NIVAOO

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ МОДИФИКАЦИИ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ В ТЕХНОЛОГИИ УПАКОВОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Даниил Игоревич Болдинов ¹, Елена Витальевна Аверьянова ²,
Михаил Николаевич Зенин ³, Елена Сергеевна Ананьева ⁴

^{1, 2, 3, 4} ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Россия
¹ daniilb99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9144-8278>
² averianova.ev@bt.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2144-1238>
³ mikhail.zenin.96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3772-0987>
⁴ eleana2004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5768-3912>

Аннотация. В современных условиях перед пищевой промышленностью поставлены ряд задач, которые направлены, с одной стороны, на разработку, реализацию, вывод на рынок технологий качественных и безопасных отечественных продуктов питания, в том числе имеющих длительный срок хранения, а с другой стороны, – на сокращение объема образования, снижение класса опасности и максимальную утилизацию отходов, образующихся в больших количествах при переработке сырья. Решение этих задач могут обеспечить разработки в области новых видов упаковочных материалов, способных влиять на влагообмен продукта с окружающей средой, предотвращать доступ в продукты питания контаминаントов, в том числе микрорганизмов, подавлять процессы их жизнедеятельности, иметь приемлемые структурно-механические характеристики и не оказывать негативного влияния на экологию при использовании и в процессе утилизации. Такая тенденция мотивирует производителей к расширению ассортимента и увеличению объемов производства биоразлагаемых упаковочных материалов на основе природных полимеров, например, гетерополисахарида пектина, что предопределило цель исследования – изучение свойств тонких пленок, изготовленных из яблочного пектина, модифицированного в условиях ультразвукового воздействия. Объектами исследования являлись экспериментальные образцы пектиновой пленки, изготовленные из нативного и модифицированного яблочного пектина. В процессе работы стандартными методами определены основные органолептические и структурно-механические характеристики тонких пленок и построены предиктивные модели, позволяющие прогнозировать свойства, в том числе функциональные, пленочного материала в зависимости от условий ультразвукового воздействия. В эксперименте подтверждена возможность модификации пектина в условиях контролируемого ультразвукового воздействия, что особенно актуально для создания новых биополимерных материалов с улучшенными характеристиками, в том числе в производстве упаковочных покрытий и пленок для использования в пищевой и смежных отраслях промышленности.

Ключевые слова: яблочный пектин, модификация, ультразвуковое воздействие, оптимизация, упаковочный материал, биоразлагаемые пленки, органолептические свойства, структурно-механические свойства.

Благодарности: авторы благодарят за финансовую поддержку Минобрнауки РФ (ГЗ № 075-03-2024-105, тема № FZMM-2024-0003, рег. № НИОКР 124013000666-5).

Для цитирования: Болдинов Д. И., Аверьянова Е. В., Зенин М. Н., Ананьева Е. С. Оптимизация условий модификации пектиновых веществ в технологии упаковочного материала // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 27–33. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.004. EDN: <https://elibrary.ru/NIVAOO>.

Original article

OPTIMIZATION OF CONDITIONS FOR MODIFICATION OF PECTIN SUBSTANCES IN PACKAGING MATERIAL TECHNOLOGY

Daniil I. Boldinov ¹, Elena V. Averyanova ², Mikhail N. Zenin ³, Elena S. Anan'eva ⁴

^{1, 2, 3, 4} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia
¹ daniilb99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9144-8278>
² averianova.ev@bt.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2144-1238>
³ mikhail.zenin.96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3772-0987>
⁴ eleana2004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5768-3912>

© Болдинов Д. И., Аверьянова Е. В., Зенин М. Н., Ананьева Е. С., 2025

Abstract. In modern conditions, the technological industry is faced with a number of tasks that are aimed, on the one hand, at developing, implementing, bringing to market technologies for high-quality and safe domestic food products, including determining a long shelf life, and on the other hand, calculating the volume. Formation, level of danger and danger of disposal of waste generated in large volumes during processing of raw materials. The solution to these problems can ensure the development of new types of packaging materials that can affect the moisture exchange of products, taking into account possible consequences, prevent access to food products, pollutants, including sales, limit their life processes, provide acceptable structural and mechanical characteristics and not use negative methods. on the environment during use and disposal. This trend motivates manufacturers to expand the range and increase the production volumes of biodegradable packaging materials based on natural polymers, for example, heteropolysaccharide pectin, which predetermined the purpose of the study - to study the properties of thin films made of apple pectin modified under ultrasonic exposure. The objects of the study are experimental creations of pectin film made from native and modified apple pectin. In the process of work, standard methods can achieve organoleptic and structural-mechanical characteristics of thin films and constructions of predictive models that allow predicting the properties, including the main ones, of the film material depending on the conditions of ultrasonic exposure. In the conditions of the ex-experiment, the possibility of modifying pectin under controlled ultrasonic exposure was confirmed, which is especially important for the creation of new biopolymer materials with improved characteristics, including in the production of packaging materials and films for use in the food and related industries.

Keywords: apple pectin, modification, ultrasound treatment, optimization, packaging material, biodegradable films, organoleptic properties, structural and mechanical properties.

Acknowledgements: the authors thank the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for financial support (State Contract No. 075-03-2024-105, topic No. FZMM-2024-0003, reg. No. R&D 124013000666-5).

For citation: Boldinov, D.I., Averyanova, E.V., Zenin, M.N. & Anan'eva, E.S. (2025). Optimization of conditions for modification of pectin substances in packaging material technology. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 27-33. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.004. EDN: <https://elibrary.ru/NIVAOO>.

ВВЕДЕНИЕ

Ключевой задачей Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации является обеспечение физической и экономической доступности ассортимента качественной и безопасной пищевой продукции, необходимой для формирования рациона здорового питания граждан страны [1]. Решение этой задачи невозможно без разработки технологий отечественных продуктов питания, имеющих длительный срок хранения, который могут обеспечить упаковочные материалы, способные влиять на влагообмен продукта с окружающей средой, предотвращать доступ в продукты питания контаминантов, в том числе микрорганизмов и подавлять процессы их жизнедеятельности.

Расширение ассортимента полуфабрикатов, рост объема рынка фастфуда, современный темп жизни способствуют изменению предпочтений потребителей при выборе продуктов питания: всё больше покупателей отдают предпочтение упакованным товарам, что обусловлено удобством, длительным сроком хранения и защитой от внешних воздействий. Такая тенденция мотивирует производителей к расширению ассортимента и увеличению объемов производства упаковки [2]. В то же время современные реалии таковы, что при разработке упаковочных материалов следует учитывать не только их потребительские свойства, но и степень влияния отходов такой упаковки на окружающую среду.

В мировом масштабе рост отходов пластика – основы большинства упаковочных материалов – в 2023 году составил 430 млн тонн [3], при этом с каждым годом увеличивается доля отходов пластика в объеме твердых коммунальных отходов (рисунок 1).

Сокращение образования, снижение класса опасности и максимальная утилизация отходов – приоритетное направление государственной политики в области обращения с отходами [5]. Для ре-

шения вышеперечисленных задач требуется разработка новых видов биоразлагаемой упаковки. Сырьем для такого вида упаковочных материалов являются, в том числе биополимеры: белки, полисахариды и липиды (рисунок 2).

Одним из наиболее распространенных биополимеров углеводной природы являются пектиновые вещества первичной клеточной стенки и межклеточных образований растений.

Благодаря своей доступности, биосовместимости и способности к полимеризации ряд авторов рассматривает пектин как перспективный пленкообразующий материал для упаковки пищевых продуктов [7–9].

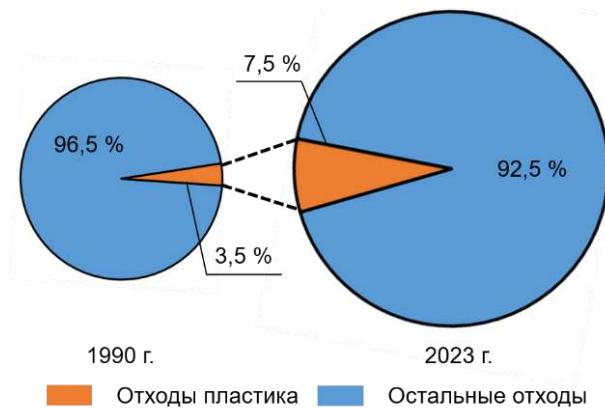


Рисунок 1 – Доля пластика в объеме твердых коммунальных отходов [4]

Figure 1 – The share of plastic in the volume of municipal solid waste [4]

Так, известно, что упаковочные материалы на основе пектиновых веществ обладают антибактериальными, антиоксидантными и барьерными свойствами, пролонгируют срок хранения продуктов питания [7, 10], а сорбционные свойства и ком-

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ МОДИФИКАЦИИ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ В ТЕХНОЛОГИИ УПАКОВОЧНОГО МАТЕРИАЛА

плексообразующая способность пектина позволяет отнести его к природным детоксикантам, ад-

сорбирующем тяжелые металлы и радионуклиды в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) [11–13].



Рисунок 2 – Сырье для изготовления биоразлагаемых покрытий и пленок [6]

Figure 2 – Raw materials for the production of biodegradable coatings and films [6]

Физико-химические характеристики и функциональные свойства пектина обусловлены его молекулярной структурой, а именно наличием гидроксильных групп, гликозидных связей, свободных и связанных (этерифицированных) карбоксильных групп (рисунок 3).

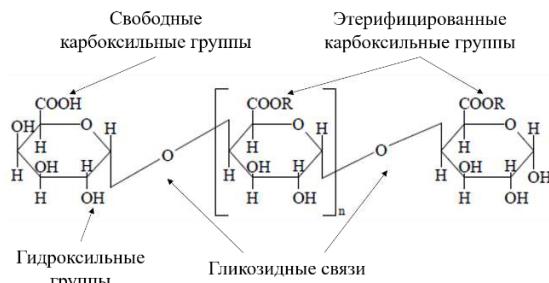


Рисунок 3 – Химическое строение пектиновых веществ

Figure 3 – Chemical structure of pectin substances

Модификация химической структуры молекулы пектина приводит к изменению его свойств: увеличивает гидрофильность, реологические и сорбционные характеристики, что, в свою очередь, влияет на функциональные свойства пектина. Например, доказано, что электроаутоагуляция [14], микроволновое излучение [15] и ультразвуковое воздействие (УЗВ) [16] способствуют разрушению гликозидных связей и деполимеризации, что, вероятно, увеличивает антиоксидантную активность пектина [17].

Таким образом, возможность направленной модификации молекулы пектина позволяет прогнозировать его основные характеристики и сформулировать цель исследования как изучение свойств тонких пленок, изготовленных из яблочного пектина, модифицированного в условиях ультразвукового воздействия.

МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись 9 экспериментальных образцов пектиновой пленки, изготовленных из яблочного пектина производства «Yantai Andre Pectin Co» (Китай).

Для получения пленок готовили 3%-ный раствор пектина в дистиллированной воде, который подвергали воздействию ультразвуковых волн, создаваемых излучателем аппарата серии «ВОЛНА» (модель УЗТА-0,4/22-ОМ, ООО «Центр ультразвуковых технологий», г. Бийск) в условиях табл. 1, при температуре процесса не более 60 °C.

В полученные растворы вносили глицерин (2 % от общего объема) и перемешивали до гомогенности. Пленки получали высушиванием пектинового геля, распределенного по кюветам диаметром 245 мм наливным методом. Высота слоя 3,0±0,1 мм. Высушивание пленок проводили в сушильном шкафу ШС-40М при температуре 50±1 °C в течение 1,5 часов.

Таблица 1 – Условия получения экспериментальных образцов пектиновой пленки

Table 1 – Conditions for obtaining experimental samples of pectin film

№ опыта	Интенсивность УЗ, Вт/см ²	Продолжительность УЗВ, мин
Контрольный образец	0	0
1	16,9	5
2		10
3		15
4	12,6	5
5		10
6		15
7	8,3	5
8		10
9		15

Молекулярную массу экспериментальных образцов пектина рассчитывали по уравнению Марка-Хаувинка-Куна [18], на основании вязкости растворов, определенной при помощи вискосизиметра Оствальда по [18].

Толщину пленок пектина определяли при помощи микрометра МК-25 не менее, чем в 10 точках по всей площади пленок по ГОСТ 17035-86 Пластмассы. Методы определения толщины пленок и листов.

Структурно-механические свойства пленок определяли стандартными реологическими методами по ГОСТ 14236-81 Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение на разрывной машине *Instron 3369*.

Исследования проводились в трехкратной повторности, результаты обработаны в программе «*Statistica 10.0*».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 2 представлены результаты определения основных характеристик экспериментальных образцов пектина как высокомолекулярного соединения – молекулярной массы и степени полимеризации.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что наименьшее значение молекулярной массы 31,1 кДа достигается при УЗВ с наибольшей интенсивностью 16,9 Вт/см² и наибольшей продолжительностью 15 минут, что подтверждает влияние УЗВ на разрыв гликозидных связей в молекулах пектина.

На основе экспериментальных данных получена математическая модель влияния мощности и продолжительности УЗВ на молекулярную массу, выраженная в виде поверхности отклика (рисунок 5, а).

Анализ поверхности отклика свидетельствует о том, что значение молекулярной массы пектина зависит в большей степени от продолжительности

УЗВ, чем от интенсивности. Возможно, это связано с тем, что за более продолжительное время УЗВ образуется большее количество кавитационных пузырьков, при схлопывании которых происходит деполимеризация пектина.

Таблица 2 – Молекулярная масса и степень полимеризации экспериментальных образцов пектина, $M\pm m$, $n=3$

№ опыта	Молекулярная масса, кДа	Средняя степень полимеризации
Контрольный образец	44,8±0,7	255±3
1	38,7±0,5	220±2
2	34,8±0,5	198±2
3	31,1±0,6	177±3
4	37,2±0,7	211±3
5	34,9±0,8	198±4
6	33,3±0,6	189±3
7	36,0±0,5	205±2
8	35,8±0,7	203±3
9	35,8±0,5	203±2

Фотографии полученных образцов пектиновых пленок представлены на рисунке 4.

Все образцы пленочного материала гладкие, пластичные, не липнут к рукам, легко сворачиваются в рулон. Цвет бежевый, характерный для используемого пектина, запах отсутствует. Пленки обладают адгезией к гидрофильным поверхностям. Внешний вид пленок имеет незначительные отличия. Так, у образцов № 2, № 6 и № 9 наблюдаются более темные и плотные участки по краям пленок, что, возможно, связано с неравномерным изменением вязкости растворов по объему реактора при УЗВ.

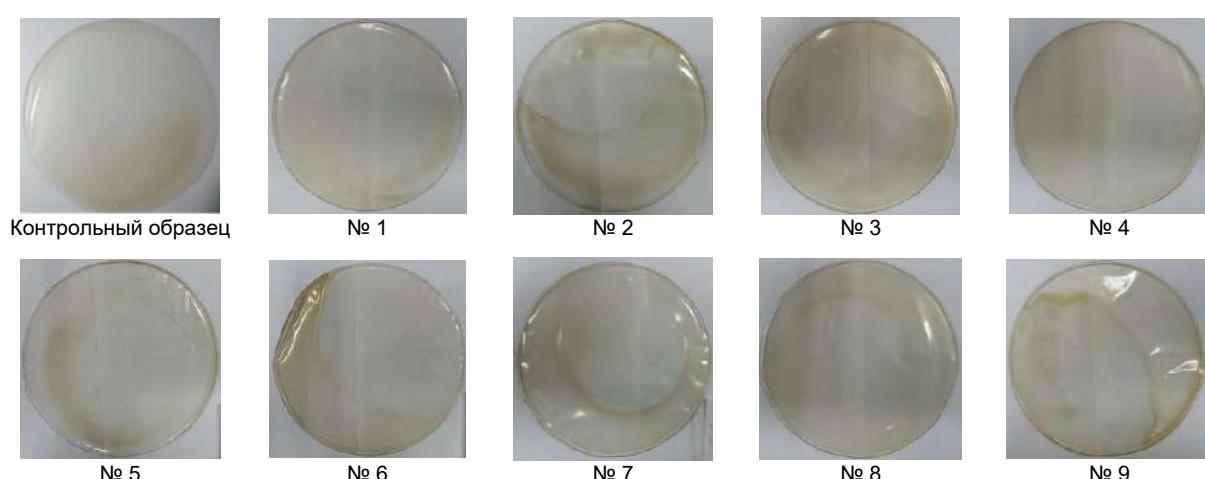


Рисунок 4 – Внешний вид экспериментальных образцов пектиновых пленок (фотографии)
Figure 4 – Experimental samples of pectin film

Таблица 3 – Структурно-механические свойства пектиновых пленок, $M\pm m$, $n=3$

Table 3 – Structural and mechanical properties of pectin films, $M\pm m$, $n=3$

№ образца	Толщина пленки, мм	Относительное удлинение, %	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, МПа
1	2	3	4	5
Контрольный	0,110±0,01	41,52±4,47	3,12±0,20	7,11±0,49
1	0,106±0,01	42,82±5,02	3,05±0,27	7,20±0,59

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ МОДИФИКАЦИИ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ В ТЕХНОЛОГИИ УПАКОВОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

1	2	3	4	5
2	0,079±0,02	45,62±4,84	3,68±0,24	8,44±0,52
3	0,096±0,02	39,67±5,33	3,50±0,26	8,82±0,61
4	0,150±0,01	47,26±5,03	2,97±0,34	6,27±0,56
5	0,098±0,01	50,68±6,05	2,93±0,26	5,77±0,63
6	0,122±0,02	43,35±5,49	3,46±0,36	5,38±0,61
7	0,132±0,02	60,55±4,42	4,51±0,29	5,65±0,51
8	0,107±0,02	39,46±5,56	3,46±0,26	8,24±0,63
9	0,093±0,02	34,20±4,74	2,19±0,26	8,28±0,53

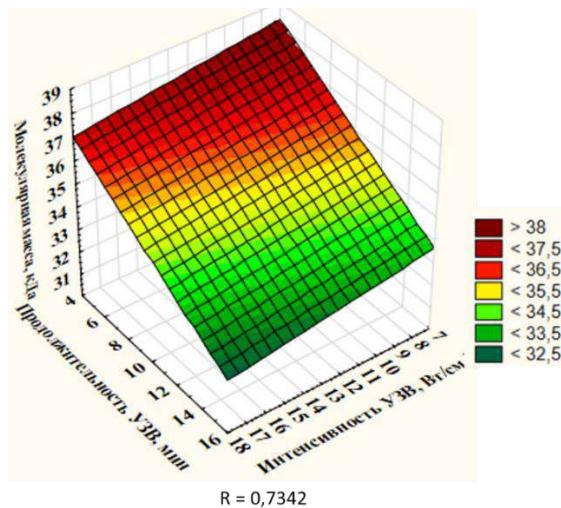
Механическая прочность полимерных пленок зависит от структурных особенностей макромолекул: степени полимеризации, наличия сложно-эфирных и водородных связей, гидрофобных взаимодействий и т.п. В связи с этим на следующем этапе исследовались структурно-механические

$$z = 40,6381 - 0,1145 \cdot x - 0,3895 \cdot y \quad (1)$$

свойства образцов пленочного материала с разной степенью деполимеризации пектина. Результаты исследования представлены в табл. 3.

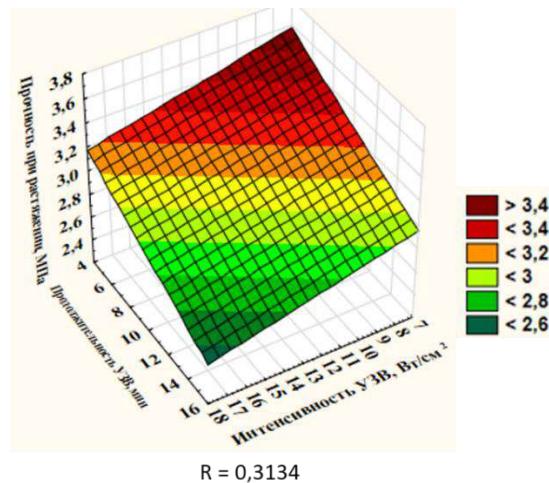
По данным таблицы 3 проведен регрессионный анализ, в результате которого построены поверхности отклика (рисунок 5) и уравнения регрессии (2–4).

$$z = 4,0419 - 0,0366 \cdot x - 0,0523 \cdot y \quad (3)$$



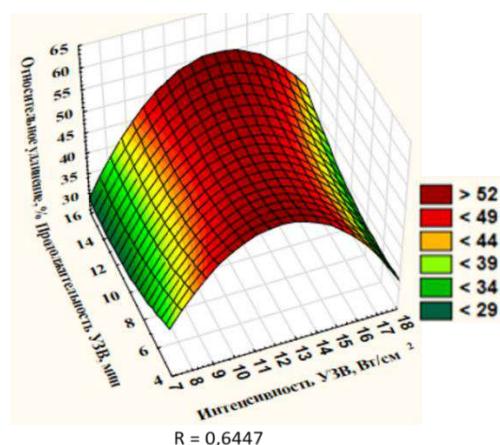
а) зависимость молекулярной массы пектина от интенсивности и продолжительности УЗВ

$$z = -28,4321 + 15,172 \cdot x - 3,5597 \cdot y - 0,6478 \cdot x^2 + 0,139 \cdot x \cdot y + 0,0944 \cdot y^2 \quad (2)$$

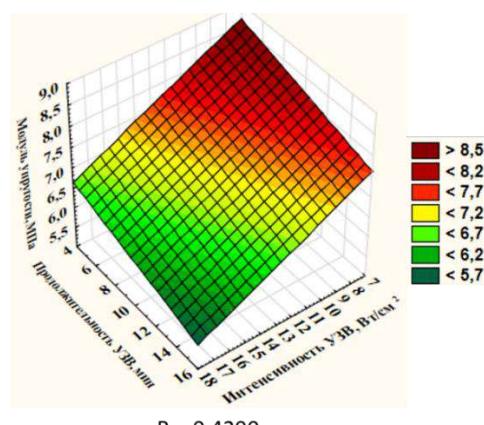


в) зависимость прочности при растяжении пленки от интенсивности и продолжительности УЗВ

$$z = 10,2816 - 0,1829 \cdot x - 0,0862 \cdot y \quad (4)$$



б) зависимость относительного удлинения пленки от интенсивности и продолжительности УЗВ



г) зависимость модуля упругости пленки от мощности и продолжительности УЗВ

Рисунок 5 – Зависимость молекулярной массы пектина и структурно-механических свойств пленки от режимов УЗВ

Figure 5 – Dependence of the molecular weight of pectin and structural-mechanical properties of the film on the ultrasound modes

Согласно полученным данным (табл. 3) и результатам регрессионного анализа (рисунок 5), можно сделать следующие выводы:

- наибольшее относительное удлинение 60,55 % и прочность при растяжении пленки 4,51 МПа наблюдается при интенсивности УЗВ 8,3 Вт/см² и продолжительности УЗВ 5 минут;
- наибольшие значения модуля упругости пленки 8,24–8,82 МПа достигаются при продолжительности УЗВ 10–15 минут интенсивностью 16,9 и 8,3 Вт/см².

Из вышеизложенного следует, что при модификации пектиновых веществ ультразвуковыми колебаниями, исследованными при различных режимах УЗВ, тонкие пленки имеют разные структурно-механические характеристики, что позволяет получать упаковочный материал с заданными свойствами, варьируя параметры ультразвукового воздействия.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Установлено, что ультразвуковое воздействие на растворы пектина приводит к деполимеризации молекулы; степень деполимеризации зависит от мощности и продолжительности УЗВ; наиболее интенсивно при воздействии ультразвуковыми волнами интенсивностью 16,9 Вт/см² в течение 15 минут;

2. Разработана предиктивная модель зависимости молекулярной массы пектина от условий УЗВ, позволяющая прогнозировать свойства пектиновых гелей, в том числе функциональные.

3. Определены структурно-механические свойства экспериментальных образцов пектиновых пленок и установлена их зависимость от условий УЗВ, наиболее прочные пленки получены при ультразвуковом воздействии интенсивностью 8,3 Вт/см² продолжительностью 5 минут и 16,9 Вт/см² продолжительностью 10 минут.

Таким образом, в условиях эксперимента подтверждена возможность модификации пектина в условиях контролируемого ультразвукового воздействия, что особенно актуально для создания новых биополимеров с улучшенными характеристиками, в том числе в производстве упаковочных материалов и пленок для использования в пищевой промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации : Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 // Собр. законодательства РФ. 2020. № 4. ст. 345.
2. PLASTINFO: [сайт]. URL: https://plastinfo.ru/information/news/52747_01.02.2024/ (дата обращения: 03.09.2024).
3. Statista: [сайт]. URL: <https://www.statista.com/chart/32385/global-plastic-waste-production-by-application/> (дата обращения: 05.09.2024).
4. ИМЭМО РАН: [сайт]. URL: <https://www.imemo.ru/publications/policy-briefs/text/the-international-community-is-determined-to-get-rid-of-plastic-waste> (дата обращения: 05.09.2024). Текст: электронный.
5. Об отходах производства и потребления : Федеральный закон от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ // Собр. законодательства РФ. 1998. № 26. ст. 3009.

6. Nair, Surya Sasikuma Edible packaging: a technological update for the sustainable future of the food industry / Surya Sasikuma Nair, Joanna Trafialek, Wojciech Kolanowski // Applied Sciences. 2023. № 13. Р. 56–79.

7. Pectin-based active packaging: A critical review on preparation, physical properties and novel application in food preservation / Jiayin Huang, Zhiheng Hu, Lingping Hu [et al] // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 118, Part A. Р. 167–178.

8. Исследование структуры и свойств пищевых биоактивных пленок на основе пектина / О.В. Зинина, С.П. Меренкова, Е.А. Вишнякова, Д.М. Галимов // Вестник КрасГАУ. 2024. № 1(202). С. 201–207.

9. Advanced pectin-based films: Enhancing antioxidant, antibacterial, UV barrier, and physicochemical properties upon oligomeric limonene derivative incorporation / Jésé Vanzella Santana, Luís Marangoni Júnior, Geodriane Zatta Cassol [et al] // Food Hydrocolloids. 2024. Vol. 149. Р. 187–195.

10. Taotao, Qiang Biodegradable, high mechanical strength, and eco-friendly pectin-based plastic film, Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties - A review / Taotao Qiang, Wenqi Ren, Liang Chen // Food Hydrocolloids. 2023. № 149(1). Р. 349–358.

11. Адыгезалова, С.Г. Основные функциональные свойства пектиновых полисахаридов в овощном сырье / С.Г. Адыгезалова // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8, № 5. С. 218–223.

12. Исследование свойств пребиото-сорбционной композиции на основе яблочных выжимок / Е.И. Рябинина, Е.Е. Зотова, Т.Н. Никитина, С.В. Рябинин // Прикладные информационные аспекты медицины. 2023. Т. 26, № 3. С. 92–98.

13. Тунакова, Ю.А. Исследование эффективности биополимерных сорбентов на основе пектина для выведения избыточного содержания металлов из организма / Ю.А. Тунакова, Р.А. Файзуллина, Ю.А. Шмакова // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 12. С. 71–73.

14. Химическое модифицирование пектина с целью повышения его сорбционных свойств / Л.А. Купчик, Н.Т. Картель, Е.С. Богданов [и др.] // Журнал прикладной химии. 2006. Т. 79. № 3. С. 464–467.

15. Получение и реологические свойства пектина, выделенного с использованием сверхвысокочастотного излучения / Л.Б. Азимова, А.В. Филатова, М.Ю. Мухамеджанова, А.С. Тураев // Химия растительного сырья. 2023. № 1. С. 77–86.

16. Citrus pectin modified by microfluidization and ultrasonication: Improved emulsifying and encapsulation properties / Wenjun Wang, Yiming Feng, Weijun Chen [et al] // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 70. Р. 170–179.

17. Ultrasound effects on the degradation kinetics, structure and rheological properties of apple pectin / Lifen Zhang, Xinqian Ye, Tian Ding // Ultrasonics Sonochemistry. 2013. Vol. 20, № 1. Р. 222–231.

18. Аверьянова, Е.В. Изучение свойств пектина, полученного из вторичных сырьевых ресурсов ягодного сырья алтайского края / Е.В. Аверьянова, М.Н. Школьникова, И.А. Чаплыгина // Вестник КрасГАУ. 2016. № 12 (123). С. 118–127.

Информация об авторах

Д. И. Болдинов – стажер-исследователь ЦКИ «АлтайБиоЛакт», аспирант кафедры технологии продуктов питания ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Е. В. Аверьянова – ведущий научный сотрудник ЦКИ «АлтайБиоЛакт», д-р техн. наук, профессор кафедры биотехнологии Бийского

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ МОДИФИКАЦИИ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ В ТЕХНОЛОГИИ УПАКОВОЧНОГО МАТЕРИАЛА

технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

М. Н. Зенин – аспирант кафедры современных специальных материалов ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Е. С. Ананьева – канд. техн. наук, доцент кафедры современных специальных материалов ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

REFERENCES

1. Указ Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. N 20 «О утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации». Москва: Стандарты Правительства Российской Федерации. (In Russ.).
2. PLASTINFO. (2024). Retrieved from https://plastinfo.ru/information/news/52747_01.02.2024/ (In Russ.).
3. Statista. (2023). Retrieved from <https://www.statista.com/chart/32385/global-plastic-waste-production-by-application/> (In Russ.).
4. IMEMO. (2023). Retrieved from <https://www.imemo.ru/publications/policy-briefs/text/the-international-community-is-determined-to-get-rid-of-plastic-waste>. (In Russ.).
5. Федеральный закон Российской Федерации от 24 июня 1998 г. N 89-ФЗ «О производстве и потреблении отходов». (1998). Москва: Стандарты Правительства Российской Федерации. (In Russ.).
6. Surya Sasikuma Nair, Joanna Trajstalek & Wojciech Kolanowski. (2023). Edible packaging: a technological update for the sustainable future of the food industry. *Applied Sciences*, (13). 56-79. (In Russ.). doi: 10.3390/app13148234.
7. Jiayin Huang, Zhiheng Hu, Lingping Hu, Gaoshang Li, Qian Yao & Yaqin Hu. (2021). Pectin-based active packaging: A critical review on preparation, physical properties and novel application in food preservation. *Trends in Food Science & Technology*, (Part A), 167-178. doi: 10.1016/j.tifs.2021.09.026.
8. Zinina, O.V., Merenkova, E.A., Vishnyakova, S.P. & Galimov, D.M. (2024). Study of the structure and properties of food bioactive films based on pectin. *KrasSAU Bulletin*, 201-207. (In Russ.). doi: 10.36718/1819-4036-2024-1-201-207.
9. Jessé Vanzella Santana, Luís Marangoni Júnior, Geodriane Zatta Cassol, Hélia Harumi Sato & Roniérík Pioli Vieira. (2024). Advanced pectin-based films: Enhancing antioxidant, antibacterial, UV barrier, and physicochemical properties upon oligomeric limonene derivative incorporation. *Food Hydrocolloids*, (Vol. 149), 187-195. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.109558.
10. Taotao Qiang, Wenqi Ren & Liang Chen. (2023). Biodegradable, high mechanical strength, and eco-friendly pectin-based plastic film, Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties. *Food Hydrocolloids*, (149(1)), 349-358. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.109539.
11. Adygezalova, S.G. (2022). Main functional properties of pectin polysaccharides in vegetable raw materials. *Bulletin of Science and Practice*, 218-223. (In Russ.). doi: 10.33619/2414-2948/78/30.
12. Ryabinina, E.I., Zotova, E.E., Nikitina T.N. & Ryabinin, S.V. (2023). Study of the properties of a prebiotic-sorption composition based on apple pomace. *Applied information aspects of medicine*, (3), 92-98. (In Russ.). doi: 10.18499/2070-9277-2023-26-3-92-98.
13. Tunakova, Yu.A., Fayzullina, R.A. & Shmakova, Yu.A. (2012). Study of the effectiveness of biopolymer sorbents based on pectin for removing excess metals from the body. *Bulletin of Kazan Technological University*, (12), 71-73. (In Russ.).
14. Kupchik, L.A., Kartel, N.T., Bogdanov, E.S., Bogdanova, O.V. & Kupchik, M.P. (2006). Chemical modification of pectin to improve its sorption properties. *Journal of Applied Chemistry*, (3), 464-467. (In Russ.).
15. Azimova, L.B., Filatova, A.V., Mukhamedzhanova, M.Yu. & Turaev, A.S. (2023). Obtaining and rheological properties of pectin isolated using microwave radiation. *Chemistry of plant materials*, (1), 77-86. (In Russ.). doi: 10.14258/jcprm.20230111066.
16. Wenjun Wang, Yiming Feng, Weijun Chen, Kyle Adie, Donghong Liu & Yun Yin. (2021). Citrus pectin modified by microfluidization and ultrasonication: Improved emulsifying and encapsulation properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 170-179. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105322.
17. Lifen Zhang, Xinqian Ye, Tian Ding, Xiaoyang Sun, Yuting Xu & Donghong Liu. (2013). Ultrasound effects on the degradation kinetics, structure and rheological properties of apple pectin. *Ultrasonics Sonochemistry*, (1), 222-231. doi: 10.1016/j.ultsonch.2012.07.021.
18. Averianova, E.V., Shkolnikova, M.N. & Chaplygina, I.A. (2016). Study of the properties of pectin obtained from secondary raw materials of berry raw materials of the Altai region. *KrasSAU Bulletin*, (12), 118-127. (In Russ.).

Information about the authors

D.I. Boldinov - research intern at the Complex Research Center «AltaiBioLact», postgraduate student of the Department of Food Technology of the Polzunov Altai State Technical University.

E.V. Averianova - leading researcher at the Complex Research Center «AltaiBioLact» D.Sc., Professor of the Department of Biotechnology of the Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University.

M.N. Zenin - postgraduate student of the Department of Modern Special Materials of the Polzunov Altai State Technical University.

E.S. Ananyeva - Cand. Sci., Associate Professor of the Department of Modern Special Materials 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 30 сентября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 30 Sep 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 637.2
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.005

EDN: QBDIDJ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ СЛИВОЧНОГО МАСЛА НИЗКОЙ ЦЕНОВОЙ КАТЕГОРИИ НА НЕКОТОРЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

Константин Евгеньевич Буркин¹, Айгуль Габделнуровна Мухамметшина²,
Айсылу Завдатовна Мухарлямова³, Мария Викторовна Балымова⁴,
Александр Маратович Сайфутдинов⁵, Сания Лотфулловна Мохтарова⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности, Казань, Россия

¹ konstantinburkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1773-1040>

² aika.muha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3272-2329>

³ muharlyamova82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3847-2084>

⁴ balymova.m@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6424-1415>

⁵ alex.saifutdinov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7098-0767>

⁶ fizhimlab5@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0634-239X>

Аннотация. Сливочное масло – продукт питания со стабильно высоким спросом, достаточно легко подвергающийся фальсификации. Пристальное внимание в этом отношении привлекает к себе масло низкой ценовой категории со стоимостью на грани рентабельности, если производитель использует натуральное коровье молоко. Выполнено комплексное исследование шести образцов сливочного масла в ценовом диапазоне от 280 до 500 рублей за 1 килограмм с целью установления показателей качества и безопасности. Для анализа была выбрана продукция производителей как из Республики Татарстан, так и из других регионов Российской Федерации. Установлено отсутствие во всех образцах масла остаточных количеств хлорорганических пестицидов, афлатоксина M1 и антибиотиков тетрациклического ряда в пределах чувствительности применяющихся хроматографических методик. Также были проведены исследования маркировки и упаковки, проведена оценка органолептических показателей качества сливочного масла по балльной системе и на соответствие требований ГОСТ 32915-2014, установлен жирнокислотный состав. По органолептическим свойствам все изученные образцы были идентифицированы как «масло сливочное». Однако в ходе анализа жирнокислотного состава жировой фазы было установлено, что только один образец из шести соответствовал установленным значениям по составу для молочного жира и не имел признаков фальсификации, при этом массовая доля молочного жира рассчитывалась исходя из полученных данных о содержании масляной кислоты. Два образца представляли собой растительно-сливочные спреды с содержанием молочного жира 40,0 и 40,7 %. А три образца являлись растительно-жировыми спредами с полной заменой молочного жира жирами немолочного происхождения.

Ключевые слова: масло сливочное, качество продукта, безопасность, органолептические показатели, жирнокислотный состав, трансизомеры, фальсификация.

Для цитирования: Исследование образцов сливочного масла низкой ценовой категории на некоторые показатели качества и безопасности / К. Е. Буркин [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 34–39. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.005. EDN: <https://elibrary.ru/QBDIDJ>.

Original article

STUDY OF LOWPRICE BUTTER SAMPLES FOR SOME QUALITY AND SAFETY INDICATORS

Konstantin E. Burkin¹, Aigul G. Mukhammetshina², Aisylu Z. Mukharlyamova³,
Mariya V. Balyanova⁴, Aleksandr M. Saifutdinov⁵, Saniya L. Mokhtarova⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety, Kazan, Russia

¹ konstantinburkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1773-1040>

² aika.muha@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3272-2329>

³ muharlyamova82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3847-2084>

⁴ balymova.m@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6424-1415>

⁵ alex.saifutdinov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7098-0767>

⁶ fizhimlab5@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0634-239X>

© Буркин К. Е., Мухамметшина А. Г., Мухарлямова А. З., Балымова М. В., Сайфутдинов А. М.,
Мохтарова С. Л., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ СЛИВОЧНОГО МАСЛА НИЗКОЙ ЦЕНОВОЙ КАТЕГОРИИ НА НЕКОТОРЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

Abstract. Butter is a food product with a consistently high demand, which is quite easily subject to adulteration. In this regard, close attention is drawn to low-price butter with a cost on the verge of profitability if the manufacturer uses natural cow's milk. A comprehensive study of six samples of butter in the price range from 280 to 500 rubles per 1 kilogram was carried out in order to establish quality and safety indicators. Products of manufacturers from the Republic of Tatarstan and other regions of the Russian Federation were selected for analysis. The absence of residual amounts of organochlorine pesticides (isomers of hexachlorocyclohexane and dichlorodiphenyltrichloroethane and its metabolites), aflatoxin M1, as well as polyketide antibiotics (chlor-, oxy-, tetracycline and doxycycline) within the sensitivity limits of the chromatographic methods used was established in all butter samples. The labeling and packaging were also studied, the organoleptic quality indicators of butter were assessed using a point system and for compliance with the requirements of GOST 32915-2014, and the fatty acid composition was established. According to the organoleptic properties, all the studied samples were identified as "butter". However, during the analysis of the fatty acid composition of the fat phase, it was found that only one sample out of six corresponded to the established values for the composition of milk fat. Two samples are vegetable-cream spreads with a milk fat content of 40.0 and 40.7%. And three samples are vegetable-fat spreads with a complete replacement of milk fat with non-dairy fats.

Keywords: butter, product quality, safety, organoleptic characteristics, fatty acid composition, transisomers, falsification.

For citation: Burkin, K.E., Mukhammetshina, A.G., Mukharlyamova, A.Z., Balyanova, M.V., Saifutdinov, A.M. & Mokhtarova, S.L. (2025). Study of low price butter samples for some quality and safety indicators. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 34-39. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.005. EDN: <https://elibrary.ru/QBDIDJ>.

ВВЕДЕНИЕ

Молочная, кисломолочная и масложировая продукция на основе коровьего молока является одним из важных видов пищевых продуктов животного происхождения для жителей Европы. При этом отдельно следует выделить сливочное масло как ценный высококалорийный продукт с высоким содержанием жира и хорошей усвояемостью [1–5].

Согласно нормативным документам [6, 7], в Российской Федерации «сливочное масло» – это «масло из коровьего молока, в котором массовая доля жира составляет не менее 50 %», и для его производства не допускается применение каких-либо дополнительных посторонних ингредиентов и в том числе замена даже части молочного жира жирами немолочного происхождения. Исключение сделано для поваренной соли, β-каротина и бактериальной закваски [4]. Помимо молочного жира в состав настоящего сливочного масла входят и различные белковые и минеральные вещества, лактоза, жирорастворимые – А (ретинол), Д (кальциферол), Е (токоферолы) и водорастворимые витамины – В1 (тиамин), В2 (рибофлавин) [8].

Для производства 1 килограмма сливочного масла в настоящее время необходимо переработать не менее 25 литров цельного сырого коровьего молока. Этот факт приводит к достаточно высокой себестоимости конечного продукта. Что, в свою очередь, способствует проявлению фактов фальсификации продукции, при которой происходит замена натуральных ингредиентов на более дешевые ненатуральные, с ухудшением качества, но сокращением затрат на производство, например, весь или значительная часть молочного жира заменяется на гидрированные (гидрогенизованные) или переэтерифицированные растительные масла, преимущественно пальмовое, подсолнечное, пальмоядовое или кокосовое [4].

Масло с такой заменой, как правило, обладает низкими качественными и вкусовыми характеристиками, а также может нанести вред здоровью потребителя, особенно в плане проявления различных аллергических реакций на добавленные компоненты.

Следует отметить, что не все сливочное масло, реализуемое в розничных торговых сетях, в особенности низкой ценовой категории, соответствует требованиям нормативной документации по показателям не только качества и состава, но и безопасности. Выявление фактов реализации такой некачественной, а часто еще и фальсифицированной, продукции, и обуславливает актуальность выбранной темы исследования.

В связи с этим целью работы стало изучение качества, по органолептическим критериям, а также показателей безопасности, на предмет наличия ряда токсичных соединений образцов «сливочного масла» низкой ценовой категории.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе объектами исследований выступили 6 образцов масложировой продукции, заявленные производителями как «масло сливочное» и отобранные в розничных торговых сетях и на рынке г. Казани:

- масло сладко-сливочное несоленое «Традиционное» (Ставропольский край, г. Лермонтов), масса нетто 180 грамм, заявленная жирность – 82,5 %, цена 50 рублей за пачку (образец № 1);
- масло сладко-сливочное несоленое «Крестьянское» (Свердловская область, г. Екатеринбург), масса нетто 200 грамм, заявленная жирность – 72,5 %, цена 50 рублей за пачку (образец № 2);
- масло сливочное «Крестьянское» (Московская область, г. Дмитров, с. Орудьево), масса нетто 180 грамм, заявленная жирность – 72,5 %, цена 89 рублей за пачку (образец № 3);
- масло сливочное «Крестьянское» (Ульяновская область, р.п. Вешкайма), масса нетто 180 грамм, заявленная жирность – 72,5 %, цена 70 рублей за пачку (образец № 4);
- масло сладко-сливочное несоленое «Бутербродное» (Республика Татарстан, Высокогорский район), масса нетто 160 грамм, заявленная жирность – 61,5 %, цена 80 рублей за пачку (образец № 5);
- масло сливочное «Крестьянское» (Республика Татарстан, Балтасинский район), весовое, заявленная жирность – 72,5 %, цена 480 рублей за килограмм (образец № 6).

При проведении органолептического анализа была проведена оценка таких показателей, как вкус, запах, упаковка и маркировка, цвет, консистенция и внешний вид. Органолептическую оценку проводили в соответствии с ГОСТ 32261-2013 при температуре масла (12 ± 2) °C [6].

Содержание микотоксинов определяли методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) по ГОСТ 30711-2001. Количественные измерения проводили визуально, сравнивая площади пятен стандартного и исследуемого образцов на пластинах «Силуфол», Чехия [9]. В ходе ТСХ анализа использовали стандартный образец афлатоксина М1 («Sigma-Aldrich», США). Хлорорганические пестициды (ХОП) определяли методом газожидкостной хроматографии (ГХ) по ГОСТ 23452-2015 п.9 на газовом хроматографе «Хроматэк Кристалл 5000» с электрон-захватным детектором при рабочих параметрах изотермы «а» на рисунке 1 [10]. Идентификацию пестицидов проводили, сравнивая время удерживания полученных пиков на хроматограммах исследуемых экстрактов с временем удерживания пиков соответствующих стандартных растворов. При ГХ анализе применяли стандартные образцы альфа, бета и гамма-изомеров гексахлорциклогексана (ГХЦГ), 4,4'-дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ), 4,4'-дихлордифенилдихлорэтена (ДДЭ), 4,4'-дихлордифенилдихлорэтана (ДДД). Остаточные количества антибиотиков определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ВЭЖХ-МС/МС) по ГОСТ 31694-2012 с использованием внутреннего стандарта на масс-спектрометре высокого разрешения «Bruker Impact 2» [11]. Анализ проводили в режиме мониторинга выбранных реакций при электроспрейевой ионизации молекул. В работе применялись стандартные образцы тетрациклина, хлортетрациклина, окситетрациклина, доксициклина и демеклоциклина («Sigma-Aldrich», США).

Исследование жирнокислотного состава (в виде массовых долей метиловых эфиров жирных кислот, МЭЖК), включая содержание трансизомеров, проводилось по ГОСТ 32915-2014 [12] и ГОСТ 31754-2012 [13] после дериватизации растворенного в гексане образца пробы масла метанольным раствором метилата натрия на газовом хромато-

графе «Хроматэк Кристалл 5000» с пламенно-ионизационным детектором и кварцевой капиллярной колонкой «Chromatec CR-FAME» длиной 100 м при рабочих параметрах, приведенных на изотерме «б» рисунка 1. В качестве подвижной фазы использовался азот.

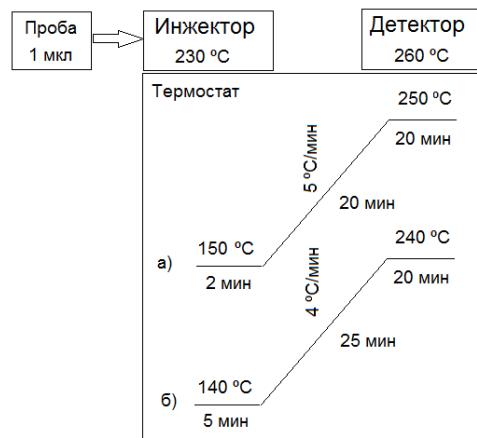


Рисунок 1 – Параметры газохроматографического анализа: а) ХОП; б) МЭЖК

Figure 1 – Parameters of gas chromatographic analysis of: a) COP; b) FAME

Состав МЭЖК исследуемых образцов идентифицировали по времени удерживания, предварительно определяемому анализом стандартной смеси, содержащей 37 основных МЭЖК. Массовые доли жирных кислот определяли, используя метод внутренней нормализации и предполагая общую площадь хроматографических пиков всех компонентов, равной 100 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ценовой диапазон изученных образцов лежит в пределах от 280 до 500 рублей за 1 килограмм. Жирность составляет от 61,5 до 82,5 %.

Из данных органолептической оценки, представленных в таблице 1, видно, что практически все исследованные образцы получили достаточно высокие итоговые баллы за исключением образца № 6. Это явилось следствием недостаточно выраженного вкуса и запаха, а также недостаточно плотной и пластичной консистенции.

Таблица 1 – Органолептические показатели образцов сливочного масла

Table 1 – Organoleptic characteristics of butter samples

Наименование показателя	Характеристика показателя	Номер образца					
		1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7	8
Вкус и запах	Отличный	v			v	v	
	Хороший			v			
	Удовлетворительный		v				v
	Невыраженный (пустой)						
	С наличием привкусов						
	Баллы	10	8	9	10	10	8
Консистенция и внешний вид	Отличная	v	v	v	v	v	
	Хорошая						
	Удовлетворительная						v
	Баллы	5	5	5	5	5	3
Цвет	Характерный для сливочного масла	v	v	v	v	v	v
	Баллы	2	2	2	2	2	2

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ СЛИВОЧНОГО МАСЛА НИЗКОЙ ЦЕНОВОЙ КАТЕГОРИИ НА НЕКОТОРЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Маркировка и упаковка	Хорошая					v	
	Удовлетворительная	v	v	v	v		
	Баллы	2	2	2	2	3	-
Итого баллов		19	17	18	20	20	13

Образцы № 2 и № 3, в отличие от остальных, были заявлены производителями как высший сорт. С одной стороны, их суммарные рейтинги (17 и 18 баллов соответственно) позволяют соответствовать данному сорту. С другой стороны, слегка неровная поверхность продукта в упаковке, является одним из тех требований для масла высшего сорта, которое должно соблюдаться в обязатель-

Таблица 2 – Результаты исследований образцов ($P = 0,95$, $n = 2$)

Table 2 – Results of studies of butter samples according to safety indicators ($P = 0,95$, $n = 2$)

Определяемый показатель	Наименование пробы					
	Образец					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
Афлатоксин М1, мг/кг	менее 0,0005	менее 0,0005	менее 0,0005	менее 0,0005	менее 0,0005	менее 0,0005
Σ ГХЦГ и Σ ДДТ, мг/кг	менее 0,005	менее 0,005	менее 0,005	менее 0,005	менее 0,005	менее 0,005
Антибиотики тетрациклиновой группы, мкг/кг	менее 1,0	менее 1,0	менее 1,0	менее 1,0	менее 1,0	менее 1,0

По результатам ТСХ исследований установлено, что содержание афлатоксина М1 во всех образцах сливочного масла ниже предела определения применяемого метода (менее 0,0005 мг/кг, см. данные таблицы 2). На хроматографических пластинах с нанесенными экстрактами образцов отсутствовали пятна, соответствующие по хроматографической подвижности стандарту афлатоксина М1. Аналогичные результаты получены при определении остаточных количеств ХОП: их содержание также было ниже предела определения (менее 0,005 мг/кг). По результатам ВЭЖХ-МС/МС исследований антибиотики тетрациклиновой группы не обнаружены на уровне чувствительности метода (менее 1,0 мкг/кг) во всех образцах.

В ходе анализа жирнокислотного состава жировой фазы образцов № 1, № 2 и № 3 была выявлена её фальсификация. Данные образцы представляют собой растительно-жировые спреды с полной заменой молочного жира жирами немолочного происхождения, что легко прослеживается по отсутствию масляной кислоты (С 4:0). Также фальсифицированными оказались образцы № 4 и № 6, фактически они являются растительно-сливочными спредами с содержанием молочного жира 40,0 и 40,7 % соответственно. И только один образец № 5 можно справедливо назвать «сливочным маслом», жирнокислотный состав которого полностью укладывается в нормативы ГОСТ 32261-2013 для молочного жира [6].

Массовые доли МЭЖК, включая трансизомеры, образцов «сливочного масла» приведены в таблице 3.

Исходя из полученных данных следует отметить полное отсутствие низкомолекулярных насыщенных – масляной С 4:0 и капроновой С 6:0 и ненасыщенной деценовой жирной кислоты С 10:1, в образцах № 1, № 2 и № 3, а также насыщенных

ном порядке. Таким образом, проведенные органолептические исследования данных образцов не подтверждают заявленное для них качество.

Наивысшую оценку получили образцы масла № 4 и № 5.

В результате было выявлено, что все образцы сливочного масла по органолептическим показателям соответствуют требованиям ГОСТ 32261-2013.

сливочного масла по показателям безопасности

каприловой С 8:0 и каприновой С 10:0 кислот в образцах № 1 и № 2, что совершенно несвойственно для молочного жира из коровьего молока, в котором данные жирные кислоты всегда присутствуют, при этом проявляя высокую биологическую активность. В образцах № 4 и № 6 данные жирные кислоты содержатся в количестве почти в полтора-два с половиной раза меньше средней величины их допустимого содержания.

Кроме того, в образце № 1 помимо значительно пониженного содержания практически всех компонентов жирнокислотного состава наблюдается повышенное содержание олеиновой С 18:1 и четырехкратно повышенное содержание линолевой С 18:2 жирных кислот, в образцах № 2 и № 3 – ситуация как в предыдущем образце плюс повышенное содержание пальмитиновой С 16:0 кислоты, в образце № 4 также понижена массовая доля миристиновой С 14:0 и превышена массовая доля стеариновой С 18:0 кислоты, в образце № 6 при двукратном превышении содержания линолевой кислоты С 18:2 заметно пониженное содержание миристиновой С 14:0 и стеариновой С 18:0 жирных кислот.

Массовые доли трансизомеров С 18:1, С 18:2 и С 18:3 для всех образцов «сливочного масла» не превышали $2,45 \pm 0,4$ %, при этом с увеличением степени замещения молочного жира жирами немолочного происхождения эта величина снижалась и достигала $0,6 \pm 0,4$ % в образце № 1 и $0,74 \pm 0,4$ % в образце № 3, в которых молочный жир полностью отсутствовал.

Данная работа являлась предварительным этапом для более широкого исследования рынка масложировой продукции низкой ценовой категории с увеличением количества торговых марок и партий в рамках одной торговой марки.

Таблица 3 – Результаты исследования образцов «сливочного масла» по жирнокислотному составу ($P = 0,95$, $n = 2$)

Table 3 – Results of the study of "butter" samples by fatty acid composition ($P = 0,95$, $n = 2$)

МЭЖК	Массовая доля МЭЖК в жировой фазе, %						Молочный жир по ГОСТ [6]
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	
C 4:0	–	–	–	1,24*	2,44*	1,25*	2,4–4,2*
C 6:0	–	–	–	0,96*	1,81*	0,94*	1,5–3,0*
C 8:0	–	–	0,09*	0,65*	1,19*	0,68*	1,0–2,0*
C 10:0	–	–	0,09*	1,65*	2,91*	1,61*	2,0–3,8*
C 10:1	–	–	–	0,14*	0,25*	0,11*	0,2–0,4*
C 12:0	0,21*	0,28*	1,14*	2,05*	3,52*	2,55*	2,0–4,4*
C 14:0	0,72*	0,86*	1,21*	7,21*	10,68*	6,27*	8,0–13,0*
C 14:1	–	–	–	0,94*	1,14*	0,59*	0,6–1,5*
C 16:0	32,75*	36,47*	36,55*	29,14*	30,21*	31,46*	21,0–33,0*
C 16:1	0,13*	0,12*	0,12*	2,20*	1,81*	1,05*	1,5–2,4*
C 18:0	5,71*	4,72*	4,75*	15,24*	10,15*	7,39*	8,0–13,5*
C 18:1 (в т.ч. trans)	37,45* (0,08*)	38,91* (0,84*)	36,47* (0,34*)	31,55* (2,00*)	27,00* (2,39*)	31,36* (1,36*)	20,0–32,0*
C 18:2 (в т.ч. trans)	21,54* (0,47*)	17,71* (0,45*)	18,61* (0,39*)	3,41* (0,05*)	3,30* (0,05*)	12,23* (0,27*)	2,2*–5,5*
C 18:3 (в т.ч. trans)	0,19* (0,05*)	0,10* (0,01*)	0,12* (0,01*)	0,36* (0,01*)	0,53* (0,01*)	0,29* (0,01*)	До 1,5*
C20:0	0,40*	0,35*	0,36*	0,45*	0,29*	0,51*	До 0,3*
C22:0	0,56*	0,16*	0,18*	0,03*	0,06*	0,14*	До 0,1*
Прочие	0,34*	0,32*	0,31*	2,78*	2,71*	1,57*	4,0*–6,5*

Примечание: * – границы абсолютной погрешности измерения $= \pm 0,4$; + – границы абсолютной погрешности измерения $= \pm 2,2$

Таким образом, изученные образцы не образуют репрезентативную выборку для изучаемой группы. Однако выявляют две противоположные тенденции, наблюдаемые в группе. С одной стороны, это фальсификация, обусловленная стоимостью на грани рентабельности. С другой стороны, есть производители, способные выпускать качественный продукт в низкой ценовой категории.

Формирование репрезентативной выборки для масложировой продукции низкой ценовой категории пока остается дискуссионным вопросом. Качество поступающего на перерабатывающее предприятие молока, сезонные факторы, финансово-экономическая политика каждого конкретного производителя и человеческий фактор сотрудников, работающих на производстве, делают систему слишком сложной. Вполне можно допустить, что даже в рамках одной торговой марки одного и того же производителя от партии к партии могут наблюдаться существенные отклонения в качестве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований установили, что образцы сливочного масла низкой ценовой категории, отобранные в розничных торговых сетьях и на рынке г. Казани, по показателям безопасности отвечали установленным требованиям НД на данный вид продукции. При изучении органолептических показателей отметили, что образцы масла № 2 и № 3 не соответствовали требованиям для масла высшего сорта. В целом, образцы не имели существенных отклонений, и фактические результаты органолептического исследования указывают на то, что данную продукцию можно употреблять в пищу.

Однако после обобщения полученных результатов по жирнокислотному составу оказалось, что образцы № 1, № 2, № 3, № 4 и № 6 представ-

ляют собой растительно-жировые и растительно-сливочные спреды и относятся к фальсифицированной масложировой продукции, а, значит, не могут называться «сливочным маслом». Только образец № 5 по жирнокислотному составу является натуральным сливочным маслом, изготовленным из коровьего молока по ГОСТ 32261-2013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Совершенствование лабораторного контроля сливочного масла / И.Г. Серегин [и др.] // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. 2019. Т. 14, № 2. С. 170–187. doi 10.22363/2312-797X-2019-14-2-170-178.
- Оценка уровня фальсификации сливочного масла, представленного на рынке Республики Казахстан / Ю.А. Синявский [и др.] // Пищевая промышленность. 2021. № 2. С. 25–29. doi 10.24412/0235-2486-2021-2-0013.
- Веретнова О.Ю., Палаткина П.Д. Анализ микробиологической безопасности сливочного масла региональных производителей // Вестник КрасГАУ. 2022. № 4. С. 120–126. doi 10.36718/1819-4036-2022-4-120-126.
- Сравнительная характеристика качества сливочно-го масла производителей Оренбургской области / М.В. Ди-дых [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 5 (97). С. 228–232.
- Сравнительная ветеринарно-санитарная экспертиза молока разных производителей / В.И. Кляпнев [и др.] // Ветеринарный врач. 2021. № 5. С. 16–24. doi 10.33632/1998-698X.2021-5-16-24.
- ГОСТ 32261-2013. Масло сливочное. Технические условия : введ. 2015-07-01. Москва, 2019. 23 с.
- ТР ТС 033/2013. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности молока и молочной продукции» : принят решением Комиссии Таможенного союза от 9 октября 2013 года № 67. Москва : Изд-во стандартов, 2013. 192 с.
- Павлова Ж.П., Парфенова Т.В. Что мы знаем о сливочном масле? // Вестник ТГЭУ. 2004. № 1. С. 101–104.
- ГОСТ 30711-2001. Продукты пищевые. Методы выявления и определения содержания афлатоксинов B1 и M1 : введ. 2002-07-01. Москва, 2001. 16 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ СЛИВОЧНОГО МАСЛА НИЗКОЙ ЦЕНОВОЙ КАТЕГОРИИ НА НЕКОТОРЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

10. ГОСТ 23452-2015. Молоко и молочные продукты. Методы определения остаточных количеств хлорогеннических пестицидов : введ. 2016-07-01. Москва, 2016. 17 с.

11. ГОСТ 31694-2012. Продукты пищевые, продовольственное сырье. Метод определения остаточного содержания антибиотиков тетрациклиновой группы с помощью высокоспецифической жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектором: введ. 2013-07-01. Москва, 2013. 29 с.

12. ГОСТ 32915-2014. Молоко и молочная продукция. Определение жирнокислотного состава жировой фазы методом газовой хроматографии : введ. 2016-01-01. Москва, 2015. 12 с.

13. ГОСТ 31754-2012. Масла растительные, жиры животные и продукты их переработки. Методы определения масловой доли трансизомеров жирных кислот: введ. 2013-07-01. Москва, 2014. 27 с.

Информация об авторах

К. Е. Буркин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химического и прецизионного анализа ФГБНУ «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности».

А. Г. Мухамметшина – младший научный сотрудник лаборатории физико-химического и прецизионного анализа ФГБНУ «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности».

А. З. Мухарлямова – научный сотрудник лаборатории физико-химического и прецизионного анализа ФГБНУ «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности».

М. В. Балымова – младший научный сотрудник испытательной лаборатории ветеринарных препаратов ФГБНУ «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности».

А. М. Сайфутдинов – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-химического и прецизионного анализа ФГБНУ «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности».

С. Л. Моктарова – младший научный сотрудник лаборатории физико-химического и прецизионного анализа ФГБНУ «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности».

REFERENCES

1. Seregin, I.G., Nikitchenko, D.V., Leontiev, L.B. & Akulich, O.A. (2019). Improvement of laboratory control of butter. *RUDN journal of agronomy and animal industries*, (2), 170-187. (In Russ). doi 10.22363/2312-797X-2019-14-2-170-178.
2. Sinyavsky, Yu.A., Yakunin, A.V., Tuigunov, D.N., Sharipbaeva, A.Sh. & Yerezhepov, A.E. (2021). Assessment of the level of falsification of butter presented on the market of the Republic of Kazakhstan. *Food industry*, (2), 25-29. (In Russ). doi 10.24412/0235-2486-2021-2-0013.
3. Veretnova, O.Yu. & Palatkina, P.D. (2022). Analysis of microbiological safety of butter from regional producers. *Bulletin of KSAU*, (4), 120-126. (In Russ). doi 10.36718/1819-4036-2022-4-120-126.

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

Статья поступила в редакцию 02 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 02 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

4. Didyk, M.V., Soboleva, N.V., Pochapskaya, V.V., Baymukhambetov, R.K., Dikunov, K.A. (2022). Comparative characteristics of butter quality manufacturers of the Orenburg region. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 97(5), 228-232. (In Russ).

5. Klyapnev, A.V., Velikanov, V.I., Yankovskaya, M.O., Pogodina, A.V., Klyapnev, N.V. (2021). Comparative veterinary-sanitary examination of milk from different producers. *Vetvach*, (5), 16-24. (In Russ). doi 10.33632/1998-698X.2021-5-16-24.

6. Butter. Specifications. (2019). ГОСТ 32261-2013 from 1 Jul. 2016. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

7. Technical regulations of the Customs Union. About the safety of milk and dairy products. (2013). TRTS No. 033/2013 from 9.10.2013. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

8. Pavlova, J.P., Parfenova, T.V. (2004). What do we know about butter? *Bulletin of the Pacific State University*, (1), 101-104. (In Russ).

9. Food-stuff's. Methods for detection and determination of aflatoxins B1 and M1. (2001). ГОСТ 30711-2001 from 1 Jul. 2002. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

10. Milk and milk products. Methods for determination of the chlororganic pesticides residues. (2016). ГОСТ 23452-2015 from 1 Jul. 2016. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

11. Food products, food raw materials. Method of determination of the antibiotic residues of tetracycline group by High Performance Liquid Chromatography - Mass Spectrometry. (2013). ГОСТ 31694-2012 from 1 Jul. 2013. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

12. Milk and milk products. Determination of fatty acid content by gas chromatography method. (2015). ГОСТ 32915-2014 from 1 Jan. 2016. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

13. Vegetable oils, animal fats and products of their processing. Methods for determination of the content of trans fatty acid isomers. (2014). ГОСТ 31754-2012 from 1 Jul. 2013. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

Information about the authors

K.E. Burkin - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Physico-chemical and Precision Analysis of Federal Center for Toxicological, Radiation, and Biological Safety.

A.G. Mukhammetshina - Junior Researcher at the Laboratory of Physico-chemical and Precision Analysis of Federal Center for Toxicological, Radiation, and Biological Safety.

A.Z. Mukharlyamova - Researcher at the Laboratory of Physico-chemical and Precision Analysis of Federal Center for Toxicological, Radiation, and Biological Safety.

M.V. Balyanova - Junior Researcher at the at the Veterinary Drugs Testing Laboratory of Federal Center for Toxicological, Radiation, and Biological Safety.

A.M. Saifutdinov - Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Physico-chemical and Precision Analysis of Federal Center for Toxicological, Radiation, and Biological Safety.

S.L. Mokhtarova - Junior Researcher at the Laboratory of Physico-chemical and Precision Analysis of Federal Center for Toxicological, Radiation, and Biological Safety.



ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КИСЛОМОЛОЧНОГО ДЕСЕРТА НА ОСНОВЕ КОЗЬЕГО МОЛОКА

Ольга Кусаиновна Зарифулина ¹, Нина Владимировна Бураковская ²,
Елена Александровна Молибога ³

^{1, 2, 3} Омский государственный технический университет, Омск, Россия

¹ zarifulinao@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0390-8538>

² burakovskaya-nina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9419-6731>

³ mea130980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7226-5962>

Аннотация. В настоящее время интерес потребителя к козьему молоку, а также продуктам на его основе активно растет. Это обусловлено уникальным химическим составом данного сырья. Козье молоко отличается низкой аллергенностью, содержит в своем составе белок (3,2 %), жир (4,2 %), углеводы (лактозу) (4,5 %), минеральные вещества (0,8 %). На Российском потребительском рынке молочных продуктов в последнее время отмечается рост объемов производства, что требует от производителей поиска новых решений по расширению ассортимента продукции. Важным требованием является качество и безопасность выпускаемой продукции, в том числе продукции, обладающей функциональной направленностью. Именно систематический идентификационный контроль за производственными процессами позволит повлиять на качество и безопасность готовой продукции. В результате проведенных исследований разработана детализированная блок-схема технологического процесса производства кисломолочного десерта на основе козьего молока, обоснованы операционные точки, в которых необходим контроль режимов для предупреждения рисков. Проведен анализ потенциальных опасных факторов в разрезе основного этапа технологического процесса – пастеризации. Определены критические контрольные точки (ККТ) технологического процесса, а также установлены критические пределы ККТ процесса. Для управления рисками при производстве продукта выявлены пять критических контрольных точек на этапах приемки и входного контроля сырья, пастеризации, розлива и упаковки в потребительскую тару, хранения, отгрузки готового продукта. Определены основные показатели качества и безопасности продукта, а также разработана модель управления качеством при производстве кисломолочного десерта на основе козьего молока.

Ключевые слова: молочные десерты, ХАССП, технологический процесс, управление рисками, диапазоны отклонений, корректирующие действия, критические контрольные точки, модель управления качеством.

Для цитирования: Зарифулина О. К., Бураковская Н. В., Молибога Е. А. Обеспечение безопасности при производстве кисломолочного десерта на основе козьего молока // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 40–45. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.006. EDN: <https://elibrary.ru/POGZLW>.

Original article

SAFETY ASSURANCE IN PRODUCTION OF SOUR-MILK DESSERTBASED ON GOAT'S MILK

Olga K. Zarifulina ¹, Nina V. Burakovskaya ², Elena A. Moliboga ³

^{1, 2, 3} Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹ zarifulinao@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0390-8538>

² burakovskaya-nina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9419-6731>

³ mea130980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7226-5962>

Abstract. Currently, consumer interest in goat milk and products based on it is actively growing. This is due to the biological properties of this type of milk. Goat milk is less allergenic, contains protein (3.2 %), fat (4.2 %), carbohydrates (lactose) (4.5 %), minerals (0.8 %). The Russian consumer market of dairy products has recently seen an increase in production volumes, which requires manufacturers to find new solutions to expand the range of products. An important requirement is the quality and safety of manufactured products, including products with functional orientation. It is the systematic identification control over production processes that will affect the quality and safety of finished products. As a result of the conducted research a detailed flow chart of the technological process of production of sour-milk dessert on the basis of goat's milk is developed, operational points in which it is necessary to control the modes to prevent risks are justified. The analysis of potential hazards in the context of the main stage of the technological process - pasteurization. Critical control points of the technological process were determined, and critical limits of the process CCPs were established. Five critical control points at the stages of acceptance and incoming control of raw materials, pasteurization, filling and packing into consumer containers, storage, shipment of the finished product were identified for

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КИСЛОМОЛОЧНОГО ДЕСЕРТА НА ОСНОВЕ КОЗЬЕГО МОЛОКА

risk management in the production of the product. The main indicators of product quality and safety are determined, and a model of quality management in the production of sour-milk dessert based on goat's milk is developed.

Keywords: *dairy desserts, HACCP, process, risk management, deviation ranges, corrective actions, critical control points, quality management model.*

For citation: Zarifulina, O. K., Burakovskaya, N. V. & Moliboga, E. A. (2025). Safety assurance in production of sour-milk dessert based on goat's milk. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 40-45. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.006. EDN: <https://elibrary.ru/POGZLW>.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими приоритетами Российской Федерации остаются обеспечение безопасности продовольствия, разработка, а также внедрение системы управления качеством. Данные задачи отражены в Стратегии повышения качества пищевой продукции в России до 2030 года. Именно такой подход позволяет обеспечить повышение качества жизни населения. Поддержка иммунного статуса населения однозначно производится за счет выпуска функциональных продуктов питания, которые обладают более мощным эффектом за счет рецептурно-композиционной части продукта. Одним из таких продуктов является козье молоко, которое благодаря своим уникальным характеристикам, становится всё более популярным на мировом рынке.

Производство козьего молока находится на третьем месте после коровьего и буйволиного. Лидерами по производству козьего молока в мире являются страны Азии (58,9 %): Индия, Бангладеш, Судан, где за последние 10 лет производство козьего молока увеличилось на 21,3 %. Среди европейских стран наибольшее количество козьего молока производят в Греции, Франции, Испании, где традиционной популярностью пользуется козий сыр [1].

Козье молоко, обладая уникальными питательными свойствами, становится все более популярным в молочной промышленности, что подтверждается многочисленными исследованиями ученых [2–5]. Его состав отличается высоким содержанием белка, кальция, фосфора, витаминов группы В и полиненасыщенных жирных кислот, что делает данный продукт ценным как для детского, так и для взрослого питания.

Перспективным направлением является разработка кисломолочного десерта на основе козьего молока, который обладает заданными показателями качества, окислительно-восстановительным потенциалом основного сырья, функциональной значимостью и органолептической привлекательностью.

В связи с высоким уровнем фальсификации молочной продукции на российском рынке, актуальным и своевременным является внедрение системы менеджмента качества для контроля процесса производства готовой продукции.

Концепция, позволяющая выявлять риски и управлять опасными факторами в производстве, доказала свою эффективность и является обязательной для всех видов продукции на любом предприятии [6–8].

Цель исследования заключается в разработке модели управления качеством при производстве кисломолочного десерта на основе принципов ХАССП. В работе обоснован выбор критических контрольных точек (ККТ), а также установлены критические пределы ККТ процесса.

МЕТОДЫ

Работа выполнена на кафедре «Биотехнология, технология общественного питания и товароведения» ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Объектом исследования является кисломолочный десерт на основе козьего молока, технологический процесс производства, система менеджмента безопасности пищевых продуктов.

Определение ККТ и анализ опасных факторов, влияющих на безопасность кисломолочного десерта, проведено с использованием метода «Дерево принятия решения».

Основными методами исследований выступают аналитические, сравнительные, статистические.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Козье молоко обладает уникальным химическим составом, который делает его ценным источником питательных веществ [9].

Химический состав и энергетическая ценность козьего молока представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав и энергетическая ценность козьего молока

Table 1 – Chemical composition and energy value of goat milk

Показатель	Значение
Белки, г	3,2
Жиры, г	4,2
Углеводы (лактоза), г	4,5
Минеральные вещества, г	0,8
Энергетическая ценность, ккал	68,0

Данные химического анализа указывают на высокое содержание в козьем молоке белка (3,2 %), жира (4,2 %), углеводов (4,5 %), что в целом согласуется с результатами биохимических исследований других авторов [4, 5, 10]. В рамках выполнения работы проведено исследование технологического процесса производства кисломолочного десерта на основе козьего молока.

В рецептуру кисломолочного десерта входило (мас., %): молоко козье 3,2 % жирности – 75,095; пищевое волокно «Цитри-Фай» – 0,5; наполнитель пастеризованный «абрикос-морковь» – 2,0; экстракт боярышника сухой – 0,5; 1 % водный раствор желатина пищевого – 15,4; сахар-песок – 5,5; лиофилизированная концентрированная заквасочная культура прямого внесения (DVI) «YO-MIX 401 LYO 100 DCU», содержащая смесь штаммов вида *Streptococcusthermophilus* и *Lactobacillusdelbrueckii* subsp. *Bulgaricus* – 1,0.

Для выработки кисломолочного десерта на основе козьего молока определены основные потенциально-опасные факторы на соответствующих этапах изготовления, изучены три основных фактора потенциального загрязнения продукции:

- биологический (контроль бактерий группы кишечной палочки (БГКП), *E.coli*, *S.aureus*, дрожжи, патогенные микроорганизмы);
- химический (контроль антибиотиков, промышленных химикатов, преднамеренно добавленных химикатов и т.д.);
- физический (контроль наличия предметов, которые в нормальных условиях не должны присутствовать в продукте);
- аллергены (согласно ТР ТС 022/2011 «Пищевая продукция в части ее маркировки» (п. 4.4) [11].

Таблица 2 – Анализ потенциальных опасностей на этапе пастеризации
Table 2 – Analysis of potential hazards at the pasteurization stage

Этап	Тип опасности	Вид опасности	Характеристика опасного фактора	Управляющее воздействие
Контроль пастеризации	Биологический	Микроорганизмы, патогенная микрофлора	- Несоблюдение параметров температуры; - Несоблюдение времени выдержки; - Нарушение санитарно-гигиенических правил при проведении мойки и дезинфекции оборудования	Строгое соблюдение параметров и времени пастеризации, своевременное техническое обслуживание оборудования, санитарная обработка на предприятии, ведение журнала контроля эффективности пастеризации, а также чек-листов осмотра состояния оборудования и инвентаря
	Химический	Остатки моющих и дезинфицирующих средств	- Попадание в продукт с оборудования, при нарушении режимов мойки и дезинфекции	
	Физический	Посторонние включения неорганического происхождения (металлопримеси, волосы, ювелирные украшения и т.д.)	- Нарушение санитарно-гигиенических правил при проведении мойки и дезинфекции оборудования и инвентаря; - Попадание в продукцию посторонних предметов (пластика, металла, ювелирных украшений, стекла и т.д.)	

На следующем этапе были выявлены критические контрольные точки (ККТ) технологического процесса, и для каждой ККТ определены критические пределы допустимых измерений:

- ККТ 1 – на этапе приемки и входного контроля сырья. Контроль за качеством входного сырья осуществляется по микробиологическим и физико-химическим показателям, а также условиям его транспортировки и сопровождающей документации. Данные отражаются в журнале входного контроля. Вероятность появления рисков определяется поставкой некачественного сырья, не отвечающего требованиям нормативных документов. Сырье не-надлежащего качества возвращается поставщику.

- ККТ 2 – пастеризация. Непостоянная или недостаточная температура жидкости в резервуаре может возникать из-за неэффективного контроля процесса пастеризации при отсутствии автоматизированного управления. При нарушении режима пастеризации в продукте может сохраниться патогенная микрофлора, поэтому тяжесть последствий на данном этапе значительна. В продукте не допускается наличие микроорганизмов БГКП в нормируемом объеме. Данные отражаются в журнале контроля эффективности пастеризации.

- ККТ 3 – на этапе разлива и упаковки в потребительскую тару. Контроль за функционированием устройства для упаковки потребительских единиц в стаканчики. Такой риск может возникнуть при возникновении неисправностей в работе машины. Степень негативных последствий может быть устранена незамедлительно после их выявления путем корректировки работы упаковочного

Для каждого потенциально-опасного фактора оценивали риск и вероятность реализации. Анализ опасностей в разрезе основного этапа технологического процесса – пастеризация, представлен в таблице 2.

Для каждого предприятия, осуществляющего производство молочных продуктов, первостепенным является проведение анализа опасностей, определение критических контрольных точек и установление контроля всех рисков.

устройства. Необходимые данные отражаются в журнале допуска продукции к фасовке.

- ККТ 4 – на этапе хранения готовой продукции. Риск возникает при несоблюдении температуры и условий хранения готового молочного десерта. Техническими условиями установлена температура (+4±2) °C, относительная влажность (φ) в помещении не более 75 %. Недопустимым является попадание прямых солнечных лучей на готовый продукт. Данные по контролю данного этапа отражаются в журнале контроля качества готовой продукции при закладке на хранение.

- ККТ 5 – на этапе отгрузки готового продукта. На данном этапе осуществляется контроль на соответствие нормативным документам, в том числе контроль микробиологических, физико-химических, органолептических показателей. При получении отрицательного значения хотя бы по одному показателю составляется акт и ставится вопрос об утилизации.

Исходя из установленных опасных факторов, разработана блок-схема контроля технологического процесса изготовления кисломолочного десерта на основе козьего молока, представленная на рисунке 1.

Для выработки кисломолочного десерта на основе козьего молока сформированы технические условия и технологические инструкции с подробным описанием технологического процесса, состава, транспортировки, упаковки.

В результате была создана модель управления качеством, которая позволяет осуществлять контроль над процессом производства кисломолочного десерта, которая представлена на рисунке 2.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КИСЛОМОЛОЧНОГО ДЕСЕРТА НА ОСНОВЕ КОЗЬЕГО МОЛОКА

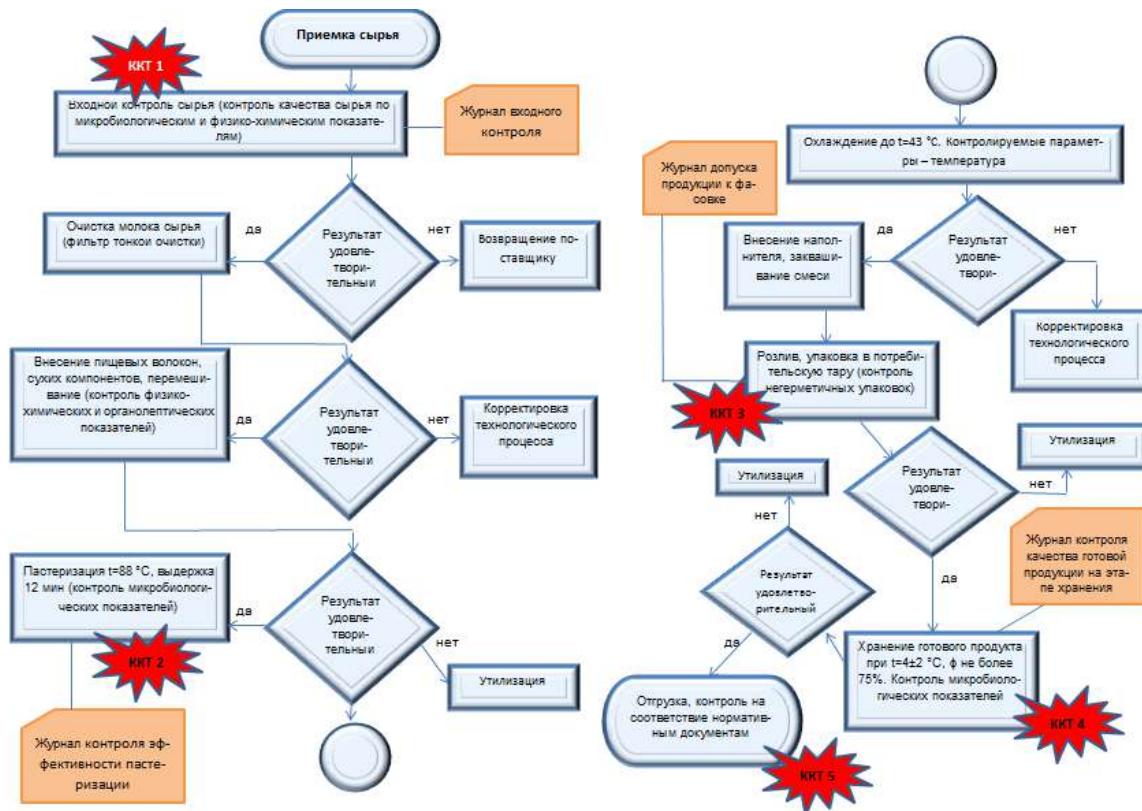


Рисунок 1 – Блок-схема технологического процесса производства кисломолочного десерта на основе козьего молока

Figure 1 – Block diagram of the technological process of production of sour-milk dessert on the basis of goat's milk

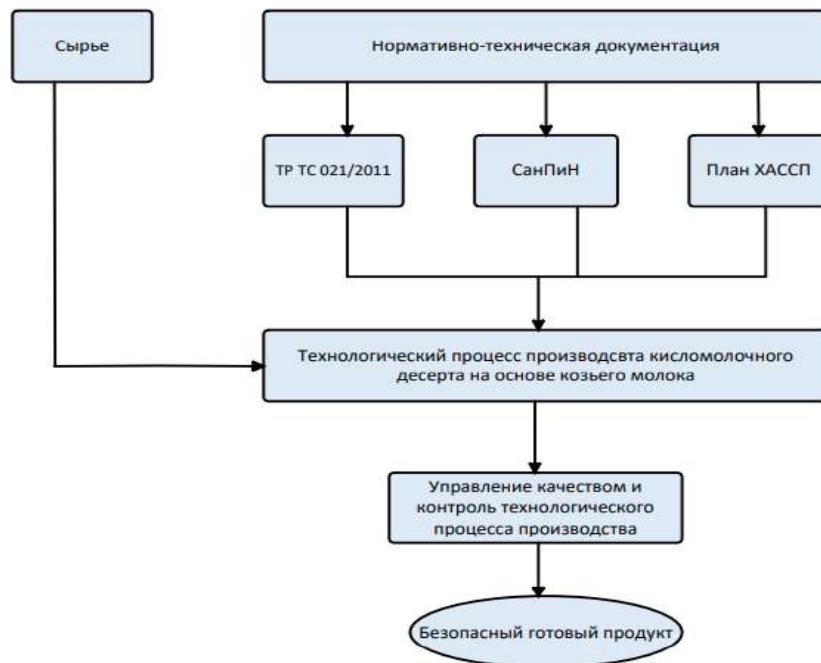


Рисунок 2 – Модель управления качеством при производстве кисломолочного десерта на основе козьего молока

Figure 2 – Model of quality management in the production of sour-milk dessert based on goat milk

Разработанная модель показывает входные потоки сырья, технологический процесс производства в соответствии с нормативно-технической документацией, позволяет управлять качеством и контролировать процесс производства, что обеспечивает выработку безопасного готового продукта.

На разработанную технологию производства кисломолочного десерта получено решение о выдаче патента «Способ получения кисломолочного десерта на основе козьего молока», заявка 2024115404/10 от 05.06.2024 г. (034680). Отработка системы менеджмента качества при выработке десерта на основе козьего молока произведена на КПОО «Центр питательных смесей», г. Омск.

ВЫВОДЫ

С целью производства кисломолочного десерта на основе козьего молока, отвечающего высоким стандартам качества, был проведен анализ технологического процесса производства данного десерта, а именно:

1. Идентифицированы основные потенциально опасные факторы: биологический, физический, химический, в том числе аллергены.

2. При анализе технологического процесса производства выявлены 5 критических контрольных точек, которые являются ключевыми элементами в системе ХАССП: приемка и входной контроль сырья (ККТ-1), пастеризация (ККТ-2), разлив, упаковка в потребительскую тару (ККТ-3), хранение готовой продукции (ККТ-4) и отгрузка сырья (ККТ-5).

3. Проведен анализ потенциальных опасностей на этапе пастеризации (ККТ-2), дана характеристика опасных факторов на данном этапе производства, а также определены управляющие воздействия.

4. Разработана блок-схема технологического процесса производства кисломолочного десерта, модель управления качеством.

Практическая значимость предложенных результатов заключается в их применении при внедрении системы ХАССП, которая используется предприятием для оптимального управления безопасностью и качеством кисломолочного десерта на всех стадиях процесса производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные технологии в молочном козоводстве / М.Ю. Санников [и др.] // Известия ТСХА.2019. Вып. 6. С. 141–149. <https://doi.org/10.34677/0021-342x-2019-6-141-149>.

2. Оценка возможности использования козьего и овечьего молока в производстве йогуртов / А.Б. Оспанов [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 1. С. 154–159. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.020>.

3. Технологические аспекты разработки взбитого молочного продукта / А.Ю. Золотин [и др.] // Пищевая промышленность. 2024. № 6. С. 26–30. DOI: 10.52653/PP1.2024.6.6.005.

4. Чернопольская Н.Л., Гаврилова Н.Б., Тимербаева М.В. Перспективы производства специализированных пищевых продуктов на основе

козьего молока // Пищевая промышленность. 2019. № 8. С. 44–47. DOI: 10.24411/0235-2486-2019-10125.

5. Перспективное направление развития молочной промышленности Казахстана: получение и переработка молока мелкого рогатого скота / А.Б. Оспанов [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 4. С. 41–46. doi : 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.006.

6. Кравченко С.Н., Резниченко И.Ю. Управление рисками в производстве витаминизированных завтраков сухих готовых // Ползуновский вестник. 2024. № 3. С. 121–127. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.018.

7. Awuchi C.G. (2023). HACCP, quality, and food safety management in food and agricultural systems. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2176280. DOI: 10.1080/23311932.2023.2176280.

8. Motarjemi, Y. & Warren, B.R. (2023). Hazard analysis and critical control pointsystem (HACCP). In *Food safety management*, 799–818. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13340>.

9. Технология производства десертов на основе козьего молока / Макеева Р.К. [и др.] // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. 2024. № 2(14). С. 288–298. [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2\(14\)-35](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2(14)-35).

10. Оспанов А.Б. Исследование физико-химического состава и технологических свойств овечьего и козьего молока в летний период лактации // Хранение и переработка сельхозсырья. 2021. № 2. С. 64–74. <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.237>.

11. ТР ТС 022/2011. Технический регламент таможенного союза «Пищевая продукция в части ее маркировки» : принят решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 881. Москва : Изд-во стандартов, 2011. 29 с.

Информация об авторах

О. К. Зарифулина – аспирант ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», направление исследований 4.3.5. – Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ.

Н. В. Бураковская – кандидат технических наук, доцент кафедры Биотехнологии, технологии общественного питания и товароведения ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Е. А. Молибога – доктор технических наук, профессор кафедры Биотехнологии, технологии общественного питания и товароведения ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет».

REFERENCES

1. Sannikov, M.Yu., Novopashina, S.I., Khatabayev, S.A., Grigoryan, L.N., Yuldashbayev, Y.A., Lastochkina, O.L. & Lukin, I.I. (2019). Modern technologies in dairy goat breeding *Izvestiya TSKhA*. (6).

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КИСЛОМОЛОЧНОГО ДЕСЕРТА НА ОСНОВЕ КОЗЬЕГО МОЛОКА

141-149. (In Russ.). <https://doi.org/10.34677/0021-342x-2019-6-141-149>.

2. Ospanov, A.B., Shchetinina, E.M., Veliamov S.M. & Makeeva, P.K. (2022). Evaluation of the possibility of using goat and sheep milk in yoghurt production. *Polzunovskiy Vestnik*, 1(4), 154-159. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.020>.

3. Zolotin, A.Y., Simonenko, S.V., Simonenko, E.S., Begunova, A.V. & Semenova, E.S. (2024). Technological aspects of the development of whipped milk product. *Food industry*. (6). 26-30. (In Russ.). DOI: 10.52653/PPI.2024.6.6.005.

4. Chernopolskaya, N.L., Gavrilova, N.B. & Temerbaeva, M.V. (2019). Prospects for the production of specialized food products based on goat milk. *Food Industry*. (8). 44-47. (In Russ.). DOI: 10.24411/0235-2486-2019-10125.

5. Ospanov, A.B., Shchetinina, E.M., Kulzhanova, B.O. & Makeeva, R.K. (2021). Prospective direction of development of the dairy industry of Kazakhstan: production and processing of little cattle milk. *Polzunovskiy Vestnik*, (4), 41-46. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.006.

6. Kravchenko, C.H. & Reznichenko, I.Yu. (2024). Risk management in production of vitaminized breakfast powders. *Polzunovskiy Vestnik*, (3), 121-127. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.018>.

7. Awuchi, C.G. (2023). HACCP, quality, and food safety management in food and agricultural systems. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2176280. DOI: 10.1080/23311932.2023.2176280.

8. Motarjemi, Y. & Warren, B.R. (2023). Hazard analysis and critical control point system (HACCP). In *Food safety management*, 799-818. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13340>.

9. Makeeva, R.K., Tlevlevlesova, D.A. Ginoyan, L.L., Abraimov, N.T. & Sansyzbayev, B.S. (2024). Technology of production of deserts on the basis of goat milk. *Bulletin of Shakarim University. Series of technical sciences*. 2(14), 288-298. (In Russ.). [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2\(14\)-35](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2024-2(14)-35).

10. Ospanov, A.B. (2021). Study of physical and chemical composition and technological properties of sheep and goat milk in the summer period of lactation. *Storage and processing of agricultural raw materials*, (2), 64-74. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.237>.

11. Technical Regulations of the Customs Union. Food products in terms of their labeling. (2011). TRTS № 022/2011 of December 9, 2011. № 881. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

Information about the authors

O.K. Zarifulina - Postgraduate student of FGAOU VO "Omsk State Technical University", Research area 4.3.5. - Biotechnology of food products and biologically active substances biologically active substances.

N.V. Burakovskaya - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Catering Technology and Commodity Science of the Omsk State Technical University.

E.A. Moliboga - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Biotechnology, Catering Technology and Commodity Science, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education "Omsk State Technical University".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.007

EDN: WJFMUZ

ФОРМИРОВАНИЕ БАКТЕРИОСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПИЩЕВОЙ БИОДЕГРАДИРУЕМОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ РЫБНОГО КОЛЛАГЕНА

Олеся Сергеевна Якубова ¹, Лидия Николаевна Вострикова ²,
Светлана Владимировна Еремеева ³, Аделя Адлеровна Кушбанова ⁴

^{1, 2, 3, 4} ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, Россия

¹ o.c.yakubova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2489-8041>

² lida.vostrikova.00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1324-759X>

³ eremeevasv71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5112-9101>

⁴ abaygalieva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5429-6693>

Аннотация. Упаковочные решения для хранения охлажденной продукции животного происхождения является активно развивающимся и востребованным нововведением в пищевой индустрии. Разработка и формирование бактериостатических свойств упаковочных материалов на основе природных биополимеров с высокими барьерными функциями – актуальное направление исследований. Цель работы – изучение свойств пленки на основе пищевого рыбного высокомолекулярного коллагена (рыбного желатина) с целью использования в качестве барьерного вкладыша (подложки) для обеспечения сохранения качества и товарного вида мясной продукции. В работе применены стандартные, регламентированные общепринятые и специальные методы. Определены органолептические и физические характеристики разработанной пищевой биодеградируемой пленки, установлены положительные структурно-механические и технологические свойства. Установлено, период хранения биодеградируемой пленки в сухой агрегатной форме с сохранением органолептических, физико-химических показателей качества, а также безопасности согласно ТР ТС 021/2011 составляет 200 суток при температуре воздуха не выше 25 °C и относительной влажности воздуха не более 70 %. Использование пищевой биодеградируемой пленки в качестве подложки позволяет подавлять активное развитие микроорганизмов в течение 3-х и 5-ти суток в зависимости от наличия консервантов, что способствует сохранности охлажденных мясных полуфабрикатов. Использование водного раствора бензоата натрия и низина в концентрации 0,5 г и 0,001 г на 100 г позволяет продлить срок хранения мясных полуфабрикатов до 5 суток. Даны рекомендации с учетом значения КМАФАМ по срокам хранения для различных охлажденных мясных полуфабрикатов с использованием подложки на основе биодеградируемой пленки с рыбным желатином при температуре не выше +5 °C.

Ключевые слова: биотехнология, коллагеновые биополимеры, рыбный коллаген, рыбный желатин, биодеградируемая пленка, пищевая индустрия, продукция мясной промышленности, полуфабрикаты мясные.

Благодарности. Данная научно-исследовательская работа выполнена при финансовой поддержке грантодателя Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере («Фонд содействия инновациям») в рамках договора № 18575ГУ/2023 от 24.08.2023 г.

Для цитирования: Якубова О. С., Вострикова Л. Н., Еремеева С. В., Кушбанова А. А. Формирование бактериостатических свойств пищевой биодеградируемой пленки на основе рыбного коллагена // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 46–52. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.007. EDN: <https://elibrary.ru/WJFMUZ>.

Original article

FORMATION OF BACTERIOSTATIC PROPERTIES OF FOOD BIODEGRADABLE FILM BASED ON FISH COLLAGEN

Olesya S. Yakubova ¹, Lidiya N. Vostrikova ², Svetlana V. Eremeeva ³,
Adelya A. Kushbanova ⁴

^{1, 2, 3, 4} Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

¹ o.c.yakubova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2489-8041>

² lida.vostrikova.00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1324-759X>

³ eremeevasv71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5112-9101>

⁴ abaygalieva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5429-6693>

Abstract. Packaging solutions for storage of chilled products of animal origin is an actively developing and demanded innovation in the food industry. Development and formation of bacteriostatic properties of packaging materials

© Якубова О. С., Вострикова Л. Н., Еремеева С. В., Кушбанова А. А., 2025

ФОРМИРОВАНИЕ БАКТЕРИОСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПИЩЕВОЙ БИОДЕГРАДИРУЕМОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ РЫБНОГО КОЛЛАГЕНА

based on natural biopolymers with high barrier functions is an actual direction of research. The aim of the work is to study the properties of the film based on food fish high-molecular collagen (fish gelatin) in order to use it as a barrier liner (substrate) to ensure the preservation of quality and commercial appearance of meat products. Standard, regulated common and special methods were applied in the work. Organoleptic and physical characteristics of the developed food biodegradable film have been determined, positive structural-mechanical and technological properties have been established. It has been established that the storage period of biodegradable film in dry aggregate form with preservation of organoleptic, physico-chemical quality and safety parameters according to TP TC 021/2011 is 200 days at air temperature not higher than 25 °C and relative air humidity not more than 70 %. The use of food biodegradable film as a substrate allows to suppress the active development of microorganisms during 3 and 5 days depending on the presence of preservatives, which contributes to the safety of chilled meat semi-finished products. The use of aqueous solution of sodium benzoate and nisin in concentration of 0,5 g and 0,001 g per 100 g allows to prolong the shelf life of meat semi-finished products up to 5 days. Recommendations are given taking into account the value of CMAFANM on storage time for various chilled meat semi-finished products with the use of a substrate based on biodegradable film with fish gelatin at a temperature not higher than +5 °C.

Keywords: biotechnology, collagen biopolymers, fish collagen, fish gelatin, biodegradable film, food industry, meat industry products, semi-finished meat products.

Acknowledgements. This research work was performed with the financial support of the grantor of the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in the Scientific and Technical Sphere («Foundation for Assistance to Innovations»), under the contract No. 18575GU/2023 dated 24.08.2023.

For citation: Yakubova, O.S., Vostrikova, L.N., Eremeeva, S.V. & Kushbanova, A.A. (2025). Formation of bacteriostatic properties of food biodegradable film based on fish collagen. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 46-52. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.007. EDN: <https://elibrary.ru/WJFMUZ>.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного мира и глобальных экологических проблем, обусловленных хозяйственной и производственной деятельностью человека, актуально исследование свойств и процессов получения биодеградируемых материалов, производимых из натурального сырья и имеющих высокую экологичность. Биодеградируемые материалы с использованием нативной полимерной основы отличаются безопасностью, экологичностью, а также высокими значениями функционально-технологических, органолептических и механических свойств, что позволяет сформировать определенные конкурентные преимущества перед химическими синтетическими полимерами.

Создание биодеградируемых пищевых нетоксичных материалов нового поколения с высокими экологическими и барьерными свойствами – актуальная тенденция в условиях глобальных экологических проблем и загрязнения окружающей среды. Такие упаковочные материалы легко утилизируются и способны обеспечить надежную защиту продуктов от вредных факторов [9, 13, 14].

Рыбный коллаген и продукты его переработки, такие как желатин, являются биополимерами. Рыбный желатин пищевой безопасен, органолептически нейтрален, совместим с разными компонентами, обладает способностью к модификации свойств [1, 7, 8]. Биодеградируемые пленки на основе полимерной матрицы коллагена соответствуют современным экологическим требованиям и вырабатываются на основе натурального полимера, который, в свою очередь, получен из вторичных рыбных ресурсов [10, 11]. В связи с этим, коллаген и продукты его переработки могут образовывать композиции с разными веществами и выступать полимерной основой для изготовления биодеградируемых материалов.

Многогранность свойств продукции из коллагена позволяет изготавливать упаковки с разными функциональными свойствами и назначением.

Известны технологии изготовления гладких, тонких и прозрачных пленок из желатина пищевого назначения [13, 14], а также биодеградируемые плёночные композиции медицинского назначения из рыбного желатина [2, 3, 12].

В связи с вышеизложенным, цель настоящего исследования заключается в изучении свойств пленки на основе рыбного желатина, которая используется в качестве вкладыша в основную упаковку для обеспечения сохранения качества и товарного вида полуфабрикатов продуктов в процессе хранения и реализации. Функциональное назначение такой пленки заключается в адсорбировании излишней влаги (мясного сока), отделившейся в процессе хранения охлажденной продукции животного происхождения (в частности, полуфабрикатов из мяса, птицы, субпродуктов) и увеличении сроков хранения такой продукции.

МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования использовали высокомолекулярный коллаген рыбного происхождения – желатин рыбный пищевой по ТУ 20.59.60-002-40749995-2020, изготовленный из вторичных коллагенсодержащих рыбных ресурсов по запатентованной технологии (патент РФ № 2722210, ООО «Биополимер-НЭО», г. Астрахань) [4], пищевой агар (ООО «Айдиго», г. Екатеринбург). Питьевая вода (ГОСТ 32220-2013) была использована в качестве основы при изготовлении растворов пленочных композиций.

Образцы биодеградируемых пленочных композиций получали следующим образом: массу композиционного биополимера (пищевого рыбного желатина и агара) взбивали до образования пены с последующим замораживанием в силиконовых формах при температуре минус 16–18 °C, продолжительность – 10 минут, и высушиванием конвективным способом в сушильном шкафу при температуре 20–24 °C до содержания влаги 16–20 %. Полученная пленка далее подвергалась термической обработке в сушильном шкафу при температуре 140±2 °C, продолжитель-

ность – 20 минут, с последующим охлаждением до комнатной температуры.

Лабораторная материально-техническая база для проведения экспериментальных и аналитических исследований – кафедры «Технология товаров и товароведение», «Прикладная биология и микробиология» ФГБОУ ВО «АГТУ».

Методология проведения исследований включала в себя применение органолептических, микробиологических и статистических методов.

Лабораторным инструментарием для оценки структуры биодеградируемой пленки являлся бинокулярный микроскоп «Биомед 3». При этом для оценки микроструктуры разработанной пленки предварительно подготовили на микротоме срез толщиной 300–500 мкм.

Органолептический анализ проводился с учетом ГОСТ ISO 5492-2014, ГОСТ ISO 11036-2017, ГОСТ 33837-2022. Физические характеристики пленки оценивали с учетом ГОСТ 33837-2022, ГОСТ 25250-2023, ГОСТ 10354-82. Количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (КМА-ФанМ) определяли по ГОСТ 10444.15-94.

Для достоверности результатов экспериментальные данные статистически обрабатывали по общепринятым методикам и алгоритмам анализа при вероятности вывода 90–95 %, аналитические измерения проводили не менее чем в 3-х кратных повторностях, для обработки данных использовали стандартные программы Microsoft Office 2019.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная пищевая биодеградируемая пленка представляет собой пластину белого цвета пористой структуры толщиной 3 мм (рисунок 1) [6].



Рисунок 1 – Внешний вид разработанной пленки

Figure 1 – Appearance of the developed film

Микроструктура разработанной пленки при микроскопическом исследовании в проходящем свете при увеличении в 40 раз представлена на рисунке 2.

На рисунках 1 и 2 видно, что разработанная пищевая биодеградируемая пленка отличается равномерной пористой структурой, представленной в виде пузырьков воздуха в оболочке биополимера. Изображения внешнего вида и микроструктуры термически обработанной пленки (ри-

сунки 1, 2) свидетельствуют о рациональных режимах и параметрах термической модификации в технологии изготовления.

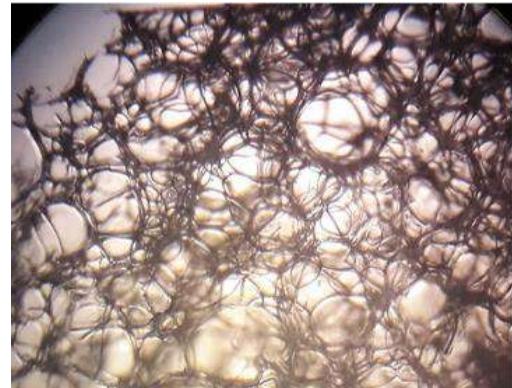


Рисунок 2 – Микроструктура разработанной пленки

Figure 2 – Microstructure of developed film

Готовая пленка отличается эластичностью и плотностью, при этом не скручивается в рулон. Структура пленки позволяет механически делить ее на части в зависимости от заданных геометрических параметров. Для проведения исследований пленку разрезали механическим способом ножницами на пластины разных размерных характеристик в зависимости от размера потребительской упаковки. Далее пленки упаковывали в пакет из полиэтилена плотностью 30 мкм с застежкой zip-lock для обеспечения герметичности и хранили при температуре воздуха не выше 25 °С и относительной влажности воздуха не более 70 %.

Органолептические показатели пленки на основе рыбного коллагена в процессе хранения в сухом виде представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Органолептические показатели пленки на основе рыбного коллагена

Наименование показателя	Значения показателей после суток хранения		
	1	100	200
внешний вид	пористая на поверхности и в разрезе, без посторонних инородных включений, крупных трещин и пустот, без хрупких зон		
цвет	белый, допускается бежевый оттенок		
вкус и запах	нейтральные, отсутствие в составе уксусной кислоты		
текстура	эластичная, пористая		

Из таблицы 1 видно, что предлагаемая пленка обладает эластичностью, пористостью, органолептической нейтральностью. Дефекты внешнего вида отсутствуют. Разработанная биодеградируемая пленка имеет широкую сферу применения для упаковки разных видов пищевой продукции, что обусловлено отсутствием в составе уксусной кислоты и органолептической нейтральностью пленки. Органолептические показатели качества пленки

ФОРМИРОВАНИЕ БАКТЕРИОСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПИЩЕВОЙ БИОДЕГРАДИРУЕМОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ РЫБНОГО КОЛЛАГЕНА

в части внешнего вида, текстуры, цвета, запаха на протяжении всего периода хранения (1; 100 и 200 суток хранения) оставались неизменными.

В таблице 2 представлены физические характеристики биодеградируемой пленки в процессе хранения, характеризующие влагопоглощение и влагостойкость.

Таблица 2 – Физические характеристики пленки на основе рыбного коллагена

Table 2 – Physical characteristics of the film based on fish collagen

Наименование показателя	Значения показателей после суток хранения		
	1	100	200
Толщина, мм	2–3		
pH	5,2		
Плотность (среднее значение), г/см ³	0,161		
Влажность, %	16–20		
Температура и продолжительность растворения в воде	при температуре 2–4 °C в течение 120 часов; при температуре 60±2 °C в течение 40 минут		

Из таблицы 2 видно, что пленка имеет толщину 2–3 мм, которая в совокупности с её пористой структурой позволяет впитывать большое количество жидкости, отделяющейся при ходильном хранении полуфабрикатов. Это способствует сохранению внешнего вида и качества продукции при хранении и реализации. Разработанная биодеградируемая пленка отличается влагостойкостью, что позволяет не растворяться в воде при температуре 2–4 °C в течение 120 часов, при температуре 60±2 °C в течение 40 минут. Физические показатели качества биодеградируемой пленки на протяжении всего периода хранения (1; 100 и 200 суток хранения) не менялись.

Микробиологическая безопасность биодеградируемой пленки в сухом виде представлена в таблице 3. При этом пленка размещалась в герметичной упаковке, условия хранения – температура воздуха не выше 25 °C и относительная влажность воздуха – не более 70 %.

Результаты микробиологических исследований (таблица 3) свидетельствуют о том, что разработанная пленка в течение 200 суток хранения при температуре воздуха не выше 25 °C и относительной влажности воздуха не более 70 % сохраняет показатели безопасности в рамках регламентированных значений для пищевой продукции согласно ТР ТС 021/2011.

Многие охлажденные полуфабрикаты (например, мясные, птичье) в процессе хранения и реализации выделяют мясной сок, что создаёт благоприятную среду для развития микроорганизмов и ускоряет порчу продукции. Допустимые уровни значения показателя КМАФАнМ для охлажденных мясных и птичьих полуфабрикатов могут составлять от 1,0x10³ до 5,0x10⁶ КОЕ/г (согласно ТР ТС 021/2011, ТР ТС 034/2013). Срок хранения таких полуфабрикатов в зависимости от происхождения и способа разделки составляет от 2 до 3 суток.

Таблица 3 – Микробиологические показатели безопасности пленки в процессе хранения в сухом виде

Table 3 – Microbiological indicators of film safety during dry storage

Наименование показателя	Значения показателей после суток хранения			Нормируемые показатели
	1	100	200	
КМАФАнМ, КОЕ/г	3,1·10 ¹	1,5·10 ²	9,4·10 ²	не более 1·10 ⁴
Бактерии рода <i>Salmonella</i>	отсутствуют	в 25 г	отсутствуют	в 25 г
Бактерии <i>Listeria monocytogenes</i>	отсутствуют	в 25 г	отсутствуют	в 25 г
Бактерии группы кишечной палочки (БГКП)	отсутствуют	в 0,1	отсутствуют	в 0,1
Бактерии <i>Staphylococcus aureus</i>	отсутствуют	в 1,0 г	отсутствуют	в 1,0 г
Бактерии рода <i>Proteus</i>	отсутствуют	в 1,0 г	отсутствуют	в 1,0 г
Сульфитредуцирующие клостридии	отсутствуют	в 1,0 г	отсутствуют	в 1,0 г
<i>Escherichia coli</i>	отсутствуют	в 1,0 г	отсутствуют	в 1,0 г
Количество дрожжей	отсутствуют	в 1,0 г	отсутствуют	в 1,0 г
Количество плесневые грибы	отсутствуют	в 1,0 г	отсутствуют	в 1,0 г

Для увеличения сроков хранения охлажденных мясных и птичьих полуфабрикатов использовали подложку из пленки на основе желатина рыбного происхождения. В качестве одного из вариантов для повышения бактериостатической активности пленки является обработка смесью консервантов разного действия, разрешённых для пищевых целей в соответствии с регламентированными требованиями. Первый консервант – бензоат натрия – влияет на подавление активности катализы и пероксидазы, в результате чего накапливается перекись водорода, замедляющая обмен веществ и развитие дрожжей и плесневых грибов. Второй консервант – низин – является природным антимикробным пептидом, продуцируемым *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, который эффективно ингибирует грамположительные бактерии [5].

На поверхность пленки наносили методом орошения с помощью распылителя водный раствор консервантов в количестве 0,5 г бензоата натрия и 0,001 г низина на 100 г. Затем высушивали пленки до содержания влаги не более 16 %. Для проведения модельных опытов использовали в качестве подложки образцы пленок без обработки консервантами (образец 1) и образцы пленок, обработанные смесью консервантов (образец 2). Для определения свойств подложки из пленки при хранении на ней охлажденных полуфабрикатов использовали модельный мясной сок. Технология приготовления модельного сока следующая: взвешивание навески филе цыпленка 20 г (абсолютная погрешность – не более 0,01 г); зали-

вание дистиллированной водой при температуре 18–20 °С на 3/4 объема в мерной колбе (V = 200 см³); периодическое помешивание и настаивание в течение 30 минут; фильтрование посредством ватно-марлевого фильтра и доведение объема водой до метки; размещение пленок в стерильные чашки Петри и проливание мясным соком в соотношении 1:20; холодильное хранение при температуре 4 °С. В качестве контроля исследовали мясной сок без подложек.

Определяли КМАФАнМ образцов с периодичностью контроля согласно МУК 4.2.1847-04 для установления предполагаемого срока хранения полуфабрикатов (таблица 4).

Таблица 4 – Периодичность контроля для предполагаемого срока хранения охлажденных мясных и птичьих полуфабрикатов

Table 4 – Inspection intervals for the expected shelf life of chilled meat and poultry semi-finished products

Предполагаемый срок годности	Периодичность контроля – контрольные точки проведения исследований				
	Сутки хранения				
Полуфабрикаты мясные; полуфабрикаты птичьи					
1–2 суток	после выработки (Фон)	2	3		
3 суток	Фон	3	5		
5–7 суток	Фон		5	7	10

Численность микроорганизмов определяли до тех пор, пока она не превысит нормируемых ТР ТС 021/2011 показателей для охлажденных мясных и птичьих полуфабрикатов.

Результаты эффективности применения биодеградируемой пленки в модельных опытах представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Определение предполагаемого срока хранения охлажденных полуфабрикатов в модельном эксперименте

Table 5 – Determination of the estimated shelf life of chilled semi-finished products in the modelling experiment

Наименование образца	КМАФАнМ, КОЕ/г в процессе холодильного хранения, сут.				
	после выработки (Фон)	2	3	5	7
*	8,8x10 ³	5,0x10 ⁵	5,5x10 ⁶	–	
**	4,0x10 ²	5,0x10 ²	1,0x10 ⁴	3,0x10 ⁵	5,5x10 ⁶
***	10	1,0x10 ²	2,7x10 ³	1,0x10 ⁵	5,0x10 ⁶

Примечание: * – мясной сок (модель); ** – образец 1 (подложка + мясной сок); *** – образец 2 – (подложка + консерванты + мясной сок).

Результаты исследований (таблица 5) показали, что модельный мясной сок на 2 сутки холодильного хранения имеет значение КМАФАнМ 5,0x10⁵ КОЕ/мл, что превышает нормативные значения для большей части мясной и птичьей охлажденной продукции. Только полуфабрикаты мясные бескостные охлажденные маринованные, тушки и мясо птицы фасованное соответствуют такому нормативу.

Показатель КМАФАнМ образцов подложки, смоченных модельным мясным соком, определен на уровне 1,0–5,0x10²КОЕ/г, как для подложки без консервантов, так и при обработке ее консервантами, что ниже нормативных на 2–3 порядка. Таким образом, отмечено бактериостатическое действие подложки из пленки на КМАФАнМ, которое в

3 раза ниже численности микроорганизмов в модельном мясном соке.

На 3 сутки хранения численность микроорганизмов в подложке, обработанной консервантами, ниже на 1 порядок, чем в необработанной. Мясной сок на 3 сутки хранения по показателю КМАФАнМ превышает норму ТР ТС 021/2011 для всех охлажденных полуфабрикатов.

На 5 сутки холодильного хранения значения КМАФАнМ в образцах подложки 1 и 2 составило 3,0x10⁵ и 1,0x10⁵КОЕ/г соответственно, что позволяет хранить с их использованием до 3 суток большой круг охлажденных полуфабрикатов, в числе которых полуфабрикаты из мяса птицы натуральные: мясокостные, бескостные без панировки.

На 7 сутки хранения подложки без консервантов (образца 1) значение КМАФАнМ составило 5,5x10⁶КОЕ/г, что превышает регламентированный уровень микробиологической безопасности для любых охлажденных полуфабрикатов. Полученные данные позволяют предложить данную пленку для хранения охлажденных полуфабрикатов, срок хранения которых не превышает 3 суток.

Однако в образце 2 (подложка, обработанная консервантами) численность на 7 сутки хранения составила 5,0x10⁶ КОЕ/г, что позволяет ее использовать для хранения в течение 5 суток охлажденных мясных рубленых порционных полуфабрикатов, изготовленных путем формования и измельчения мясного сырья (например, фарш), а также кусковых полуфабрикатов, изготовленных из мяса на кости.

По показателю КМАФАнМ с учетом ТР ТС 021/2011, ТР ТС 034/2013 могут быть даны рекомендации, представленные в таблице 6, по срокам хранения для различных продуктов с использованием подложек из пленки на основе пищевого рыбного желатина при температуре в холодильнике не выше +5 °С.

Таблица 6 – Рекомендации по срокам хранения для охлажденных продуктов с использованием подложек из пленки

Table 6 – Shelf life recommendations for chilled products using film liners

Допустимые уровни КМАФАнМ, КОЕ/г	Группа охлажденных полуфабрикатов	Номер образца подложки	Срок хранения, сут
1	2	3	4
1x10 ³	Охлажденное мясо (всех видов убойных животных); Тушки и части тушек птицы и изделия из них запеченные, варено-копченые, копченые, сырокопченые, сыровяленые; в т.ч. рубленые	1,2	2
2x10 ³	Колбасы кровяные, ливерные, зельцы, сальти-соусы; Желированные продукты из мяса и птицы; Паштеты из мяса птицы;	1,2	2
1x10 ⁴	Мясо охлажденное в отрубах, упакованное под вакуумом или в модифицированную газовую атмосферу; Тушки и мясо птицы охлажденное	1,2	3

ФОРМИРОВАНИЕ БАКТЕРИОСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПИЩЕВОЙ БИОДЕГРАДИРУЕМОЙ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ РЫБНОГО КОЛЛАГЕНА

Продолжение таблицы 6 / Continuation of table 6

1	2	3	4
1×10^5	Полуфабрикаты из мяса птицы натуральные: мясокостные, бескостные без панировки	2	5
5×10^5	Полуфабрикаты мясные бескостные (охлажденные), в том числе маринованные: крупнокусковые; Тушки и мясо птицы фасованное охлажденное	1,2	5
1×10^6	Полуфабрикаты мясные бескостные (охлажденные), в том числе маринованные мелкокусковые. Полуфабрикаты из мяса птицы натуральные: мясокостные, бескостные в панировке, со специями, соусом, маринованные; Полуфабрикаты из мяса птицы рубленые (охлажденные); Мясо птицы механической обвалки, костный остаток охлажденные, полуфабрикат костный; Кожа птицы; Субпродукты птицы и полуфабрикаты из них	1,2	5
2×10^6	Полуфабрикаты мясные рубленые (охлажденные) в тестовой оболочке, фаршированные (голубцы, кабачки), полуфабрикаты мясосодержащие рубленые	1,2	5
5×10^6	Полуфабрикаты мясные рубленые (охлажденные): формованные, в т.ч. панированные; Фарш говяжий, свиной, из мяса других убойных животных; Полуфабрикаты мясокостные (крупнокусковые, порционные, мелкокусковые)	2	5

Как правило, гарантный срок хранения пищевых пленок составляет 12 месяцев. Установление возможности пролонгированного срока хранения разработанных пленок в сухом агрегатном состоянии, а также определение условий хранения может являться предметом дальнейших исследований в рамках санитарно-эпидемиологической оценки обоснования данных показателей с учетом нормативных требований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности получения пленки с равномерной пористой структурой на основе пищевого рыбного желатина. Разработанная готовая пленка отличается эластичностью и плотностью, высокими функционально-технологическими свойствами, структурно представлена в виде пузырьков воздуха в оболочке биополимера. Разработанная пленка отличается: толщиной (2–3 мм); влажностью (16–20 %); плотностью (0,161 г/см³). Органолептические и физические характеристики биодеградируемой пленки в сухом

агрегатном состоянии на протяжении всего периода хранения (1; 100 и 200 суток) оставались неизменными.

Период хранения пленки без признаков микробиологической порчи составляет 200 суток при температуре воздуха не выше 25 °С и относительной влажности воздуха не более 70 %.

Использование подложки из биодеградируемой пленки на основе пищевого желатина рыбного происхождения способствует сохранности охлажденных мясных полуфабрикатов и не позволяет активно развиваться микроорганизмам на протяжении 3 суток при использовании подложки без консервантов и 5 суток – при использовании подложки с консервантами, такими как бензоат натрия и низин, в концентрации 0,5 г и 0,001 г на 100 г соответственно.

Рекомендации по срокам хранения (от 2 до 5 суток) представлены для различных групп охлажденных мясных полуфабрикатов в зависимости от способа разделки, степени технологической обработки, наличия вкусовых добавок, типа обработки поверхности и других факторов.

Проведенные исследования имеют важное практическое значение, т.к. позволяют расширить ассортимент современных упаковочных материалов. Функционально-технологические и бактериостатические свойства биодеградируемой пленки, используемой в качестве вкладыша в основную упаковку, позволяют увеличить сроки хранения и сформировать рекомендации по срокам хранения для охлажденных мясных полуфабрикатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антилова Л.В., Сторублевцев С.А. Коллагены: источники, свойства, применение. Воронеж : ФГБОУ ВПО «ВГУИТ», 2014. 512 с.
2. Артиходжаева Б.А. Характеристики раневых покрытий и перевязочных материалов на основе природных и синтетических полимеров (обзорная статья) // Innovations in Technology and Science Education. 2023. Т. 2. № 10. С. 428–438.
3. Биосовместимые и биодеградируемые раневые покрытия на основе полисахаридов из морских водорослей (обзор литературы) / Т.А. Кузнецова [и др.] // Вестник хирургии имени И.И. Грекова. 2020. Т. 179, № 4. С. 109–115.
4. Способ получения рыбного желатина: пат. 2722210 Рос. Федерация № 2019141779 ; заявл. 16.12.2019 ; опубл. 28.05.2020. Бюл. № 16.
5. Червоткина Д.Р., Борисова А.В. Антимикробные препараты природного происхождения : обзор свойств и перспективы применения // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. № 2(41). С. 254–267. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-254-267.
6. Якубова О.С., Вострикова Л.Н., Кушбанова А.А. Формирование свойств биодеградируемых пленок на основе рыбного желатина // Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Рыб. хоз-во. 2024. № 2. С. 118–127. DOI: 10.24143/2073-5529-2024-2-118-127.
7. Якубова О.С., Бекешева А.А. Обоснование регламентируемых показателей качества пищевого рыбного желатина // Индустрия питания. Food Industry. 2018. Т. 3. № 4. С. 60–65. DOI: 10.29141/2500-1922-2018-3-4-7.
8. Якубова О.С., Бекешева А.А. Научное обоснование физических свойств рыбного желатина // Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Рыб. хоз-во. 2018. № 3. С. 132–140. DOI: 10.24143/2073-5529-2017-3-132-140.
9. Abdullaah, Jiyang Cai, Muhammad Adnan Hafeez.

Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review // *Front. Nutr.*, 22 August 2022 Sec. Nutrition and Food Science Technology Volume 9, 2022. doi: 10.3389/fnut.2022.1000116.

10. Ainaz Alizadeh, Somayyeh Behfar. Properties of collagen based edible films in food packaging: A review // *Annals of Biological Research*, 2013, 4 (2):253–256.

11. Fish Collagen: Extraction, Characterization, and Applications for Biomaterials Engineering / Hafez Jafari [and etc.] // *Polymers* 2020, 12, 2230; doi: 10.3390/polym12102230.

12. Maya Raman, K. Gopakumar. Fish Collagen and its Applications in Food and Pharmaceutical Industry: A Review // *EC Nutrition* 13.12. (2018): 752–767.

13. Optimizing a bionanocomposite film for active food packaging with pectin, gelatin, and chestnut shell extract-loaded zein nanoparticles / Dilara Konuk Takma [and etc.] // *Food Packaging and Shelf Life*, 2024, Volume 42, 101243. doi: org/10.1016/j.fpsl.2024.101243.

14. Preparation and characterization of gelatin / Kappa-carrageenan halochromic films containing curcumin for active and smart food packaging / Ali Rezaei [and etc.] // *Food Bioscience*, 2024, Volume 62, 105304. doi: org/10.1016/j.fbio.2024.105304.

Информация об авторах

О. С. Якубова – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии товаров и товароведения, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».

Л. Н. Вострикова – аспирант 1-го курса по направлению 4.3.3 «Пищевые системы», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».

С. В. Еремеева – канд. биол. наук, доцент, доцент кафедры прикладной биологии и микробиологии, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».

А. А. Кушбанова – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии товаров и товароведения, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет».

REFERENCES

1. Antipova, L.V. & Storublevcev, S.A. (2014). *Collagens: sources, properties, application*. Voronezh. VGUit. (In Russ).
2. Artikhodzhaeva, B.A. (2023). Characteristics of wound coatings and dressings based on natural and synthetic polymers (review article). *Innovations in Technology and Science Education*, (2)(10), 428-438. (In Russ).
3. Kuznecova, T.A., Besednova, N.N., Usov, V.V. & Andryukov, B.G. (2020). Biocompatible and biodegradable wound coatings based on seaweed polysaccharides (literature review). *Bulletin of Surgery named after I.I. Grekov*, (179 (4), 109-115. (In Russ).
4. Yakubova, O.S. & Bekesheva, A.A. (2020). Method of obtaining fish gelatin. Pat. 2722210. Russian Federation, published on 28.05.2020. Bull. No. 16. (In Russ).
5. Chervotkina, D.R. & Borisova, A.V. (2022). Antimi-

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

crobials of natural origin: a review of properties and prospects of application. *Izvestiya vuzov. Applied chemistry and biotechnology*, (12) 2(41), 254-267. (In Russ). DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-254-267.

6. Yakubova, O.S., Vostrikova, L.N. & Kushbanova, A.A. (2024). Formation of properties of biodegradable films based on fish gelatin. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series Fishery*, (2), 118-127. (In Russ). Doi: 10.24143/2073-5529-2024-2-118-127.

7. Yakubova, O.S. & Bekesheva, A.A. (2018). Justification of regulated quality indicators of food fish gelatin. *Food Industry*, (3 (4), 60-65. (In Russ). Doi: 10.29141/2500-1922-2018-3-4-7.

8. Yakubova, O.S. & Bekesheva, A.A. (2018). Scientific substantiation of physical properties of fish gelatin. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series Fishery*, (3), 132-140. (In Russ). Doi: 10.24143/2073-5529-2017-3-132-140.

9. Abdullah, Jiyang Cai, Muhammad Adnan Hafeez. Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review // *Front. Nutr.*, 22 August 2022 Sec. Nutrition and Food Science Technology Volume 9, 2022. doi: 10.3389/fnut.2022.1000116.

10. Ainaz Alizadeh, Somayyeh Behfar. Properties of collagen based edible films in food packaging: A review // *Annals of Biological Research*, 2013, 4 (2):253-256.

11. Fish Collagen: Extraction, Characterization, and Applications for Biomaterials Engineering / Hafez Jafari [and etc.] // *Polymers* 2020, 12, 2230; doi: 10.3390/polym12102230.

12. Maya Raman, K. Gopakumar. Fish Collagen and its Applications in Food and Pharmaceutical Industry: A Review // *EC Nutrition* 13.12 (2018): 752–767.

13. Optimizing a bionanocomposite film for active food packaging with pectin, gelatin, and chestnut shell extract-loaded zein nanoparticles / Dilara Konuk Takma [and etc.] // *Food Packaging and Shelf Life*, 2024, Volume 42, 101243. doi: org/10.1016/j.fpsl.2024.101243.

14. Preparation and characterization of gelatin/Kappa-carrageenan halochromic films containing curcumin for active and smart food packaging / Ali Rezaei [and etc.] // *Food Bioscience*, 2024, Volume 62, 105304. doi: org/10.1016/j.fbio.2024.105304.

Information about the authors

O.S. Yakubova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology of goods and commodity science, Astrakhan State Technical University.

L.N. Vostrikova - 1st year postgraduate student in direction 4.3.3 «Food Systems», Astrakhan State Technical University.

S.V. Eremeeva - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Biology and Microbiology, Astrakhan State Technical University.

A.A. Kushbanova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology of goods and commodity science, Astrakhan State Technical University.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 535.372:637.07
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.008

EDN: DKQECX

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА МОЛОКА

Михаил Владимирович Беляков ¹, Игорь Юрьевич Ефременков ²

^{1,2} Федеральный научный агрогинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

¹ bmw2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

² matiusharius@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>

Аннотация. Фракционирование молока повсеместно используется для производства различных продуктов. Спектроскопия видимого и ближнего инфракрасного диапазона может быть использована для качественной оценки фракций молока. Целью работы является исследование фракционного состава молока с помощью оптической фотолюминесцентной спектроскопии и определение наиболее информативных спектральных диапазонов и параметров. В данном исследовании путем ультразвукового разделения были получены фракции молока с более высоким и низким содержанием жира. Измерены спектральные характеристики цельного молока и полученных фракций в диапазоне 230–650 нм на дифракционном спектрофлуориметре CM2203. Спектры возбуждения молока и полученных фракций качественно не отличаются между собой и содержат четыре максимума: 290 нм, 324 нм, 360 нм и 445 нм. Отличия проявляются в количественном соотношении максимумов и интегральных параметров поглощения. Интегральная поглощательная способность H нижней фракции молока превышает аналогичный параметр для верхней на 31,2 % во всем спектральном диапазоне и на 24–44 % – в отдельных диапазонах исследуемого спектра. Спектральные фотолюминесцентные свойства фракционированного молока зависят от содержания жира. Для нижней фракции лучшие фотолюминесцентные свойства (спектральные характеристики и энергетические параметры) вызваны уменьшением тушения люминесценции за счёт изменения концентрации молочного жира. Потоки фотолюминесценции при возбуждении 290 нм, 360 нм и 445 нм статистически достоверно линейно уменьшаются при увеличении содержания жира во фракции или молоке. Наиболее информативной длиной волны возбуждения молока при фракционировании является 360 нм. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики контроля жирности при переработке молока путем фракционирования.

Ключевые слова: фракционирование молока, жиры, люминесценция, оптический мониторинг, поток фотолюминесценции, асимметрия, эксцесс.

Для цитирования: Беляков М. В., Ефременков И. Ю. Оптические спектральные исследования фракционного состава молока // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 53–58. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.008. EDN: <https://elibrary.ru/DKQECX>.

Original article

OPTICAL SPECTRAL STUDIES OF THE FRACTIONAL COMPOSITION OF MILK

Mikhail V. Belyakov ¹, Igor Yu. Efremenkov ²

^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

¹ bmw2010@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

² matiusharius@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>

Abstract. Fractionation of milk is widely used for the production of various products. Visible and near-infrared spectroscopy can be used for qualitative assessment of milk fractions. The aim of the work is to study the fractional composition of milk using optical photoluminescence spectroscopy and determine the most informative spectral ranges and parameters. In this study, milk fractions with higher and lower fat content were obtained by ultrasound separation. The spectral characteristics of whole milk and the resulting fractions were measured in the range of 230–650 nm on a CM2203 diffraction spectrophotometer. The excitation spectra of milk and the obtained fractions do not differ significantly from each other and contain four maxima: 290 nm, 324 nm, 360 nm and 445 nm. The differences are manifested in the quantitative ratio of maxima and integral parameters. The integral absorption capacity H , of the lower fraction of milk exceeds the same parameter for the upper one by 31,2 % in the entire spectral range and by 24–44 % in certain ranges of the studied spectrum. The spectral photo-luminescent properties of fractionated milk depend on the fat content. For

© Беляков М. В., Ефременков И. Ю., 2025

the lower fraction, the best photoluminescent properties (spectral characteristics and energy parameters) are caused by a decrease in luminescence quenching due to a change in the concentration of milk fat. Photoluminescence fluxes excited at 290 nm, 360 nm, and 445 nm statistically significantly decrease linearly with increasing fat content in the fraction or milk. The most informative wavelength of milk excitation during fractionation is 360 nm. The results obtained can be used to develop a methodology for fat content control in milk processing by fractionation.

Keywords: fractionation of milk, fats, luminescence, optical monitoring, photoluminescence flux, asymmetry, kurtosis.

For citation: Belyakov, M.V. & Efremenkov, I.Yu. (2024). Optical spectral studies of the fractional composition of milk. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 53-58. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.008. EDN: <https://elibrary.ru/DKQECX>.

ВВЕДЕНИЕ

Молоко – это один из самых питательных и полезных продуктов для человека. Оно содержит множество витаминов, минералов, белков и жиров, необходимых для здоровья. Состав молока включает в себя такие полезные компоненты, как кальций, витамин D, белки, жиры и углеводы.

Фракционирование молока – это процесс разделения молока на отдельные компоненты, такие как белки, жиры и углеводы. Этот процесс позволяет получить различные продукты из молока, которые обладают уникальными свойствами и вкусом.

Например, из сыворотки молока можно получить сывороточный протеин, который используется в спортивном питании. Из жиров молока можно получить масло, которое используется в кулинарии и косметике. Из углеводов молока можно получить лактозу, которая используется в пищевой промышленности для придания сладкого вкуса продуктам.

Фракционирование молока имеет большое значение для потребителей, так как позволяет получить продукты, обладающие уникальными свойствами и вкусом. Такие продукты могут быть более полезными и эффективными, чем обычное молоко, и могут быть использованы в различных сферах, начиная от питания и заканчивая косметологией, а производителям данной продукции позволять получать большую прибыль.

Главным направлением производства молочной продукции является внедрение и применение инновационных технических решений, которые обеспечивают конкурентоспособность, а также большую экономическую эффективность [1]. За последнее десятилетие наблюдается рост производства молока на ферме, благодаря модернизации объектов животноводства, добавление новых методов контроля продукции [2]. Такими методами могут являться и оптические. Спектроскопия, благодаря высокой скорости измерений, не требующая дополнительных реагентов, по сравнению с химическими методами, активно применяется для определения различных параметров молока.

Например, проводились исследования по изучению характеристик фракций безводного молочного жира крупного рогатого скота и буйволицы вместе с жиром детских смесей [3]. Спектроскопия используется для быстрой классификации сухого цельного молока и сухого обезжиренного молока [4], также совместно с использованием машинного обучения проводились исследования по прогнозированию содержания жирных кислот в молоке буйволиц [5]. С помощью спектроскопии прогнозируют количественные показатели молока на ос-

нове инфракрасной спектроскопии с использованием методов машинного обучения [6]. Помимо этого, для контроля показателей качества молока оптическими методами проводились исследования для изучения взаимосвязей спектральных картин, параметров поглощения и значений фотолюминесценции коровьего молока в процессе его скисания [7–8]. Также спектроскопия применяется для определения фальсификатов в молочных продуктах, а именно: проводится идентификация фальсификации молока в верблюжьем молоке с помощью Фурье-инфракрасной спектроскопии и моделей машинного обучения [9]. Осуществляется обнаружение и количественное определение кукурузного крахмала и пшеничной муки в качестве примесей в сухом молоке методом ближней и среднейинфракрасной спектроскопии в сочетании с хемометрическими процедурами [10] и распространенных примесей в коровьем молоке наливом с помощью Фурье-преобразованной среднейинфракрасной спектроскопии [11].

Целью работы является исследование фракционного состава молока с помощью оптической фотолюминесцентной спектроскопии. Задачами являются измерение спектров возбуждения и люминесценции с последующим расчетом энергетических и статистических параметров и определение на их основе наиболее информативных спектральных диапазонов и параметров.

МЕТОДЫ

Для получения спектральных картин использовали 10 образцов молока агрофирмы «Мичурино» с массовой долей жира 3,37 %, содержанием белка 3,42 %. Исходные параметры молока изменили с помощью ультразвукового анализатора «Эксперт Профи» («Лабораторика», Россия).

Было проведено одноступенчатое ультразвуковое гравитационное разделение после обработки ультразвуком, аналогичное [12]. Образцы молока в специальной емкости помещали в ультразвуковую ванну KaisiK-103 («Kaisi», Китай) на 3 часа, при частоте ультразвукового воздействия 40 кГц, периодом колебаний $T = 25$ мкс, длиной звуковой волны $\lambda = 3,75$ см, при этом меняя воду каждые 15–20 мин, чтобы на поверхности исследуемого молока не образовывалась белковая пленка.

Под воздействием звуковых волн в ванне возникала кавитация, и непосредственно шло разделение молока на две фракции: верхнюю (с более высоким содержанием жиров) и нижнюю (с низким содержанием жиров). В отличие от традиционных сепараторов, которые используют механическое воздействие, ультразвуковое сепариро-

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА МОЛОКА

вание минимизирует повреждение молочных компонентов, что позволяет эффективнее разделять молоко на фракции. Также ультразвуковые сепараторы могут быть легко настроены путем регулирования частоты ультразвука для работы с различными типами молока и для достижения желаемых характеристик конечного продукта. После обработки ультразвуком выполнялось бережное извлечение пробы каждой фракции с помощью пробоотборной пипетки (ISO 8655/DIN12650).

Спектральные характеристики были получены на спектрофлуориметре CM2203, аналогично ранее апробированной методике [7]. Измерения спектров возбуждения проводили в диапазонах 230–600 нм, после чего получили спектры люминесценции на длинах волн 290 нм, 324 нм, 360 нм, 445 нм. Спектральные картины необходимы для дальнейшего создания оптического метода детектирования фракционного молока.

Расчет интегральных параметров спектров возбуждения и люминесценции осуществляли с помощью формул:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_s(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_s(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $\eta_s(\lambda)$ – спектральная характеристика возбуждения (поглощения); $\varphi_s(\lambda)$ – спектральная характеристика фотолюминесценции; $\lambda_1 \dots \lambda_2$ – границы спектрального диапазона возбуждения, люминесценции.

Для статистического анализа использовали следующие формулы:

$$M_\lambda = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \lambda \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где M_λ – математическое ожидание, $\varphi(\lambda)$ – дифференциальная функция распределения (распреде-

Таблица 1 – Параметры молока и его фракций

Table 1 – Parameters of milk and its fractions

Фракция	Жир, %	СОМО, %	pH	Белок, %	Лактоза, %
Нижняя	1,28 ± 0,05	9,53 ± 0,1	6,35 ± 0,2	3,50 ± 0,05	5,23 ± 0,02
Верхняя	3,17 ± 0,04	9,51 ± 0,2	6,28 ± 0,1	3,49 ± 0,04	5,22 ± 0,03
Цельное молоко	3,37 ± 0,05	9,33 ± 0,1	6,32 ± 0,1	3,42 ± 0,05	5,13 ± 0,02

Таким образом, ультразвук способствовал образованию градиента увеличения концентрации жира по вертикали по высоте разделительной емкости. Остальные параметры молока изменились незначительно.

Спектральные характеристики молочных фракций и цельного молока, измеренные при синхронном сканировании (спектры возбуждения $\eta(\lambda)$), представлены на рисунке 1.

Спектры возбуждения обеих полученных фракций качественно не отличаются между собой и содержат все четыре максимума: 290 нм, 324 нм, 360 нм и 445 нм, ранее полученные для цельного молока [8].

Отличия проявляются в количественном соотношении максимумов и интегральных параметров H , о.е.

ление плотности вероятности); λ – длина волны; $\lambda_{\min.}$, $\lambda_{\max.}$ – минимальное и максимальное значение длии волн.

Дисперсия σ^2 , характеризующая степень разброса длин волн люминесценции относительно центра тяжести, которая рассчитывается по формуле:

$$\sigma^2 = \int_{\lambda_{\min.}}^{\lambda_{\max.}} (\lambda - M)^2 \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где σ^2 – дисперсия.

На практике для оценки асимметрии используют коэффициент асимметрии As , который определяется по формуле:

$$As = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad (5)$$

где μ_3 – центральный статистический момент 3-го порядка, который рассчитывается по формуле:

$$\mu_3 = \int_{\lambda_{\min.}}^{\lambda_{\max.}} (\lambda - M)^3 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

Для сравнения спектра с нормальным распределением вычислили эксцесс Ex по формуле:

$$Ex = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (7)$$

где μ_4 – центральный статистический момент 4-го порядка, который служит числовой характеристикой «островершинности» или пологости («плосковершинности») спектра и рассчитывается по формуле:

$$\mu_4 = \int_{\lambda_{\min.}}^{\lambda_{\max.}} (\lambda - M)^4 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

После фракционирования на анализаторе «Эксперт Профи» были измерены параметры фракций и исходного молока (табл. 1).

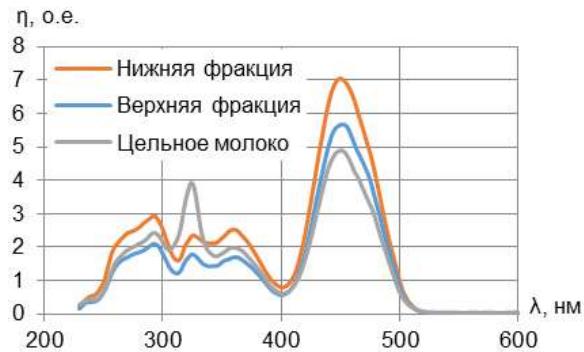


Рисунок 1 – Спектры возбуждения молока и его фракций

Figure 1 – Excitation spectra of milk and its fractions

Например, для цельного молока значения спектральной поглощательной способности η , о.е. для максимумов 290 нм и 360 нм находятся посередине от максимумов фракций, в то время как η_{324} , о.е. расположен практически в два раза выше,

Таблица 2 – Интегральные параметры спектров возбуждения молока Н, о.е.

Table 2 – Integral parameters of the excitation spectra of milk

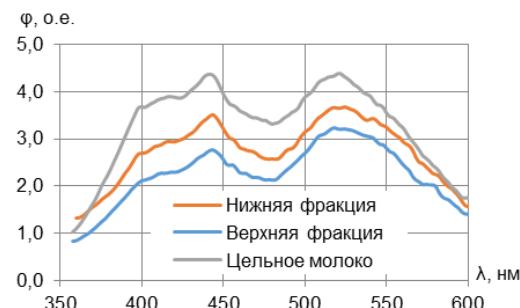
Фракция	Для спектрального диапазона, нм				
	230–310	310–340	340–400	400–520	230–600
Нижняя	150±2	62±1	114±1	414±1	743±6
Верхняя	106±8	46±2	79±3	333±5	566±19
Цельное молоко	121±6	85±5	90±4	282±7	581±22

Интегральная поглощательная способность Н, о.е. нижней фракции молока превышает аналогичный параметр для верхней на 31,2 % во всем спектральном диапазоне и на 24–44 % – в отдельных диапазонах исследуемого спектра. Относительная погрешность определения интегральной поглощательной способности для цельного молока и его верхней фракции достигает 7,5 %, а для нижней фракции – не более 1,6 %.

Спектры фотолюминесценции молока и его фракций для определенных выше длин волн возбуждения представлены на рисунках 2–5.

Рисунок 2 – Спектры люминесценции молока и его фракций при $\lambda_{\text{в}} = 290$ нмFigure 2 – Luminescence spectra of milk and its fractions at $\lambda_{\text{в}} = 290$ nm

При возбуждении излучением с длиной волны 290 нм все спектры фотолюминесценции имеют единственный максимум на длине волны примерно 355–360 нм (рис. 2). Спектр нижней фракции расположен заметно выше, а спектры цельного молока и его верхней фракции практически совпадают.

Рисунок 3 – Спектры люминесценции молока и его фракций при $\lambda_{\text{в}} = 324$ нмFigure 3 – Luminescence spectra of milk and its fractions at $\lambda_{\text{в}} = 324$ nm

Спектры качественно схожи и имеют по два максимума примерно на 443 нм и 520 нм. Как можно было прогнозировать по рис. 1 и табл. 2,

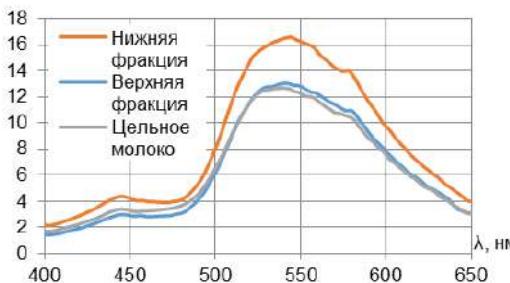
а η_{445} , о.е.– наоборот, ниже максимумов обеих фракций. Интегральные параметры спектров возбуждения молока, рассчитанные по формуле (1) в соответствующих основным максимумам спектральных диапазонах, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Интегральные параметры спектров возбуждения молока Н, о.е.

Table 2 – Integral parameters of the excitation spectra of milk

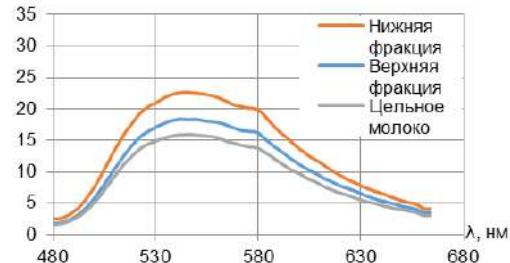
наибольшая люминесценция у цельного молока, затем следуют нижняя и верхняя фракции.

φ, о.е.

Рисунок 4 – Спектры люминесценции молока и его фракций при $\lambda_{\text{в}} = 360$ нмFigure 4 – Luminescence spectra of milk and its fractions at $\lambda_{\text{в}} = 360$ nm

Основной максимум фотолюминесценции при возбуждении $\lambda_{\text{в}} = 360$ нм расположен на 545 нм, а существенно меньший побочный – на 445 нм. Как и для возбуждения 290 нм, наибольшая люминесценция у нижней фракции, а для цельного молока и его верхней фракции кривые $\phi(\lambda)$ практически совпадают.

φ, о.е.

Рисунок 5 – Спектры люминесценции молока и его фракций при $\lambda_{\text{в}} = 445$ нмFigure 5 – Luminescence spectra of milk and its fractions at $\lambda_{\text{в}} = 445$ nm

При возбуждении излучением длиной волны 445 нм спектр фотолюминесценции молока с наибольшей жирностью (3,37 %) расположен наиболее низко в отличие от фракций с меньшей жирностью (табл. 1).

Интегральные и статистические параметры спектров люминесценции фракций молока, рассчитанные по формулам (2)–(8), представлены в таблице 3. Погрешность определения потоков фотолюминесценции Φ_{λ} , о.е. цельного молока, как правило, больше, чем для фракций, особенно нижней.

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА МОЛОКА

Таблица 3 – Интегральные и статистические параметры спектров люминесценции молока
Table 3 – Integral parameters of the excitation spectra of milk

	λ_b , нм	Параметры			
		$\Phi_{\lambda, \text{ср}}$, о.е.	M_{λ} , нм	As	Ex
Нижняя фракция	290	317 ± 2	360,0 ± 0,2	0,040 ± 0,003	-0,770 ± 0,002
	324	677 ± 5	481,0 ± 0,1	-0,100 ± 0,009	-1,070 ± 0,005
	360	2112 ± 7	543,0 ± 0,2	-0,400 ± 0,012	-0,220 ± 0,001
	445	2478 ± 2	565,0 ± 0,1	0,330 ± 0,007	-0,590 ± 0,003
Верхняя фракция	290	230 ± 17	359,0 ± 0,1	0,150 ± 0,004	-0,800 ± 0,005
	324	557 ± 17	484,0 ± 0,2	-0,130 ± 0,008	-1,040 ± 0,007
	360	1646 ± 31	545,0 ± 0,1	-0,410 ± 0,013	-0,140 ± 0,001
	445	2005 ± 25	565,0 ± 0,1	0,380 ± 0,009	-0,570 ± 0,002
Цельное молоко	290	249 ± 11	359,0 ± 0,1	0,040 ± 0,002	-0,810 ± 0,009
	324	804 ± 56	479,0 ± 0,1	0,060 ± 0,009	-1,080 ± 0,007
	360	1644 ± 54	536,0 ± 0,2	-0,130 ± 0,010	-0,300 ± 0,004
	445	1730 ± 43	565,0 ± 0,2	0,360 ± 0,008	-0,580 ± 0,003

ОБСУЖДЕНИЕ

В целом, результаты подтверждают первоначальную гипотезу, согласно которой спектральные фотолюминесцентные свойства фракционированного молока зависят от содержания жира и размера глобул. Предположительно, для нижней фракции лучшие фотолюминесцентные свойства (спектральные характеристики и энергетические параметры) вызваны уменьшением тушения люминесценции за счёт изменения концентрации молочного жира.

Отсутствие существенных качественных изменений спектров возбуждения и люминесценции показывает, что физический сдвиг при применении ультразвука не нарушает физическую целостность шариков молочного жира [13]. Мембрана глобул молочного жира не подвергается значительным повреждениям и не покрывается мицеллярными структурами казеина [14].

Ограничения при фракционировании с использованием натуральных сливок, описанные в [15], также присутствуют при ультразвуковом разделении. Например, более мелкие жировые шарики, которые уже находятся в верхней части емкости, с трудом опускаются обратно на дно емкости и остаются там, возможно, разбавляя образовавшийся слой.

Тем не менее, технология ультразвукового фракционирования обеспечивает усовершенствование простых методов фракционирования, ранее применявшихся с использованием только естественного разделения.

Потоки фотолюминесценции при возбуждении 290 нм уменьшаются при увеличении содержания жира в фракции или молоке. При этом коэффициент детерминации зависимости Φ_{290} ($C_{\text{жира}}$) равен 0,91. Аналогично для потоков Φ_{360} и Φ_{445} , где коэффициенты детерминации составляют 0,99 и 0,92 соответственно.

Математические ожидания спектров для обеих фракций и молока меняются незначительно. Асимметрия, в основном, меняется либо незначительно (для $\lambda_b = 445$ нм), либо бессистемно с изменением знака от левосторонней к правосторонней симметрии (для $\lambda_b = 290$ нм и $\lambda_b = 324$ нм). Для $\lambda_b = 360$ нм асимметрия обеих фракций увеличивается примерно в 3,1 раза по сравнению с цельным молоком. Экспесс практически не меняется за

исключением $\lambda_b = 360$ нм, где его уменьшение достигает 1,7–2,8 раз у фракций по сравнению с цельным молоком.

Ограничением настоящего исследования является использование только двух фракций, полученных при ультразвуковом разделении.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики контроля жирности при переработке молока путем фракционирования. Поэтому в ходе дальнейших исследований с учетом установленных длин волн возбуждения и информативных спектральных диапазонов регистрации люминесценции необходимо провести эксперименты с большим числом фракций различной жирности для последующего построения математических моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее информативной длиной волны возбуждения молока при фракционировании является 360 нм с последующей регистрацией фотолюминесценции в спектральном диапазоне 400–650 нм.

При этом поток фотолюминесценции Φ_{360} наиболее коррелируется с содержанием жира, а асимметрия As и экспесс Ex различаются для цельного молока и его фракций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров И.А. Комплексный подход в применении инновационных технологий производства молока // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1(41). С. 17–21. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-17.
2. Скоркин В.К., Гаджиев А.М. Модернизация технологических процессов молочного скотоводства // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1(41). С. 12–16. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-12.
3. Abdelmoneim H., Wei A., Xingguo W. Characterisation of bovine and buffalo anhydrous milk fat fractions along with infant formulas fat: Application of differential scanning calorimetry, Fourier transform infrared spectroscopy, and colour attributes 2020 // Food Science and Technology. 2020. № 129. DOI: 10.1016/j.jfst.2020.109542.
4. Rapid classification of whole milk powder and skimmed milk powder by laser-induced breakdown spectroscopy combined with feature processing method and logistic regression / Yu. Ding [et al.] // Analytical sciences. 2024. № 3. Р. 399–411. DOI: 10.1007/s44211-023-00467-6.

5. Integrating Mid-Infrared Spectroscopy, Machine Learning, and Graphical Bias Correction for Fatty Acid Prediction in water Buffalo Milk / Y. Zhiqiu [et al.] // Science of Food and Agriculture. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.13471>.

6. Прогнозирование количественных характеристик молока на основе инфракрасной спектроскопии с применением методов машинного обучения / Л.В. Легашев [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2022. № 3. С. 47–56. DOI: 10.14529/ctcr220305.

7. Photoluminescence Spectral Patterns and Parameters of Milk While Souring / M.V. Belyakov [et al.] // Agriculture. 2023. № 5. P. 1054. DOI: 10.3390/agriculture13051054.

8. Изменение спектральных фотоплюминесцентных свойств молока при сгущении / М.В. Беляков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. № 3. С. 460–475. DOI: 10.15507/2658-4123.032.202203.460-475.

9. Identification of Milk Adulteration in Camel Milk Using FT-Mid-Infrared Spectroscopy and Machine Learning Models / Zh. Yao, X. [et al.] // Foods. 2023. № 24. P. 4517. DOI: 10.3390/foods12244517.

10. Detection and quantification of corn starch and wheat flour as adulterants in milk powder by near- and mid-infrared spectroscopy coupled with chemometric routines / E.R. Caballero-Agosto [et al.] // Food Chemistry Advances. 2024. DOI: 10.1016/j.focha.2023.100582.

11. Detection of common adulterants in bulk bovine milk using fourier transformed mid-infrared spectroscopy / A. Guerra [et al.] // Acta IMEKO. 2024. № 1. DOI: <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v13i1.1648>.

12. Ultrasonically enhanced fractionation of milk fat in a litre-scale prototype vessel / T. Leong [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2016. № 28, P. 118–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.023>.

13. Design parameters for the separation of fat from natural whole milk in an ultrasonic litre-scale vessel / T. Leong [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21(4). P. 1289–1298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.01.007>.

14. Apparent ζ -potential as a tool to assess mechanical damages to the milk fat globule membrane / M.C. Michalski [et al.] // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2002. Vol. 23(1). P. 23–30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(01\)00203-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(01)00203-X).

15. Microfiltration of Raw Whole Milk to Select Fractions with Different Fat Globule Size Distributions: Process Optimization and Analysis / M.C. Michalski [et al.] // Journal of Dairy Science. 2006. Vol. 89(10). P. 3778–3790. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72419-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72419-5).

Информация об авторах

М. В. Беляков – доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального научного агронженерного центра ВИМ.

И. Ю. Ефременков – магистр, младший научный сотрудник Федерального научного агронженерного центра ВИМ.

REFERENCES

1. Tikhomirov, I.A. An integrated approach in the application of innovative milk production technologies // Equipment and technologies in animal husbandry. 2021. № 1(41). P. 17-21. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-17.
2. Skorkin, V.K., Gadzhiev, A.M. Modernization of technological processes of dairy farming // Machinery and technologies in animal husbandry. 2021. № 1(41). P. 12-16. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-12.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

3. Abdelmoneim, H., Wei, A., Xingguo, W. Characterisation of bovine and buffalo anhydrous milk fat fractions along with infant formulas fat: Application of differential scanning calorimetry, Fourier transform infrared spectroscopy, and colour attributes 2020 // Food Science and Technology. 2020. № 129. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109542.

4. Rapid classification of whole milk powder and skimmed milk powder by laser-induced breakdown spectroscopy combined with feature processing method and logistic regression / Yu. Ding [et al.] // Analytical sciences. 2024. № 3. P. 399-411. DOI: 10.1007/s44211-023-00467-6.

5. Integrating Mid-Infrared Spectroscopy, Machine Learning, and Graphical Bias Correction for Fatty Acid Prediction in water Buffalo Milk / Y. Zhiqiu [et al.] // Science of Food and Agriculture. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.13471>.

6. Forecasting quantitative characteristics of milk based on infrared spectroscopy using machine learning methods / L.V. Legashev [et al.] // Bulletin of the South Ural State University. 2022. № 3. P. 47-56. DOI: 10.14529/ctcr220305.

7. Photoluminescence Spectral Patterns and Parameters of Milk While Souring / M.V. Belyakov [et al.] // Agriculture. 2023. № 5. P. 1054. DOI: 10.3390/agriculture13051054.

8. Change of spectral photoluminescent properties of milk during souring / M.V. Belyakov [et al.] // Engineering technologies and systems. 2022. № 3. P. 460-475. DOI: 10.15507/2658-4123.032.202203.460-475.

9. Identification of Milk Adulteration in Camel Milk Using FT-Mid-Infrared Spectroscopy and Machine Learning Models / Zh. Yao, X. [et al.] // Foods. 2023. № 24. P. 4517. DOI: 10.3390/foods12244517.

10. Detection and quantification of corn starch and wheat flour as adulterants in milk powder by near- and mid-infrared spectroscopy coupled with chemometric routines / E.R. Caballero-Agosto [et al.] // Food Chemistry Advances. 2024. DOI: 10.1016/j.focha.2023.100582.

11. Detection of common adulterants in bulk bovine milk using fourier transformed mid-infrared spectroscopy / A. Guerra [et al.] // Acta IMEKO. 2024. № 1. DOI: <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v13i1.1648>.

12. Ultrasonically enhanced fractionation of milk fat in a litre-scale prototype vessel / T. Leong [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2016. № 28, P. 118-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.023>.

13. Design parameters for the separation of fat from natural whole milk in an ultrasonic litre-scale vessel / T. Leong [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21(4). P. 1289-1298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.01.007>.

14. Apparent ζ -potential as a tool to assess mechanical damages to the milk fat globule membrane / M.C. Michalski [et al.] // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2002. Vol. 23(1). P. 23-30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(01\)00203-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(01)00203-X).

15. Microfiltration of Raw Whole Milk to Select Fractions with Different Fat Globule Size Distributions: Process Optimization and Analysis / M.C. Michalski [et al.] // Journal of Dairy Science. 2006. Vol. 89(10). P. 3778-3790. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72419-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72419-5).

Information about the authors

M.V. Belyakov - Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Federal Scientific Agroengineering Center of VIM.

I.Yu. Efremenkov - Master's degree, Junior Researcher of the Federal Scientific Agroengineering Center of VIM.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 005.51:637.5
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.008

EDN: NNMVET

ТИПОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Евгения Олеговна Ермолаева ¹, Юрий Викторович Безносов ²,
Елена Юрьевна Титоренко ³, Юлия Владиславовна Устинова ⁴

¹ Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия
eoo38191@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2312-7955>

² ЗАО «НеоКор», Кемерово, Россия
corellings@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6293-3693>

³ Кемеровский государственный медицинский университет, Кемерово, Россия
lok-13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5635-2054>

⁴ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия
yul48888048@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1649-889X>

Аннотация. Для обеспечения успешной коммерческой деятельности требуется управление предприятием, включающее не только мгновенные координацию и контроль производственных процессов, но и долгосрочное планирование, основанное на решении трех ключевых вопросов. В разные периоды жизненного цикла компании эти вопросы могут решаться различными способами, однако многие эксперты считают, что если товары производятся с учетом потребностей потребителя, то управление становится более автоматизированным. Производство в мясоперерабатывающей отрасли имеет свою специфику, связанную с физико-химическими свойствами сырья и особенностями производственных технологий. Эти особенности обуславливают определенные требования к организации процесса производства, такие как обязательное соблюдение СанПиНов, технических регламентов Таможенного союза, санитарно-гигиенических требований и ветеринарно-санитарных правил. Таким образом, стало актуальным рассмотреть несколько предприятий мясной промышленности и выявить основные, типовые проблемы производственного процесса. Целью исследований стала разработка рекомендаций по улучшению производственных процессов мясоперерабатывающих предприятий, в целом. Для повышения результативности данной отрасли необходимо идентифицировать группы проблем, источники их возникновения, проводить корректирующий и предупреждающие действия. Применение системного подхода к решению возникающих проблем позволяет эффективно достигать поставленных целей в приоритетных направлениях развития государства в рамках реализации Национального проекта «Повышение производительности труда». Для достижения поставленных задач был выполнен анализ 3 предприятий мясной промышленности, расположенных в Кемеровской области, Кузбассе и Алтайском крае. Анализ основывался на наблюдении, регистрации проблем, выявления причин возникновения и разработке стандартных решений для устранения типовых проблем в производственном процессе, с целью повышения эффективности труда мясоперерабатывающих предприятий. В ходе исследований выявленные проблемы объединены в блоки: планирование производства; излишние запасы сырья и готовой продукции; низкая выработка производственных рабочих; низкая сменная производительность подразделений. Апробировав предлагаемые решения на предприятиях мясной промышленности, выявлены ожидаемые результаты.

Ключевые слова: оптимизация, улучшение, типовые проблемы, решения, производственные процессы, мясная промышленность, мясоперерабатывающая отрасль, планирование производства.

Для цитирования: Ермолаева Е. О., Безносов Ю. В., Титоренко Е. Ю., Устинова Ю. В. Типовые проблемы производительности труда технологических процессов на мясоперерабатывающих предприятиях // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 59–65. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.009. EDN: <https://elibrary.ru/NNMVET>.

Original article

TYPICAL PROBLEMS OF LABOR PRODUCTIVITY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AT MEAT PROCESSING ENTERPRISES

Evgeniya O. Ermolaeva ¹, Yurij V. Beznosov ², Elena Yu. Titorenko ³,
Yuliya V. Ustinova ⁴

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, Russia
eoo38191@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2312-7955>

² ZAO «НеоКор» (CJSC «НеоКор»), Kemerovo, Russia
corellings@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6293-3693>

© Ермолаева Е. О., Безносов Ю. В., Титоренко Е. Ю., Устинова Ю. В., 2025

³ Kemerovo State Medical University, Kemerovo, Russia
lok-13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5635-2054>

⁴ Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
yul48888048@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1649-889X>

Abstract. To ensure successful business operations, enterprise management is required, which includes not only instant coordination and control of production processes, but also long-term planning based on solving three key issues. In different periods of the company's life cycle, these issues can be solved in different ways, but many experts believe that if goods are produced taking into account the needs of the consumer, then management becomes more automated. Production in the meat processing industry has its own specifics related to the physico-chemical properties of raw materials and the peculiarities of production technologies. These features determine certain requirements for the organization of the production process, such as mandatory compliance with SanPiNs, technical regulations of the Customs Union, sanitary and hygienic requirements and veterinary and sanitary rules. Thus, it has become relevant to consider several meat industry enterprises and identify the main, typical problems of the production process. The purpose of the research was to develop recommendations for improving the production processes of meat processing enterprises in general. To improve the effectiveness of this industry, it is necessary to identify groups of problems, their sources, and carry out corrective and preventive actions. The application of a systematic approach to solving emerging problems makes it possible to effectively achieve the goals set in the priority areas of state development within the framework of the National Project "Increasing Labor Productivity". To achieve these objectives, an analysis of 3 meat industry enterprises located in the Kemerovo region, Kuzbass and Altai Territory was carried out. The analysis was based on observation, registration of problems, identification of causes and development of standard solutions to eliminate typical problems in the production process, in order to increase the efficiency of meat processing enterprises. In the course of the research, the identified problems are combined into blocks: production planning; excessive stocks of raw materials and finished products; low production workers; low shift productivity of departments. Having tested the proposed solutions at meat industry enterprises, the expected results were revealed.

Keywords: optimization, improvement, typical problems, solutions, production processes, meat industry, meat processing industry, production planning.

For citation: Ermolaeva, E.O., Beznosov, Yu.V., Titorenko, E.Yu. & Ustinova, Yu.V. (2025). Typical problems of labor productivity of technological processes at meat processing enterprises. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 59-65. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.009. EDN: <https://elibrary.ru/NNMVET>.

ВВЕДЕНИЕ

Планирование деятельности предприятия представляет собой сложный и многогранный процесс, который включает в себя выбор оптимальных стратегий для развития компании с учетом различных факторов, таких как экономическая ситуация в стране, состояние конкретной отрасли и внутренние ресурсы самой организации. Этот процесс требует тщательного анализа и прогнозирования, что делает его крайне важным для успешного функционирования бизнеса. В рамках планирования деятельности предприятия выделяются несколько ключевых задач, среди которых особое место занимает производственное планирование. Оно является неотъемлемой частью общей системы планирования и представляет собой процесс, направленный на определение объема, ассортимента и сроков производства товаров или услуг. Производственное планирование может быть как среднесрочным, так и краткосрочным, в зависимости от целей и задач, стоящих перед компанией [1, 2].

Производственные планы часто формируются на основе долгосрочных и среднесрочных стратегий в области маркетинга и продаж. Это позволяет эффективно распределять ресурсы и минимизировать затраты. В современных условиях, когда компании сталкиваются с высокой конкуренцией и быстро меняющимися условиями рынка, использование технологий и инструментов анализа данных становится особенно актуальным. Системы управления производственными процессами, основанные на данных, позволяют предприятиям оперативно реагировать на изменения в спросе и оптимизировать свои производственные

мощности. Также стоит отметить, что производственное планирование не заканчивается на этапе разработки планов. Важно осуществлять постоянный мониторинг и корректировку планов в зависимости от фактических результатов и изменений на рынке. Это требует от компаний гибкости и способности адаптироваться к новым условиям. Таким образом, планирование деятельности предприятия, в частности производственное планирование, является критически важным процессом, который требует комплексного подхода и использования современных аналитических инструментов для достижения поставленных целей и обеспечения устойчивого развития бизнеса.

Качество плановых решений существенно зависит от компетентности и профессионального уровня плановых работников, а также от инструментов, которые используются для построения этого плана [3-6].

В современных условиях экономических отношений наблюдается пристальный интерес к концепции устойчивого развития, а поддержка высокого уровня потенциално является важным аспектом развития [7].

Учитывая растущий интерес к корпоративному управлению и корпоративной социальной ответственности (КСО), Комитет Международной организации по стандартизации (ИСО) по потребительской политике (ISO/COPOLCO) начал обсуждение целесообразности внедрения стандарта системы управления КСО [8]. Данный факт определяет актуальность разработки и внедрения готовых решений в сфере управления, в том числе производственными процессами.

В современном мире руководство предприятия

ТИПОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

должно обладать навыками не только администрирования, но и уметь отслеживать ситуацию на рынке, проявлять инициативу и своевременно принимать меры по перераспределению ресурсов, направляя их туда, где они могут быть использованы с наибольшей выгодой для обеспечения устойчивого экономического роста бизнеса [9, 10]. Не всегда руководство справляется с поставленной задачей и готовые решения для устранения основных производственных проблем является современным направлением развития предприятия.

В России мясная промышленность играет значительную роль на продовольственном рынке, представляя собой сектор, сосредоточенный на производстве мяса и мясопродуктов. Данный сектор характеризуется не только увеличением объемов производства, спроса и потребления мясных изделий, но и важностью производимого продукта как основного источника животного белка в рационе человека. На сегодняшний день мясоперерабатывающая отрасль является ключевым направлением пищевой промышленности, выпускающей разнообразную продукцию для питания, технических целей и медицины. В статье поднимается вопрос важности проблем мясоперерабатывающей промышленности при достижении поставленных целей [11].

МЕТОДЫ

В роли объектов исследования выступали мясоперерабатывающие предприятия Кемеровской области, Кузбасса и Алтайского Края.

В рамках выявления проблем исследуемых предприятий были применены методы наблюдения за процессом и регистрация проблем. С помощью метода систематизации выявленные проблемы поделены на блоки. Опираясь на современные научные достижения и разработки российских и зарубежных ученых в области организации производственного процесса, а также применении комплексного анализа полученной информации (расчет времени такта, разбивка процесса на операции, хронометраж, построение диаграмм сбалансированной работы) разработаны рекомендуемые решения выявленных проблем. С помощью эксперимента (внедрения решений) определены результаты, которые могут быть получены с помощью разработанных рекомендаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках реализации исследования на 5 предприятиях был проведен анализ проблем отраслевых предприятий. В статье проведен анализ типичных проблем, обнаруженных на различных предприятиях, а также уникальных проблем, связанных с особенностями организационно-технологического процесса на каждом отдельном предприятии. Основной упор сделан на общие проблемы, характерные для отраслевых предприятий, которые были объединены в типовые группы проблем в организационно-производственных блоках, влияющих на эффективность выполнения ключевой задачи.

Рассматриваемый периметр производственного процесса соответствует процессу полного цикла,

т.е. от приемки и убоя / первичной переработки, до хранения / отгрузки готовой продукции. Большие запасы готовой продукции на складах приводят к длительному пролеживанию скоропортящейся продукции, что увеличивает риски непринятия (отказа) к реализации со стороны торговых сетей готовой продукции с маленьким остаточным сроком годности из-за запрета возврата просроченной продукции производителям, в том числе мясной.

Для производства мясных продуктов важно соблюдать все этапы длительных физико-химических процессов, таких как выдержка, замораживание, консервирование, обмочка, созревание, охлаждение, посол, сушка, стерилизация и другие. На мясоперерабатывающем предприятии производятся скоропортящиеся продукты, поэтому важно обеспечить холодильную и тепловую обработку, соблюдать определенные климатические условия хранения, включая температуру и влажность, чтобы сохранить качество продукции.

Кроме того, на крупных предприятиях основные технологические процессы, включая процессы транспортировки, автоматизированы, что значительно снижает участие человека. В то время, как на небольших предприятиях эти процессы механизированы и должны находиться под постоянным контролем и управлением производственного персонала.

Процессы термообработки на большинстве предприятиях находятся на схожем уровне: используются термокамеры с программируемым управлением и камеры интенсивного охлаждения (души), но на очень крупных заводах применяются высокопроизводительные автоматизированные линии термообработки.

Что касается упаковки и маркировки, то эти процессы обычно организованы в упаковочных линиях. Здесь выкладка продукции на линию и размещение упакованных товаров в транспортную тару выполняются вручную, независимо от типа используемой тары (одноразовой или возвратной).

На предприятиях, где автоматизация управленческих процессов находится на низком уровне, ручным способом осуществляется формирование крупных и мелких заказов, включая контроль, взвешивание и подготовку документов. Автоматически создается лишь список товаров для заказа. В случае предприятий с высоким уровнем автоматизации управления автоматически происходит формирование списка товаров для заказа, взвешивание и документооборот, а также контроль, в то время как сам процесс физического сбора заказов может быть как ручным, так и автоматизированным.

Для предприятий, у которых ограничены возможности по хранению сырья и готовой продукции, необходимо быстро реализовывать всю произведенную продукцию через различные торговые сети. Они, в свою очередь, стремятся получить доступ к дешевым товарам для поднятия собственной прибыли, что создает сложности для производителей, так как условия для сотрудничества с торговыми сетями все более жесткие (плата за вход, плата за количество SKU, различные акции, штрафы и др.).

Для успешной работы с торговыми сетями нужно своевременно отгружать необходимое количество высококачественной готовой продукции с достаточной длительностью срока годности.

В связи с вышесказанным, основной задачей мясоперерабатывающих предприятий является обеспечение своевременных продаж продукции через сбытовые сети, которые являются их заказчиками, выпуск необходимого объема продукции и своевременная доставка, что гарантирует высокий уровень удовлетворенности торговых сетей, обеспечивает безопасность репутации предприятия и удовлетворенность клиентов [12].

В результате проведения анализа были выявлены типовые проблемы, которые возникают на нескольких предприятиях одновременно. После

Таблица 1 – Группы типовых проблем производственного процесса мясоперерабатывающих предприятий

Table 1 – Groups of typical problems of the production process of meat processing enterprises

Типовые проблемы производственного процесса	Причины возникновения
Блок проблем № 1 Планирование производства	
Отсутствие ясности по срокам выполнения заказов Систематические переработки (вечеровки) Резервирование продукции при планировании на 20–30 % объемов сверх заказов Высокая трудоемкость процесса ручного планирования производства	Неправильное определение параметров плана производства (точка запуска и партия запуска)
Неравномерные недельные задания для смены от маркетинга Недостача необходимого количества продукции в установленный срок отгрузки заказа или срыва сроков поставки Возврат продукции на переупаковку в требуемый форм-фактор Неравномерные заявки на отгрузку	Отсутствие постоянного контроля выполнения производственного задания и немедленного реагирования при выявлении отклонений Ручной (низко-производительный) способ планирования производства
Блок проблем № 2 Излишние запасы сырья и готовой продукции	
Простой убойного цеха из-за переполнения камеры потушного хранения Переполнение накопителя жилованного мяса из-за недостаточного отбора сырья Нет возможности производить нужное сырье из-за переполнения камеры созревания Большие запасы ГП Длительное время пролеживания готовой продукции на складе / истечение срока годности	Отсутствие обоснованного расчета оптимального запаса сырья и готовой продукции
Блок проблем № 3 Низкая выработка производственных рабочих	
Неравномерная загрузка обвальщиков и жиловщиков Много времени тратится сменным мастером для распределения сменного задания между обвальщиками и между жиловщиками Простой линии формовки / оператор выполняет вспомогательные операции Низкая загрузка подборщиков	Неравномерная подача сырья и материалов Разные времена циклов работы производственных рабочих
Блок проблем № 4 Низкая сменная производительность подразделений	
Отсутствие / невыход (в т.ч. по больничным листам) персонала необходимой квалификации на рабочие места Некорректные нормативы выработки обвальщиками / жиловщиками	Отсутствие подменного персонала необходимой квалификации Отсутствие трудовых ресурсов для найма специалистов в производственный процесс Отсутствие подменного фонда на больничные и отпуска Неэффективная система мотивации персонала Влияние санитарно-гигиенических и психофизических факторов существующих условий труда на рабочих
Блок проблем № 5 Несвоевременная отгрузка заказов	
Несвоевременная сборка мелких заказов	Длительный процесс сборки мелких заказов

На своевременное производство необходимого объема продукции для отгрузки клиентам значительно влияют проблемы блока «Планирование производства». К ним относят:

- отсутствие ясности по срокам выполнения заказов;

анализа полученных данных они были объединены в группы организационно-производственных проблем, влияющих на эффективность основной задачи. По степени воздействия на основную задачу эти проблемные группы были упорядочены следующим образом:

- 1) планирование производства;
- 2) излишние запасы сырья и готовой продукции;
- 3) низкая выработка производственных рабочих;
- 4) низкая сменная производительность подразделений;
- 5) несвоевременная отгрузка заказов [12].

В таблицу 1 сведены пять блоков (групп) типовых проблем производственного процесса мясоперерабатывающего предприятия и основные причины их возникновения.

- систематические переработки (вечеровки);
- резервирование продукции при планировании на 20–30 % объемов сверх заказов;
- высокая трудоемкость процесса ручного планирования производства;

ТИПОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

- неравномерные недельные задания для смены от маркетинга;
- недостача необходимого количества продукции в установленный срок отгрузки заказа или срыва сроков поставки;
- возврат продукции на переупаковку в требуемый форм-фактор;
- неравномерные заявки на отгрузку.

Неэффективное планирование может быть вызвано неправильным определением параметров плана производства (точка запуска и партия запуска), отсутствием регулярного контроля за выполнением

нением производственных заданий и недостаточной оперативностью реагирования в случае отклонения, а также использование ручного, менее эффективного и низко-производительного способа планирования производства.

В свою очередь, разработаны решения, проблем, обозначенных ранее, а также получены результаты на основании применения рекомендуемых решений на предприятиях мясоперерабатывающей промышленности Кемеровской области – Кузбасса и Алтайского края (таблица 2).

Таблица 2 – Решения типовых проблем производственного процесса мясоперерабатывающих предприятий

Table 2 – Solutions to typical problems of the production process of meat processing enterprises

Рекомендуемые решения	Бизнес-процесс	Результаты применения рекомендуемых решений
1	2	3
Блок проблем № 1 Планирование производства		
<i>Рекомендации по организации планирования производственных процессов:</i>		
Расчет точки запуска в производство продукции по каждой номенклатуре	Получение заявок и планирование производства	Сокращение запасов и сроков выполнения заказов
Определение оптимальной партии запуска в производство по каждой номенклатуре	Получение заявок и планирование производства	Сокращение запасов и сроков выполнения заказов. Повышение производительности подразделений
Внедрение производственного анализа для выявления и решения проблем по отклонениям от плана	Производство сырья / полуфабрикатов / готовой продукции (основной процесс)	Повышение производительности подразделений
Предложения по автоматизации процесса производственного планирования	Получение заявок и планирование производства	Сокращение запасов и сроков выполнения заказов
Блок проблем № 2 Излишние запасы сырья и готовой продукции		
<i>Рекомендации по оптимизации запасов готовой продукции на складе:</i>		
Выполнение ABC/XYZ анализа продаж продукции	Хранение готовой продукции, формирование и отгрузка заказов клиентам	Сокращение запасов и сроков выполнения заказов
Определение / расчет необходимых запасов на складе по каждой номенклатуре	Хранение готовой продукции, формирование и отгрузка заказов клиентам	Сокращение запасов и сроков выполнения заказов
Рекомендации по периодичности проведения ABCXYZ анализа для актуализации норматива запасов по каждой номенклатуре	Хранение готовой продукции, формирование и отгрузка заказов клиентам	Сокращение запасов и сроков выполнения заказов
Блок проблем № 3 Низкая выработка производственных рабочих		
<i>Рекомендации по использованию инструмента БП – «Стандартизированная работа»:</i>		
Определение темпа (такта) выпуска продукции	Производство сырья / полуфабрикатов / готовой продукции (основной процесс)	Повышение производительности подразделения
Предложения по стандартизации работы обвальщиков и жиловщиков и других работников производственной сферы	Производство сырья / полуфабрикатов / готовой продукции (основной процесс)	Повышение производительности труда персонала
Блок проблем № 4 Низкая сменная производительность подразделений		
<i>Рекомендации по работе с персоналом:</i>		
<i>Рекомендации по организации системы управления и развития компетенций персонала:</i>		
Разработка матриц компетенций персонала	Управление компетенциями производственного персонала	Повышение производительности подразделения
Создание стратегии по развитию компетенций персонала	Управление компетенциями производственного персонала	Повышение производительности труда персонала Повышение производительности подразделения
<i>Рекомендации по применению разных схем найма/привлечения трудовых ресурсов для производственного процесса:</i>		
Временное привлечение сторонних сотрудников	Наём производственного персонала	Повышение производительности подразделения Снижение затрат на производство
Применение вахтового метода работы производственного персонала	Наём производственного персонала	Повышение производительности подразделения Снижение затрат на производство

Продолжение таблицы 2 / Continuation of table 2

1	2	3
Рекомендации по определению списочной численности производственного персонала	Управление численностью производственного персонала	Повышение производительности подразделения
Рекомендации по системе мотивации персонала [13–15]:		
Внедрить систему дополнительной мотивации персонала, снижающую уровень заболеваемости	Управление мотивацией производственного персонала	Повышение производительности подразделения
Корректное применение показателя выполнения плана производства для дополнительной мотивации персонала	Производство сырья / полуфабрикатов / готовой продукции (основной процесс)	Повышение производительности подразделения
Рекомендации по улучшению эргономики рабочих мест	Производство сырья / полуфабрикатов / готовой продукции	Повышение производительности труда персонала
Блок проблем № 5 Несвоевременная отгрузка заказов		
Рекомендации по организации процесса сборки мелких заказов:		
Схемы организации склада ГП Повышение производительности труда персонала	Хранение ГП, формирование и отгрузка заказов клиентам	Сокращение запасов и сроков выполнения заказов
Организация адресное хранение продукции с системой быстрого доступа заказов	Хранение ГП, формирование и отгрузка заказов клиентам	Повышение производительности труда персонала. Сокращение запасов и сроков выполнения
Организация участка (зоны) сборки мелких заказов	Хранение готовой продукции, формирование и отгрузка заказов клиентам	Повышение производительности труда персонала. Сокращение запасов и сроков выполнения заказов

Таким образом, согласно таблицы 2, предприятия мясоперерабатывающей промышленности могут использовать готовые решения основных проблем, выявленных в данной отрасли, и получать положительные результаты оптимизации производственных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективное планирование производства – это залог успешной работы любого предприятия. Ключевым моментом здесь является точное определение и оптимизация ключевых параметров производственного плана. Речь идет, прежде всего, о точке запуска (trigger point) и размере партии запуска (batch size). Определение оптимальной точки запуска напрямую связано с прогнозированием спроса и учетом запасов на складе. Оптимизация точки запуска часто достигается с помощью методов прогнозирования. Размер партии запуска, в свою очередь, влияет на эффективность использования оборудования и затраты на переналадку. Большие партии снижают затраты на переналадку, но увеличивают складские запасы и риск хранения неликвидной продукции. Малые партии, наоборот, минимизируют запасы, но увеличивают частоту переналадок и, как следствие, затраты на них. Оптимальный размер партии определяется с учетом баланса между этими двумя факторами. Помимо точной настройки этих параметров, эффективное планирование производства требует внедрения систем производственного анализа. Это включает в себя постоянный мониторинг производственных показателей, выявление узких мест и проблемных участков, использование методов решения проблем. После выявления проблем необходимо разработать и реализовать эффективные решения типовых проблем. Автоматизация процесса планирования производства играет ключевую роль в повышении эффективности.

В итоге, комплексный подход, включающий в

себя точное определение параметров плана, систематический анализ, реализацию решений и автоматизацию процессов, обеспечивает создание высокоеффективной системы планирования производства, позволяющей компании достичь высокой производительности, снизить затраты и повысить конкурентоспособность.

Практическое значение заключается в том, что представленные решения могут быть использованы на предприятиях мясоперерабатывающей промышленности в целях повышения производительности и эффективности производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пилюгин А.Б., Юртайкин Е.А. Процессный подход к информационному менеджменту // Ползуновский вестник. 2006. № 1. С. 181–190.
- Influence of management automation on managerial decision-making in the agro-industrial complex / S. Dokholyan [и др.] // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2022. Т. 13. № 6. С. 597–603. doi: 10.14569/IJACSA.2022.0130672.
- Трофимова Н.Б., Ермоляева Е.О., Трофимов И.Е. Разработка программного продукта для автоматизации учета несоответствий и нарушений критических пределов на производстве // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 1. С. 167–175. doi: 10.21603/2074-9414-2020-1-167-175.
- Петрунина И.В. Микроэлементное нормирование труда на предприятиях мясной отрасли // Мясная индустрия. 2020. № 9. С. 14–16. doi: 10.37861/2618-8252-2020-9-14-20.
- Аспекты внедрения систем менеджмента безопасности труда на мясоперерабатывающих предприятиях / Крюченко Е.В. [и др.] // Мясная индустрия. 2019. № 6. С. 22–25.
- Никитина М.А., Захаров А.Н. Бережливое производство как инструмент повышения производительности труда и повышения качества продукции. Все о мясе. 2020. № 1. С. 25–30. doi: 10.21323/2071-2499-2020-1-25-29.
- Шнайдер В.В. Современный интерес к концепции устойчивого развития организации // Гуманитарные балканские исследования. 2019. Т. 3. № 4 (6). С. 71–74. doi: 10.34671/SCH.HBR.2019.0304.0018.
- Integrating corporate social responsibility (CSR) into ISO management systems – in search of a feasible CSR

ТИПОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

management system framework / P. Castka [и др.] // The TQM Magazine. 2004. Т. 16. № 3. С. 216–224. doi: 10.1108/09544780410532954.

9. Лукьянов В.И. Баланс устойчивого экономического развития организаций // Пищевая промышленность. 2008. № 1. С. 32–33.

10. Лукьянов В.И. Уверенная поступь : баланс устойчивого экономического развития организаций // Российское предпринимательство. 2007. № 9–2. С. 41–44.

11. Есина А.Р. Особенности организации производственного процесса на предприятиях мясной промышленности // Научные исследования и разработки. Экономика фирмы. 2013. Т. 2. № 2. С. 39–44.

12. Ермолаева Е.О. Актуальность автоматизации процесса планирования производства в агропромышленном комплексе: Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации» : материалы XII Инновационного конвента. Кемерово : КемГУ, 2024. С. 88–90.

13. Титоренко Е.Ю., Ермолаева Е.О. Мотивация персонала как гарантия стабильности качества // Пожарная безопасность, системы жизнеобеспечения, промышленные технологии: проблемы и перспективы : материалы I Международной научно-практической конференции. Кемерово : КемГУ, 2024. С. 146–148.

14. Строителева Т.Г. Особенности формирования мотивации труда в современных условиях // Ползуновский вестник. 2006. № 1. С. 205–207.

15. Строителева Т.Г., Гатаулин Д.В. Становление и развитие мотивации труда и трудовых отношений на промышленных предприятиях // Ползуновский вестник. 2006. № 3–1. С. 168–170.

Информация об авторах

Е. О. Ермолаева – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством» Кемеровского государственного университета.

Ю. В. Безносов – кандидат технических наук, заместитель генерального директора ЗАО «НеоКор».

Е. Ю. Титоренко – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Гигиена» Кемеровского государственного медицинского университета.

Ю. В. Устинова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии хранения и переработки продуктов животноводства» Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева.

REFERENCES

1. Pilyugin, A.B. & Yurtajkin, E.A. (2006). A process approach to information management. Polzunovskij vestnik, (1), 181-190. (In Russ.).
2. Dokholyan, S., Ermolaeva, E.O., Verkhovod, A.S., Duply, E.V., Gorokhova, A.E., Sekerin, V.D. & Ivanov, V.A. (2022). Influence of management automation on managerial decision-making in the agro-industrial complex. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. (6. V.13.). 597-603. doi: 10.14569/IJACSA.2022.0130672.
3. Trofimova, N.B., Ermolaeva, E.O. & Trofimov, I.E. (2020). Development of a Software Product for the Automation of Hazard Analysis and Critical Control Points in Food Production. Food Processing: Techniques and Technology, (1. V. 50), 167-175. (In Russ.).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья

4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)

УДК 637.181 + 637.136.5

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.010

EDN: EVECWO

ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ РОДИОЛЫ И ЭЛЕУТЕРОКОККА НА ФЕРМЕНТАЦИЮ БОБОВО-ЗЛАКОВОЙ СУСПЕНЗИИ

Дарья Андреевна Самсонова ¹, Виталина Дмитриевна Кийски ²,
Максим Станиславович Иванов ³, Наталья Владимировна Яковченко ⁴

^{1, 2, 3, 4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹ dashafom19@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1770-4456>

² vdkiiski@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7343-3451>

³ msivanov@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5754-5026>

⁴ nviakovchenko@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5188-5916>

Аннотация. Добавление функциональных ингредиентов, в том числе растительных экстрактов, может по-разному влиять на процесс ферментации. Было изучено влияние сухих экстрактов корней родиолы и элеутерококка на процесс ферментации бобово-злаковой супензии из сои, пшеницы, тыквенных семян и гороха культурами *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *Bifidobacterium bifidum*, *Streptococcus thermophilus*. Рациональная доза внесения экстрактов родиолы и элеутерококка в супензию составила по 0,5 %. Результаты исследования показали, что добавление сухих экстрактов в большинстве случаев удлиняет процесс ферментации растительной смеси супензий на 2–4 часа по сравнению с контролем, без добавления экстрактов. Процесс ферментации растительной смеси с экстрактами занимает от 8 до 22 часов, при этом культура *L. bulgaricus* проявила наименьшую адаптивную способность к растительной матрице – ферментация длилась от 18 часов. Было обнаружено, что экстракты корней родиолы и элеутерококка оказывают стимулирующее воздействие на рост и выживаемость микроорганизмов, однако выраженность данного эффекта зависит от используемой культуры микроорганизмов. Так, наиболее высокое содержание микроорганизмов – 9,82, с приростом в 14 % было выявлено у образца, ферментированного *S. thermophilus* с элеутерококком, при этом наибольший прирост микроорганизмов был у образцов с родиолой, ферментированных *L. bulgaricus* (прирост в 42 % до 8,07 lg(KOE/мл)) и *B. bifidum* (прирост в 28 % до 8,87 lg(KOE/мл)). Добавление экстрактов также значительно увеличивает антиоксидантную активность ферментированной растительной смеси, приблизительно в 2 раза до 87,89 % с экстрактом родиолы и до 84,38 % с экстрактом элеутерококка. Таким образом, экстракты корней родиолы и элеутерококка могут быть использованы для повышения содержания молочнокислых микроорганизмов и бифидобактерий в ферментированных растительных супензиях, а также для увеличения антиоксидантной активности и обогащения растительной супензии биологически активными веществами.

Ключевые слова: ферментация, растительная супензия, элеутерококк колючий, родиола розовая, растительные экстракты, адаптогены, антиоксидантная активность, прирост биомассы, молочнокислые микроорганизмы, бифидобактерии.

Для цитирования: Самсонова Д. А., Кийски В. Д., Иванов М. С., Яковченко Н. В. Влияние растительных экстрактов родиолы и элеутерококка на ферментацию бобово-злаковой супензии / Д. А. Самсонова [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 66–73. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.010. EDN: <https://elibrary.ru/EVECWO>.

Original article

INFLUENCE OF RHODIOLA AND ELEUTHEROCOCCUS PLANT EXTRACTS ON THE FERMENTATION OF LEGUME-CEREAL SUSPENSION

Daria A. Samsonova ¹, Vitalina D. Kiiski ², Maksim S. Ivanov ³,
Natalia V. Iakovchenko ⁴

^{1, 2, 3} ITMO University, St. Petersburg, Russia

¹ dashafom19@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1770-4456>

² vdkiiski@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7343-3451>

³ msivanov@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5754-5026>

⁴ nviakovchenko@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5188-5916>

© Самсонова Д. А., Кийски В. Д., Иванов М. С., Яковченко Н. В., 2025

ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ РОДИОЛЫ И ЭЛЕУТЕРОКОККА НА ФЕРМЕНТАЦИЮ БОБОВО-ЗЛАКОВОЙ СУСПЕНЗИИ

Abstract. The addition of functional ingredients, including plant extracts, influences the fermentation process in various ways. This study investigated the effect of dry extracts from *Rhodiola* and *Eleutherococcus* roots on the fermentation process of a plant-based suspension mixture composed of soy, wheat, pumpkin seeds, and peas, using *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *Bifidobacterium bifidum*, and *Streptococcus thermophilus* cultures. The optimal addition level of *Rhodiola* and *Eleutherococcus* root extracts to the plant suspension was determined to be 0.5% (w/w). The results demonstrated that, in most cases, the addition of dry extracts extended the fermentation process of the plant-based suspension mixture by 2 to 4 hours compared to the control sample without extracts. The total fermentation time for the plant-based mixture with extracts ranged from 8 to 22 hours. Among the tested cultures, *L. bulgaricus* showed the lowest adaptability to the plant-based medium, requiring at least 18 hours for fermentation to reach the desired endpoint. *Rhodiola* and *Eleutherococcus* root extracts were found to have a stimulating effect on microbial growth and survival, but the severity of this effect depends on the microbial culture used. The highest total viable cell count - 9.82 log (CFU/mL), representing a 14% increase - was observed in the *S. thermophilus*-fermented sample supplemented with *Eleutherococcus*. Notably, the most pronounced microbial proliferation was observed in samples fermented with *L. bulgaricus* and *B. bifidum* in the presence of *Rhodiola*, yielding increases of 42% (up to 8.07 log (CFU/mL)) and 28% (up to 8.87 log (CFU/mL)), respectively. Furthermore, the inclusion of plant extracts significantly enhanced the antioxidant activity of the fermented plant suspension, approximately doubling the activity to 87.89% with *Rhodiola* extract and 84.38% with *Eleutherococcus* extract. Thus, *Rhodiola* and *Eleutherococcus* root extracts can be utilized to enhance the content of lactic acid bacteria and bifidobacteria in fermented plant-based suspensions, as well as to increase antioxidant activity and enrich the suspension with biologically active compounds. In recent years, plant-based functional products, including fermented formulations, have gained.

Keywords: fermentation, plant suspension, *Eleutherococcus senticosus*, *Rhodiola rosea*, plant extracts, adaptogens, antioxidant activity, biomass growth, lactic acid microorganisms, bifidobacteria.

For citation: Samsonova, D.A., Kiiski, V.D., Ivanov, M.S. & Iakovchenko, N.V. (2025). Influence of rhodiola and eleutherococcus plant extracts on the fermentation of legume-cereal suspension. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 66-73. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.010. EDN: <https://elibrary.ru/EVECWO>.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития пищевой индустрии особую актуальность приобретает производство продуктов функциональной направленности на растительной основе, что обусловлено ростом потребительского спроса на экологически чистые, этичные и функциональные продукты питания [1]. Популярность таких продуктов связана с увеличением числа людей, придерживающихся веганских, вегетарианских и безлактозных диет, а также с растущей популярностью важности влияния питания на здоровье организма и окружающую среду [2].

Особое внимание в разработке продуктов функционального назначения уделяется использованию адаптогенов. Адаптогены – класс биологически активных веществ, которые обладают способностью повышать неспецифическую резистентность организма к стрессовым воздействиям, нормализовать гомеостаз, улучшая адаптационные возможности организма. Перспективными источниками адаптогенных веществ являются корни родиолы и элеутерококка. Родиола и элеутерококк обладают адаптогенными свойствами, которые связаны с модуляцией гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси и повышением устойчивости к физическим и эмоциональным нагрузкам.

Родиола розовая (*Rhodiola rosea* L.) является одним из наиболее известных адаптогенов, который используется в народной медицине для облегчения симптомов стресса и усталости, повышения физической и умственной работоспособности, защитных сил организма [3]. Фармакологические исследования *Rhodiola rosea* подтвердили её способность модулировать метаболические процессы в организме, способствуя улучшению обменных показателей. Установлено, что родиола снижает интенсивность гликолиза и уровень молочной кислоты в мышечной ткани, а также поддерживает

высокие концентрации фосфолипидов в печени и мышцах после продолжительной физической нагрузки [4]. Химический состав *Rhodiola rosea* включает около 140 биологически активных соединений, среди которых фенолы, гликозиды, терпены, коричный спирт и альдегид, флавоноиды, ароматические соединения, β-ситостерин, галловая кислота и её эфир – галлицин [5].

Элеутерококк колючий (*Eleutherococcus senticosus*) – это лекарственное растение, широко использующееся в медицине благодаря своим уникальным фармакологическим свойствам. Элеутерококк обладает адаптогенными и стимулирующими свойствами, способствуя повышению умственной и физической работоспособности, улучшению функций анализаторов, нормализации уровня глюкозы и аппетита; усиливает резистентность организма к стрессорам [6].

Клинические исследования элеутерококка выявили ряд его положительных эффектов: улучшение памяти и антидепрессантная активность, противовоспалительные свойства, снижение накопления продуктов перекисного окисления липидов, благоприятное влияние на глюкозо-инсулиновый метаболизм, гипогликемические свойства, снижение частоты и продолжительности респираторных инфекций [6].

Активными веществами экстракта корней элеутерококка являются фенилпропаноиды, лигнаны, кумарины, флавоноиды и тритерпеновые сапонины, при этом наиболее активными являются элеутерозиды В (сирингин), D и E, и кофейная кислота [7, 8].

В технологическом процессе создания функциональных пищевых продуктов на основе растительного сырья ферментация играет центральную роль. Этот этап не только способствует повышению пищевой ценности и обогащению продукта биологически активными первичными и вторичными метаболитами, положительно влияющими на микробиом кишечника

и общее состояние здоровья, но и значительно повышает его микробиологическую безопасность [9]. Кроме того, деятельность микроорганизмов обуславливает модификацию органолептических характеристик и реологических параметров конечного продукта, что имеет критическое значение для его потребительских свойств [10, 11, 12].

Добавление различных экстрактов может оказать влияние на процесс ферментации как отрицательно, так как экстракты могут обладать противомикробными свойствами, так и положительно, сокращая время ферментации. Так, ферментация коровьего молока с добавлением экстракта из листьев оливы для получения йогурта привела к сокращению времени ферментации и понижению pH по сравнению с контролем, повышению синерезиса, понижению влагоудерживающей способности и вязкости, при этом негативного влияния на жизнеспособность микроорганизмов оказано не было [13]. Положительный эффект на процесс ферментации также был отмечен при ферментации йогурта с традиционными корейскими травяными экстрактами [14]. Однако другое исследование показало, что добавление высоких концентраций экстрактов валерианы (*Valeriana officinalis L.*), шалфея (*Salvia officinalis L.*), ромашки (*Matricaria chamomilla L.*), цистуса (*Cistus L.*), липы цветущей (*Tilia L.*), подорожника ребристого (*Plantago lanceolata L.*), алтея

(*Althaea L.*), более 2 %, постепенно подавляют процесс ферментации [15].

Однако влияние растительных экстрактов родиолы и элеутерококка на процесс ферментации растительных супензий с использованием чистых культур микроорганизмов еще не было изучено. Таким образом, целью работы являлось определить влияние экстрактов родиолы и элеутерококка на ферментацию бобово-злаковой супензии из сои, пшеницы, тыквенных семян и гороха.

МЕТОДЫ

Исследования проводились в Университете ИТМО на базе лаборатории факультета биотехнологий. В исследованиях использовались смесь супензий из сои, тыквенных семян, пшеницы и гороха, сухие растительные экстракты из корней элеутерококка колючего (*Eleutherococcus senticosus*) и корней родиолы розовой (*Rhodiola rosea*); культуры микроорганизмов: *Lactobacillus acidophilus* 57S (Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия); *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (Yo100, Micromilks.r.l., Италия); *Bifidobacterium bifidum* (LYOBAC-D, ALCE, Италия); *Streptococcus thermophilus* (Danisco TA 40 LYO 50 DCU, Дания). Физико-химические свойства используемых экстрактов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические показатели сухих экстрактов из корней родиолы и корней элеутерококка
Table 1 – Physicochemical parameters of dry extracts from Rhodiola and Eleutherococcus roots

Экстракт	Элеутерококк	Родиола
Массовая доля влаги, %	4,68 ± 0,04	5,35 ± 0,04
Смачиваемость, с	67 ± 2	124 ± 3
Растворимость, %	88,42 ± 0,59	96,11 ± 0,65
Средний размер частиц при растворении, нм	774,74 (90,79 %) 217,86 (9,22 %)	7404,60 (52,79 %) 275,53 (47,22 %)
Полифенолы, мг галловой кислоты/г	74,67 ± 1,17	572,30 ± 4,22
Антиоксидантная активность DPPH, % (на 0,170 мг экстракта элеутерококка и на 0,192 мг экстракта родиолы)	41,90 ± 0,06	43,40 ± 0,07
Содержание БАВ, г/100 г сухих веществ	Элеутерозиды 1,16 ± 0,06	Салидрозид 1,07 ± 0,05

Таблица 2 – Физико-химические показатели смеси растительных супензий
Table 2 – Physicochemical parameters of the plant-based suspension mixture

Массовая доля белка, г/100 г	Массовая доля жира, г/100 г	Массовая доля углеводов, г/100 г	Массовая доля сухих веществ, г/100 г	Полифенолы, мг галловой кислоты/100 г	Активность по ингибираванию свободных радикалов (FRSA) с DPPH, %
2,95 ± 0,11	2,74 ± 0,08	2,43 ± 0,08	8,12 ± 0,24	68,21 ± 2,39	41,08 ± 1,23

Бобово-злаковую супензию получали следующим образом: растительное сырье замачивали в воде в соотношении 1:3 на 12 ч при температуре (4 ± 2) °C, после чего воду заменяли на свежую в том же объеме, который был удален. Разбухшее сырье с водой измельчали на блендере, после чего фильтровали полученную смесь через лавсановую ткань, плотностью 140 г/м2. При измельчении гидромодуль сои был увеличен до 1:10, гороха – до 1:5 для получения желаемых органолептических характеристик по вязкости, однородности, вкусу и запаху сырья. Полученные моносупензии из сои, семян тыквы, пшеницы и гороха смешивали в соотношении 11:6:6:2. Полученную смесь, бобово-злаковую

супензию, подогревали в термомиксе до температуры (30 ± 2) °C, вносили сухие экстракты и перемешивали в течение 10 минут, после чего пастеризовали при температуре (85 ± 2) °C с выдержкой 3 минуты. Пастеризация супензии обеспечивала показатели безопасности в соответствии с ТР ТС 021/2011 (КМАФАМ менее 1×10^4 КОЕ/г; дрожжи и плесени не обнаружены; БГКП не обнаружены в 1,0 г; *S. aureus* не обнаружены в 1,0 г; *B. cereus* не обнаружены в 0,1 г) [16]. Физико-химические показатели определяли в пастеризованной супензии без добавления экстрактов, результаты представлены в таблице 2.

Пастеризованную бобово-злаковую супензию, подогревали в термомиксе до температуры (30 ± 2) °C, вносили сухие экстракты и перемешивали в течение 10 минут, после чего пастеризовали при температуре (85 ± 2) °C с выдержкой 3 минуты. Пастеризация супензии обеспечивала показатели безопасности в соответствии с ТР ТС 021/2011 (КМАФАМ менее 1×10^4 КОЕ/г; дрожжи и плесени не обнаружены; БГКП не обнаружены в 1,0 г; *S. aureus* не обнаружены в 1,0 г; *B. cereus* не обнаружены в 0,1 г) [16]. Физико-химические показатели определяли в пастеризованной супензии без добавления экстрактов, результаты представлены в таблице 2.

Пастеризованную бобово-злаковую супензию, подогревали в термомиксе до температуры (30 ± 2) °C, вносили сухие экстракты и перемешивали в течение 10 минут, после чего пастеризовали при температуре (85 ± 2) °C с выдержкой 3 минуты. Пастеризация супензии обеспечивала показатели безопасности в соответствии с ТР ТС 021/2011 (КМАФАМ менее 1×10^4 КОЕ/г; дрожжи и плесени не обнаружены; БГКП не обнаружены в 1,0 г; *S. aureus* не обнаружены в 1,0 г; *B. cereus* не обнаружены в 0,1 г) [16]. Физико-химические показатели определяли в пастеризованной супензии без добавления экстрактов, результаты представлены в таблице 2.

Пастеризованную бобово-злаковую супензию, подогревали в термомиксе до температуры (30 ± 2) °C, вносили сухие экстракты и перемешивали в течение 10 минут, после чего пастеризовали при температуре (85 ± 2) °C с выдержкой 3 минуты. Пастеризация супензии обеспечивала показатели безопасности в соответствии с ТР ТС 021/2011 (КМАФАМ менее 1×10^4 КОЕ/г; дрожжи и плесени не обнаружены; БГКП не обнаружены в 1,0 г; *S. aureus* не обнаружены в 1,0 г; *B. cereus* не обнаружены в 0,1 г) [16]. Физико-химические показатели определяли в пастеризованной супензии без добавления экстрактов, результаты представлены в таблице 2.

ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ РОДИОЛЫ И ЭЛЕУТЕРОКОККА НА ФЕРМЕНТАЦИЮ БОБОВО-ЗЛАКОВОЙ СУСПЕНЗИИ

зию охлаждали до температуры ферментации: 37 °C – для *L. acidophilus* и *B. bifidum*; 40 °C – для *L. bulgaricus*; для *S. thermophilus* – 45 °C и вносили по 100 мкл биомассы микроорганизмов. Биомассу микроорганизмов получали по методике [16]. Ферментацию проводили до достижения pH 4,6–4,8.

Дозу добавления сухих экстрактов определяли методом гедонической оценки по пятибалльной шкале: очень сильно, сильно, достаточно, слабо, очень слабо [18]. В качестве критерия была выбрана степень интенсивности органолептических характеристик в зависимости от количества внесения экстрактов. В процессе ферментации определяли активную кислотность с помощью pH-метра и титруемую кислотность [19]. В ферментированных образцах определяли антиоксидантную активность (активность по ингибиции свободных радикалов (FRSA) с DPPH [20], и выживаемость микроорганизмов, которую определяли методом серийных разведений в стерильном 0,9 % растворе хлорида натрия с последующим посевом на питательную среду: MRS-агар для *L. acidophilus*; *L. bulgaricus*; *B. bifidum*; агар M17 для *S. thermophilus*, и культивированием при 37 °C в течение 72 часов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Перед началом ферментации была определена рациональная доза внесения сухих экстрактов родиолы и элеутерококка в бобово-злаковую супензию. Результаты органолептической оценки образцов супензии с внесенным экстрактом родиолы и супензии с внесенным экстрактом элеутерококка представлены на рисунке 1.

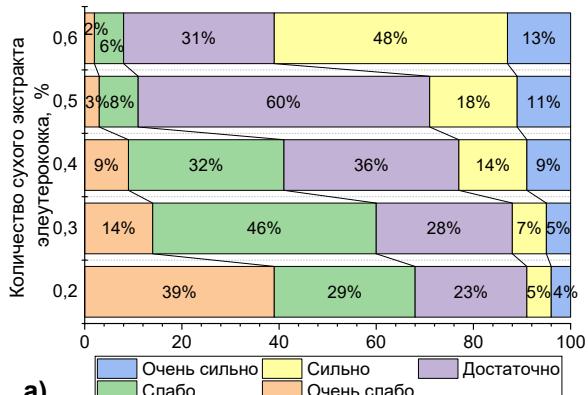
Экстракты вносили в количестве от 0,2 % до 0,6 %. При оценке количества внесения экстрактов учитывались органолептические характеристики, в частности, отсутствие негативного влияния экстрактов на вкус продукта. Согласно полученным результатам, рациональная доза внесения экстрактов родиолы и элеутерококка составляет по 0,5 % соответственно.

Для изучения процесса ферментации определяли динамику изменения pH и содержания молочной кислоты, представленные на рисунке 2. В качестве контроля была бобово-злаковая супензия без экстрактов.

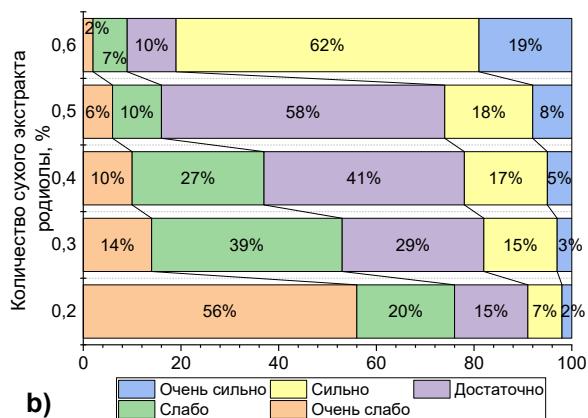
Контрольный образец достигает необходимой активной кислотности на 2–4 часа быстрее по сравнению с образцами с добавлением экстрактов в зависимости от используемой культуры и добавленных экстрактов, за исключением *B. bifidum*, при использовании которой все образцы достигли pH 4,8 за 8 часов. Небольшое торможение в ферментации может быть связано с тем, что культуры имеют незначительную чувствительность к розмарину, содержащемуся в экстракте родиолы, и обладающему антибактериальной активностью против некоторых штаммов микроорганизмов [21], а также чувствительность к биологически активным веществам (БАВ), содержащимся в элеутерококке.

Наименьшую адаптивную способность к бобово-злаковой супензии с экстрактами и без них проявила культура *L. bulgaricus*, так как процесс ферментации данной культуры занял от 18 часов (для контроля) до 22 часов (для образца с экстрактом элеутерококка). При ферментации образцов с куль-

турой *L. bulgaricus* в течение первых 10 часов происходит динамичное снижение pH и накопление молочной кислоты, после чего каждые два часа содержание молочной кислоты увеличивается незначительно по сравнению с предыдущим показателем, скорость снижения pH замедляется. При ферментации остальными культурами в течение всего процесса ферментации наблюдали экспоненциальную фазу роста микроорганизмов с умеренным увеличением уровня молочной кислоты и уменьшением pH.



a)



b)

Рисунок 1 – Влияние количества внесенного экстракта: а) элеутерококк; б) родиолы на гедоническую оценку бобово-злаковой супензии

Figure 1 – Effect of the amount of applied extract:
a) Eleutherococcus; b) Rhodiola on the hedonic evaluation of legume-cereal suspension

Важным критерием оценки эффективности ферментации является количество жизнеспособных клеток после ферментации. Жизнеспособность микроорганизмов в ферментированных образцах представлена на рисунке 3.

Результаты показывают, что, несмотря на удлинение длительности ферментации, добавление обоих экстрактов способствует повышению жизнеспособности всех исследуемых штаммов. Наиболее высокое содержание микроорганизмов наблюдали у образца, ферментированного *S. thermophilus* при внесении экстракта элеутерококка, где показатель достигает максимального значения – 9,82, с приростом в 14 %.

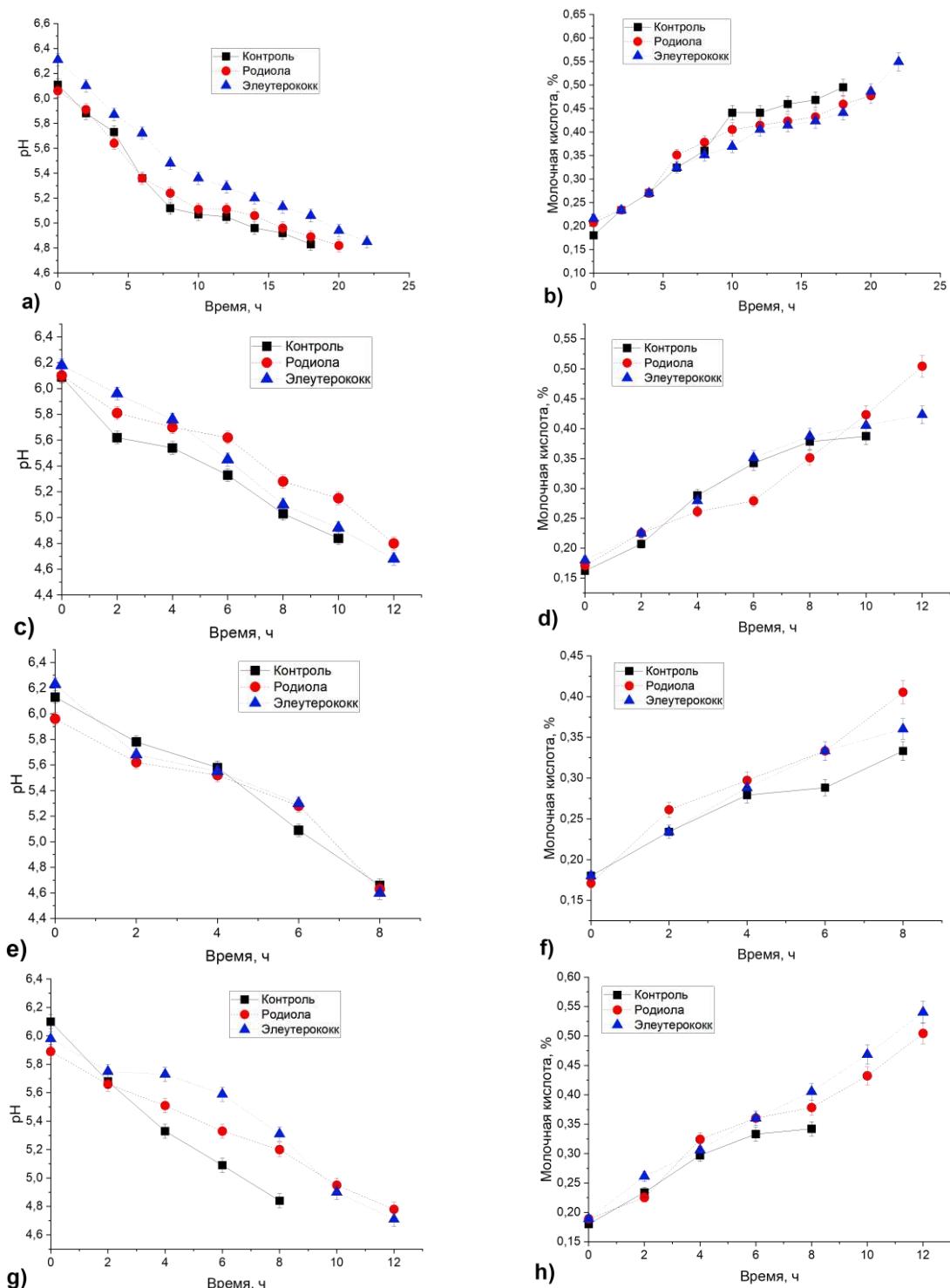


Рисунок 2 – Изменение активной кислотности и накопление молочной кислоты в бобово-злаковой супензии без добавления экстрактов и с экстрактами родиолы и элеутерокока при ферментации: (а, б) – *L. bulgaricus*; (с, д) – *L. acidophilus*; (е, ф) – *B. bifidum*; (г, х) – *S. thermophilus*

Figure 2 – Changes in active acidity and lactic acid accumulation in the legume-cereal suspension without extracts and with Rhodiola and Eleutherococcus extracts during fermentation: (a, b) – *L. bulgaricus*; (c, d) – *L. acidophilus*; (e, f) – *B. bifidum*; (g, h) – *S. thermophilus*

При этом наибольшее влияние на жизнеспособность *L. bulgaricus* и *B. Bifidum* оказал экстракт родиолы, при ферментации с которым, количество жизнеспособных клеток увеличилось по сравне-

нию с контрольным образцом на 42 % до 8,07 и на 28 % до 8,87 соответственно. На жизнеспособность *L. acidophilus* экстракты оказали незначительное влияние. Можно заключить, что сухие эк-

ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ РОДИОЛЫ И ЭЛЕУТЕРОКОККА НА ФЕРМЕНТАЦИЮ БОБОВО-ЗЛАКОВОЙ СУСПЕНЗИИ

тракты родиолы и элеутерококка оказывают стимулирующее воздействие на рост и выживаемость микроорганизмов *L. bulgaricus*, *B. bifidum*, *S. thermophilus*, что потенциально может быть использовано при производстве функциональных продуктов питания, ферментированных этими культурами.

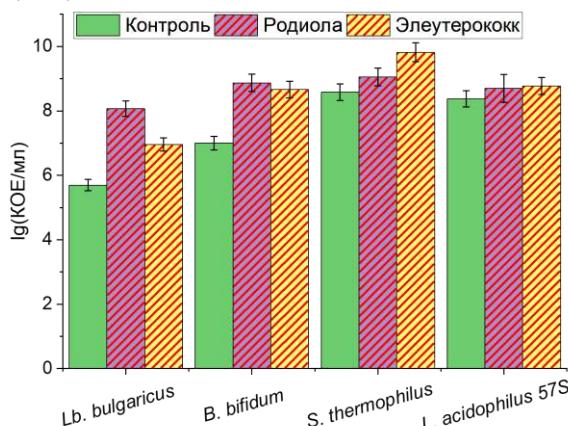


Рисунок 3 – Влияние внесения сухих экстрактов на жизнеспособность микроорганизмов в ферментированной бобово-злаковой супензии

Figure 3 – The effect of dry extract addition on the viability of microorganisms in the fermented legume-cereal suspension

Учитывая выраженную антиоксидантную активность экстрактов родиолы и элеутерококка, их введение в состав ферментированной бобово-злаковой супензии способствует значительному увеличению суммарного содержания антиоксидантных соединений. Влияние сухих экстрактов родиолы и элеутерококка на антиоксидантную активность после ферментации представлено на рисунке 4.

Результаты исследования показывают, что в контрольных образцах, без добавления экстрактов, уровень антиоксидантной активности существенно ниже по сравнению с образцами, содержащими экстракты родиолы и элеутерококка. При этом максимальные показатели антиоксидантной активности выявлены при внесении экстракта родиолы, который демонстрирует практически полное ингибирование свободных радикалов во всех исследуемых образцах, от 80,11 % до 87,89 % в зависимости от культуры микроорганизмов. Экстракт элеутерококка также оказывает выраженное стимулирующее влияние на антиоксидантную активность, однако его эффект несколько ниже, чем у родиолы, от 78,93 % до 84,38 %.

Таким образом, введение сухих экстрактов родиолы и элеутерококка в бобово-злаковую супензию и последующая ферментация приводит к значительному усилению антиоксидантной активности, что указывает на возможность их использования для повышения функциональной и биологической ценности ферментированных пищевых продуктов функциональной направленности.

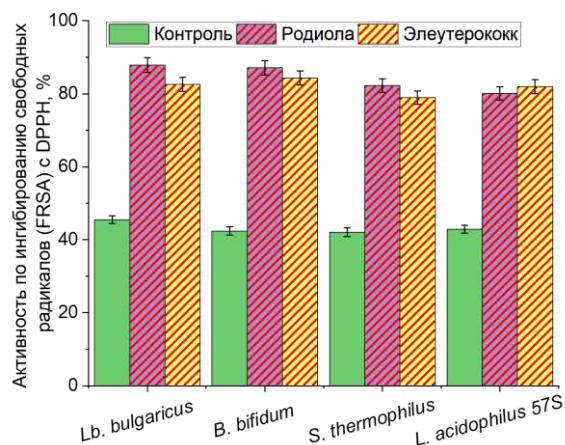


Рисунок 4 – Влияние внесения сухих экстрактов на антиоксидантную активность в ферментированной бобово-злаковой супензии

Figure 4 – The effect of dry extract addition on the antioxidant activity in the fermented legume-cereal suspension

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты показывают, что добавление сухих экстрактов родиолы и элеутерококка оказывает значительное положительное влияние на процесс ферментации бобово-злаковой супензии из сои, пшеницы, тыквенных семян и гороха и на показатели антиоксидантной активности полученного ферментированного продукта. Добавление сухих экстрактов корней элеутерококка и родиолы удлиняет процесс ферментации супензии на 2–4 часа в зависимости от используемой культуры микроорганизмов. Однако, несмотря на удлинение процесса ферментации, обогащение супензии экстрактами родиолы и элеутерококка оказалось положительное влияние на жизнеспособность микроорганизмов, а также привело к значительному увеличению антиоксидантной активности ферментированного продукта за счет содержания в них различных биологически активных веществ, в том числе обладающих антиоксидантными свойствами.

Создание ферментированных растительных продуктов, обогащенных экстрактами с БАВ и с высокой антиоксидантной активностью, предназначенных для различных групп населения, позволит расширить ассортимент растительных продуктов питания с потенциальными функциональными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Панасейкина В.С., Беляева Е.А. Тенденции спроса на экологические товары и ответственное потребление в России // Московский экономический журнал. 2021. № 8. С. 346–355.
- McClements, D.J. & Grossmann, L. (2021). The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4). DOI: 10.1111/1541-4337.12771.
- Федорова Г.А., Хохлова О.М., Фролов С.А. Экспертиза сырья лекарственного как универсальный

способ разрешения арбитражных споров, на примере исследования родиолы розовой // Вопросы российского и международного права. 2022. Т. 12, № 4А. С. 106–115. DOI: 10.34670/AR.2022.57.29.010.

4. Лекомцева Е.В., Жукова И.А., Тартаковский И.А. Эффективность и безопасность лечения экстрактом родиолы розовой WS 1375 пациентов с синдромом хронической усталости // Бюллетень сибирской медицины. 2013. Т. 12, № 5. С. 73–75. DOI: 10.20538/1682-0363-2013-5-73-75.

5. Белоzerova Л.И., Хадарцев А.А., Платонов В.В. Сравнительная характеристика химического состава женьшеня, элеутерококка и родиолы розовой // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2017. № 4. С. 11–24.

6. Комарова А.А., Степанова Т.В. Элеутерококк колючий – популярный адаптоген дальнего востока: история изучения, исследование биологической и фармакотерапевтической активности // Дальневосточный медицинский журнал. Фармакология и фармация. 2018. № 2. С. 65–71.

7. Kurkin V.A. & Ryazanova T.K. (2022). Methodological Approaches to Standardization of Rhizomes and Roots of *Eleutherococcus senticosus*. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 56(3), 366–373. DOI: 10.1007/s11094-022-06253-8.

8. Jin L., Schmiech M., El Gaafary M., Zhang X., Syrovets T. & Simmet T. (2020). A comparative study on root and bark extracts of *Eleutherococcus senticosus* and their effects on human macrophages. *Phytomedicine*, 68, 153181. DOI: 10.1016/j.phymed.2020.153181.

9. Shori A.B. (2016). Influence of food matrix on the viability of probiotic bacteria: A review based on dairy and non-dairy beverages. *Food Bioscience*, 13, 1–8. DOI: 10.1016/j.fbio.2015.11.001.

10. Siddiqui S.A., Erol Z., Rugji J., Taşçı F., Haticce Ahu Kahraman Toppi V., Musa L., Giacomo Di Giacinto, Nur Alim Bahmid, Mehdizadeh M. & Castro-Muñoz R. (2023). An overview of fermentation in the food industry – looking back from a new perspective. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1). DOI: 10.1186/s40643-023-00702-y.

11. Tangyu M., Muller J., Bolten C.J. & Wittmann C. (2019). Fermentation of plant-based milk alternatives for improved flavour and nutritional value. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(23–24), 9263–9275. DOI: 10.1007/s00253-019-10175-9.

12. Трансформация технологических свойств и органолептических характеристик растительного сырья в получении ферментированных аналогов молочных продуктов / Н.А. Галочкина [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2023. № 4. С. 92–99. DOI: 10.24412/2311-6447-2023-4-92-99.

13. Barukčić I., Filipan K., Lisak Jakopović K., Božanić Ž., Blažić M. & Repajić M. (2022). The Potential of Olive Leaf Extract as a Functional Ingredient in Yoghurt Production: The Effects on Fermentation, Rheology, Sensory, and Antioxidant Properties of Cow Milk Yoghurt. *Foods*, 11(5), 701. DOI: 10.3390/foods11050701.

14. Asli M., Khorshidian N., Mortazavian A. & Hosseini H. (2017). A Review on the Impact of Herbal Extracts and Essential Oils on Viability of Probiotics in Fermented Milks. *Current Nutrition & Food Science*, 13(1), 6–15. DOI: 10.2174/1573401312666161017143415.

15. Ziarno M., Kozłowska M., Ścibisz I., Kowalczyk M., Pawelec S., Stochmal A. & Szleszyński B. (2021). The Effect of Selected Herbal Extracts on Lactic Acid Bacteria Activity. *Applied Sciences*, 11(9), 3898. DOI: 10.3390/app11093898.

16. ТР ТС 021/2011 Технический регламент Тамо-

женного союза "О безопасности пищевой продукции" (с изменениями на 14 июля 2021 года). Технический регламент Таможенного союза от 09.12.2011 г. № 021/2011.

17. Перспективы применения пробиотических микроорганизмов при производстве ферментированных продуктов на гречневой основе / Р.Х. Гелазов [и др.] // Аграрная наука. 2024;4(4):138–145. DOI: 10.32634/0869-8155-2024-381-4-138-145.

18. ГОСТ ISO 11136-2017. Органолептический анализ. Методология. Общее руководство по проведению гедонических испытаний потребителями в контролируемой зоне : введ. 2019-01-01. Москва : Изд-во стандартов, 2017, 43 с.

19. ALZahrani A.J. & Shori A.B. (2023). Viability of probiotics and antioxidant activity of soy and almond milk fermented with selected strains of probiotic *Lactobacillus* spp. *LWT*, 176, 114531. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114531.

20. Shori A.B., Aljohani G.S., Al-zahrani A.J., Al-sulbi O.S. & Baba A.S. (2022). Viability of probiotics and antioxidant activity of cashew milk-based yogurt fermented with selected strains of probiotic *Lactobacillus* spp. *LWT*, 153, 112482. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112482.

21. Брюхачев Е.Н. Антибактериальная активность биологически активных веществ *Rhodiolarosea* L. // Междисциплинарные подходы в биологии, медицине и науках о Земле: теоретические и прикладные аспекты: Материалы симпозиума XV (XLVII) Международной научно-практической конференции. Кемерово: 2020. С. 29–32. EDN JFLRON.

Информация об авторах

Д. А. Самсонова – аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО.

В. Д. Кийски – аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО.

М. С. Иванов – аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО.

Н. В. Яковченко – кандидат технических наук, доцент факультета биотехнологий Университета ИТМО.

REFERENCES

- Panaseykina, V.S. & Belyaeva, E.A. (2021) Demand Trends for environmental products and responsible consumption in Russia. *Moscow Economic Journal*, (8), 346–355. (In Russ.).
- McClements, D.J. & Grossmann, L. (2021). The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4). DOI: 10.1111/1541-4337.12771.
- Fedorova, G.A., Khokhlova, O.M. & Frolov, S.A. (2022). Expert examination of medicinal raw materials as a universal way of resolving arbitration disputes, on the example of the study of *Rhodiola rosea*. *Issues of Russian and international law*, 12 (4A), 106–115. (In Russ.). DOI: 10.34670/AR.2022.57.29.010.
- Lekomtseva, E.V., Zhukova, I.A. & Tartakovskiy, I.A. (2013). Efficiency and safety of treatment with *Rhodiola rosea* extract WS 1375 patients with chronic fatigue syndrome. *Bulletin of Siberian Medicine*, 12(5), 73–75. (In Russ.). DOI: 10.20538/1682-0363-2013-5-73-75.
- Belozerova, L.I., Khadartsev, A.A., Platonov, V.V. (2017). Comparative characterization of the chemical composition of ginseng, *Eleutherococcus* and *Rhodiola rosea*. *Bulletin of New Medical Technologies. Electronic edition*, (4), 11–24. (In Russ.).
- Komarova, A.A. & Stepanova, T.V. (2018).

ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ РОДИОЛЫ И ЭЛЕУТЕРОКОККА НА ФЕРМЕНТАЦИЮ БОБОВО-ЗЛАКОВОЙ СУСПЕНЗИИ

Eleutherococcus senticosus - a popular adaptogen of the far east: history, study of biological and pharmacotherapeutic activity. *Far Eastern Medical Journal. Pharmacology and pharmacy*, (2), 65-71. (In Russ.).

7. Kurkin, V.A. & Ryazanova, T.K. (2022). Methodological Approaches to Standardization of Rhizomes and Roots of Eleutherococcus senticosus. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 56(3), 366-373. DOI: 10.1007/s11094-022-02653-8.

8. Jin, L., Schmiedeck, M., El Gaafary, M., Zhang, X., Syrovets, T. & Simmet, T. (2020). A comparative study on root and bark extracts of Eleutherococcus senticosus and their effects on human macrophages. *Phytomedicine*, 68, 153181. DOI: 10.1016/j.phymed.2020.153181.

9. Shori, A.B. (2016). Influence of food matrix on the viability of probiotic bacteria: A review based on dairy and non-dairy beverages. *Food Bioscience*, 13, 1-8. DOI: 10.1016/j.fbio.2015.11.001.

10. Siddiqui, S.A., Erol, Z., Rugji, J., Taşçı, F., Hatrice Ahu Kahraman, Toppi, V., Musa, L., Giacomo Di Giacinto, Nur Alim Bahmid, Mehdizadeh, M. & Castro-Muñoz, R. (2023). An overview of fermentation in the food industry - looking back from a new perspective. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1). DOI: 10.1186/s40643-023-00702-y.

11. Tangyu, M., Muller, J., Bolten, C.J. & Wittmann, C. (2019). Fermentation of plant-based milk alternatives for improved flavour and nutritional value. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(23-24), 9263-9275. DOI: 10.1007/s00253-019-10175-9.

12. Galochkina, N.A., Glinkina, I.M., Agutova, S.I., Glotova, I.A., Ukrina, E.YU., Tolkacheva, A.A. (2023). Transformation of Technological Properties and Organoleptic Characteristics of Plant Raw Materials in the Production of Fermented Dairy Alternatives. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex - Healthy Nutrition Products*, (4), 92-99. (In Russ.). DOI: 10.24412/2311-6447-2023-4-92-99.

13. Barukčić, I., Filipan, K., Lisak Jakopović, K., Božanić, R., Blažić, M. & Repajić, M. (2022). The Potential of Olive Leaf Extract as a Functional Ingredient in Yoghurt Production: The Effects on Fermentation, Rheology, Sensory, and Antioxidant Properties of Cow Milk Yoghurt. *Foods*, 11(5), 701. DOI: 10.3390/foods11050701.

14. Asli, M., Khorshidian, N., Mortazavian, A. & Hosseini, H. (2017). A Review on the Impact of Herbal Extracts and Essential Oils on Viability of Probiotics in Fermented Milks. *Current Nutrition & Food Science*, 13(1), 6-15. DOI: 10.2174/1573401312666161017143415.

15. Ziarno, M., Kozłowska, M., Ścibisz, I., Kowalczyk, M., Pawelec, S., Stochmal, A. & Szleszyński, B. (2021). The Effect of Selected Herbal Extracts on Lactic Acid Bacteria Activity. *Applied Sciences*, 11(9), 3898. DOI: 10.3390/app11093898.

16. TR CU 021/2011 Technical Regulations of the Customs Union «On the Safety of Food Products» (as amended on July 14, 2021) Technical Regulations of the Customs Union of 09.12.2011 N021/2011.

17. Gelazov, R.Kh., Iakovchenko N.V., Bayazitov, K.R. & Shiriaev, V.A. (2024). Prospects for the use of probiotic microorganisms in the production of fermented buckwheat-based products. *Agrarian science*, (4):138-145. (In Russ.). DOI: 10.32634/0869-8155-2024-3814-138-145.

18. Organoleptic analysis. Methodology. General guidelines for hedonic testing by consumers in a controlled area. (2017). HOST ISO 11136-2017 from 1 Jan. 2019. Moscow: Standards Publishing House. (In Russ.).

19. AL Zahran, A.J. & Shori, A.B. (2023). Viability of probiotics and antioxidant activity of soy and almond milk fermented with selected strains of probiotic *Lactobacillus* spp. *LWT*, 176, 114531. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114531.

20. Shori, A.B., Aljohani, G.S., Al-zahrani, A.J., Al-sulbi, O.S. & Baba, A.S. (2022). Viability of probiotics and antioxidant activity of cashew milk-based yogurt fermented with selected strains of probiotic *Lactobacillus* spp. *LWT*, 153, 112482. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112482.

21. Bryukhachev, E.N. Antibacterial activity of biologically active substances *Rhodiola rosea* L. *Interdisciplinary approaches in biology, medicine and Earth sciences: theoretical and applied aspects: Proceedings of the symposium XV (XLVII) International Scientific and Practical Conference*. Kemerovo: 2020. (In Russ.).

Information about the authors

D.A. Samsonova - Postgraduate student of the Faculty of Biotechnologies of the ITMO University.

V.D. Kiiski - Postgraduate student of the Faculty of Biotechnologies of the ITMO University.

M.S. Ivanov - Postgraduate student of the Faculty of Biotechnologies of the ITMO University.

N.V. Iakovchenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Faculty of Biotechnology of the ITMO University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК663.45
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.011

EDN: MFESBH

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДРОЖЖЕЙ ВЕРХОВОГО БРОЖЕНИЯ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПШЕНИЧНОГО ПИВА

Елена Петровна Каменская ¹, Галина Вадимовна Саберзянова ²

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

¹ kamenskaya.e.p@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3760-6914>

² ekam2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5931-347X>

Аннотация. Исследование посвящено особенностям использования различных штаммов верховых дрожжей в технологии пшеничного пива, а также оценки их влияния на качественные показатели готовых напитков. Объектами исследования служили сухие пивные дрожжи верхового брожения *Saccharomyces cerevisiae* штаммов *SafAle WB-06* и *SafAle T-58*. На этапе заторования солода вносился ферментный препарат *Аттенузим Коре* с основной глюкоамилазной активностью (1600 АГУ/г), доза внесения которого составила – 0,7 г/кг солода. Его использование позволило уменьшить мутнотость сусла и увеличилось содержание редуцирующих сахаров на 9,5 % по сравнению с контролем (без применения ферментного препарата). Установлено, что на протяжении всего периода главного брожения исследуемые штаммы показали стабильную динамику брожения пивного сусла. Более интенсивно брожение протекало в сусле с применением штамма *SafAle WB-06*, о чем свидетельствует величина действительной степени сбраживания молодого пива – 63,20 %. В результате анализа физико-химических показателей готового пива не было выявлено существенных различий между опытными образцами, за исключением показателей горечи и мутности, которые были несколько выше в образце с применением штамма *SafAle T-58*. Независимо от применения штамма дрожжей образцы готового пива соответствовали требованиям ГОСТ 31711-2012 Пиво. Общие технические условия. Хроматографический анализ побочных продуктов брожения в готовом пиве показал несколько большее их суммарное количество в образце с *SafAle WB-06* на 3,7 мг/дм³ по сравнению с образцом с *SafAle T-58*, без превышения пределов пороговых значений по всем исследуемым показателям. Согласно дегустационной оценке, лучшими характеристиками обладало пиво, сброшенное дрожжами штамма *SafAle WB-06* (23 балла), оно имело приятный, насыщенный вкус с легкими эфирными и фенольными нотами, характерный пшеничный аромат и умеренную хмельевую горечь. Образец, полученный с применением штамма *SafAle T-58* и набравший 20 баллов, имел яркую хмельевую горечь, обильную, устойчивую пену, но менее насыщенный вкусо-ароматический профиль.

Ключевые слова: пшеничное пиво, пивное сусло, дрожжи, верховое брожение, дображивание, молодое пиво, штамм, побочные продукты брожения.

Для цитирования: Каменская Е. П., Саберзянова Г. В. Исследование влияния дрожжей верхового брожения на качественные показатели пшеничного пива // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 74–80.
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.011. EDN: <https://elibrary.ru/MFESBH>.

Original article

STUDY OF INFLUENCE OF TOP FERMENTING YEAST ON QUALITY INDICATORS OF WHEAT BEER

Elena P. Kamenskaya ¹, Galina V. Sabrezyanova ²

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

¹ kamenskaya.e.p@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3760-6914>

² ekam2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5931-347X>

Abstract. The study is devoted to the features of using various strains of top-fermenting yeast in wheat beer technology, as well as assessing their impact on the quality indicators of finished beverages. The objects of the study were dry top-fermenting brewer's yeast *Saccharomyces cerevisiae* strains *SafAle WB-06* and *SafAle T-58*. At the stage of malt mashing, the enzyme preparation *Attenuzim Core* with basic glucoamylase activity (1600 AGU/g) was added at a dose of 0.7 g/kg of malt. Its use allowed to decrease the turbidity of the wort and increase the content of reducing sugars by 9.5% compared to the control (without using the enzyme preparation). It was found that throughout the entire period of main fermentation, the studied strains showed stable dynamics of beer wort fermentation. Fermentation was more intense in the wort using the *SafAle WB-06* strain, as evidenced by the actual fermentation degree of young beer - 63.20 %. The analysis of the physicochemical parameters of the finished beer did not reveal any significant differences between the test samples, with the exception of the bitterness and turbidity parameters, which were slightly higher in the sample using the *SafAle T-58* strain. Regardless of the yeast strain used, the finished beer samples met the requirements of GOST 31711-2012 Beer. General specifications. Chromatographic analysis of fermentation by-products in the

© Каменская Е. П., Саберзянова Г. В., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДРОЖЖЕЙ ВЕРХОВОГО БРОЖЕНИЯ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПШЕНИЧНОГО ПИВА

finished beer showed a slightly higher total amount in the sample with SafAle WB-06 by 3.7 mg/dm³ compared to the sample with SafAle T-58, without exceeding the threshold limits for all the studied parameters. According to the tasting evaluation, the beer fermented with the SafAle WB-06 strain yeast had the best characteristics (23 points), it had a pleasant, rich taste with light ester and phenolic notes, a characteristic wheat aroma and moderate hop bitterness. The sample obtained using the SafAle T-58 strain and scored 20 points, had a bright hop bitterness, abundant, stable foam, but a less rich flavor and aroma profile.

Keywords: wheat beer, beer wort, yeast, top fermentation, secondary fermentation, young beer, strain, fermentation by-products.

For citation: Kamenskaya, E.P. & Sabrezyanova, G.V. (2025). Study of influence of top fermenting yeast on quality indicators of wheat beer. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 74-80. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.011. EDN: <https://elibrary.ru/MFESBN>.

ВВЕДЕНИЕ

Производство пива является одним из самых сложных в технологическом смысле процессов в пищевой промышленности. Для получения готового пива с высокими стандартами качества необходимо применять не только качественное сырье, но и учитывать большое количество нюансов на всех этапах создания алкогольного напитка.

В настоящее время пшеничное пиво увеличивает свою популярность по всему миру, в том числе и в России. На отечественном рынке его доля в общем объеме выпускаемой на пивоваренных предприятиях продукции пока невелика, хотя в последние несколько лет спрос на него возрастает, и многие пивоваренные производства в ассортиментной линейке стараются иметь минимум один сорт пшеничного пива. Между тем, в Германии и других странах Западной Европы пиво из пшеницы пользуется большой популярностью и ценится за специфический вкус и аромат. На рынке Германии представлено более 1000 сортов пшеничного пива, преимущественно относящихся к двум основным типам: пшеничное пиво с дрожжами (например, *Hefeweizen* – светлое, *Hefeweizen* – темное) и пшеничное пиво без дрожжей (например, *Kristallweizen*) [1, 2].

Пиво из пшеницы представляет собой группу различных сортов пива верхового брожения, в составе сырья которых пшеничный солод составляет не менее 50 % от общего количества применяемого солода. Отечественные пивовары с определенной опаской относятся к производству данного пива из-за проблем, возникающих в технологическом процессе: более трудоемкий процесс соложения; высокие потери экстракта; возможные проблемы с фильтрацией (отсутствие фильтрующего слоя – шелухи, повышенное содержание белка); иногда достаточно высокая цветность; образование осадков в пиве из-за высокого содержания пентозанов; низкое содержание свободного α-аминного азота; снижение коллоидной стойкости фильтрованного пива и др. [3, 4].

В отличие от сортов пива низового брожения, классическое пшеничное пиво, получаемое с применением дрожжей верхового брожения, характеризуется легким фруктовым оттенком, который в сочетании с повышенным содержанием диоксида углерода (6–10 г/л) оказывает сильное освежающее действие и хорошо утоляет жажду. Сенсорный профиль пшеничного пива варьирует от типичного фруктового аромата до гвоздичного или бананового, что обусловлено метаболизмом дрожжей верхового брожения.

Особенность специфического вкусового профиля данного пива заключается в том, что дрожжи декарбоксилируют гидробензойные кислоты в фенолы, придающие напитку сильный вкус и запах. Например, наличие специфического гвоздично-пряного аромата обусловлено присутствием типичных фенолов: 4-винилгвайаколя и 4-винилфенола, а банановый аромат обусловлен высокой концентрацией изоамилацетата – около 4 мг/дм³, при концентрации этилацетата не более 45 мг/дм³ [5].

Дрожжи верхового брожения отличаются от низовых дрожжей целым рядом технологических характеристик, основные из которых – различный оптимум температур сбраживания и размножения, а также способность к образованию большего количества побочных продуктов брожения, придающих пиву совершенно своеобразный характер, в частности, высших спиртов (пропанол, метилпропанол) и сложных эфиров [6–8].

Дрожжи верхового брожения более гидрофобны, способны адсорбироваться с CO₂ и подниматься на поверхность пива, но при этом они также подвержены седиментации и флокуляции. Для производства пшеничного пива, кроме *Saccharomyces cerevisiae*, также используются и другие виды микроорганизмов. Например, в сортах бельгийского пива *Gueuze* и *Lambic* с содержанием пшеницы используются микроорганизмы: *Brettanomyces (B. bruxellensis, B. lambicus)*, *Enterobacteriaceae*, *Kloeckera apiculata*, *Saccharomyces globosus*, *Saccharomyces bayanus*, *Saccharomyces uvarum*, *Lactobacillaceae* (*Pediococcus cerevisiae*, *Pediococcus damnosus*) и др. [9, 10].

Важными условиями получения качественного пшеничного пива являются тщательный подбор штамма дрожжей в сочетании с правильной технологией, которые обеспечивают накопление необходимых продуктов брожения, формирующих специфический вкусовой профиль данного напитка.

Цель настоящего исследования – сравнение особенностей использования различных штаммов верховых дрожжей в технологии пшеничного пива, а также оценка их влияния на качественные показатели готовых напитков.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве сырья для приготовления пшеничного пива использовали: солод пивоваренный ячменный светлый (АО «Солодовенный завод Суффле Санкт-Петербург», Россия); солод пивоваренный пшеничный светлый (ООО «Солодовен-

ный завод», Россия); ферментный препарат (ФП) Аттенузим Коре (Novozymes A/S, Дания); хмель гранулированный сорта «Халлпетау Миттельфрю» (HVG, Германия); сухие пивные дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* верхового брожения: штамм SafAle WB-06 и штамм SafAle T-58 (Fermentis, Франция).

В работе применялись стандартные методы анализа, принятые в пивоваренной промышленности. Массовую долю действительного экстракта определяли пикнометрически после удаления спирта и углекислоты по ГОСТ 12787-81. Анализ содержания экстрактивных веществ в сбраживаемом пивном сусле осуществляли с помощью ареометра-сахарометра АСТ-1 с погрешностью измерения $\pm 0,05\%$. Кислотность пива оценивали прямым титрованием пробы с фенолфталеином – по ГОСТ 12788-87. Определение pH – по ГОСТ 31764-2012 при помощи автоматического анализатора ST2100-F. Определение цвета – методом колориметрического титрования – по ГОСТ 12789-87. Массовую долю двуокиси углерода в пиве определяли с помощью афрометра – по ГОСТ 32038-

2012. Органолептические показатели – по ГОСТ 30060-2022.

Количество дрожжевых клеток на этапе главного брожения и дображивания оценивали методом прямого подсчета в камере Горяева [11].

Определение массовой доли спирта, видимого экстракта, действительной степени сбраживания, цвета (цв.ед. и ЕВС), плотности проводили на пивоанализаторе жидкостей «ANTON PAAR». Мутность готового пива контролировали на приборе МУТНОМЕР VOS ROTA 90/25. Содержание редуцирующих сахаров в сусле контролировали по методу Бертрана.

Качественный и количественный состав побочных продуктов брожения оценивали на газовом хроматографе «Хромос ГХ-1000» с пламенно-ионизационным детектором («ХРОМОС Инжиниринг», Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принципиальная технологическая схема производства пшеничного пива верхового брожения представлена на рисунке 1.

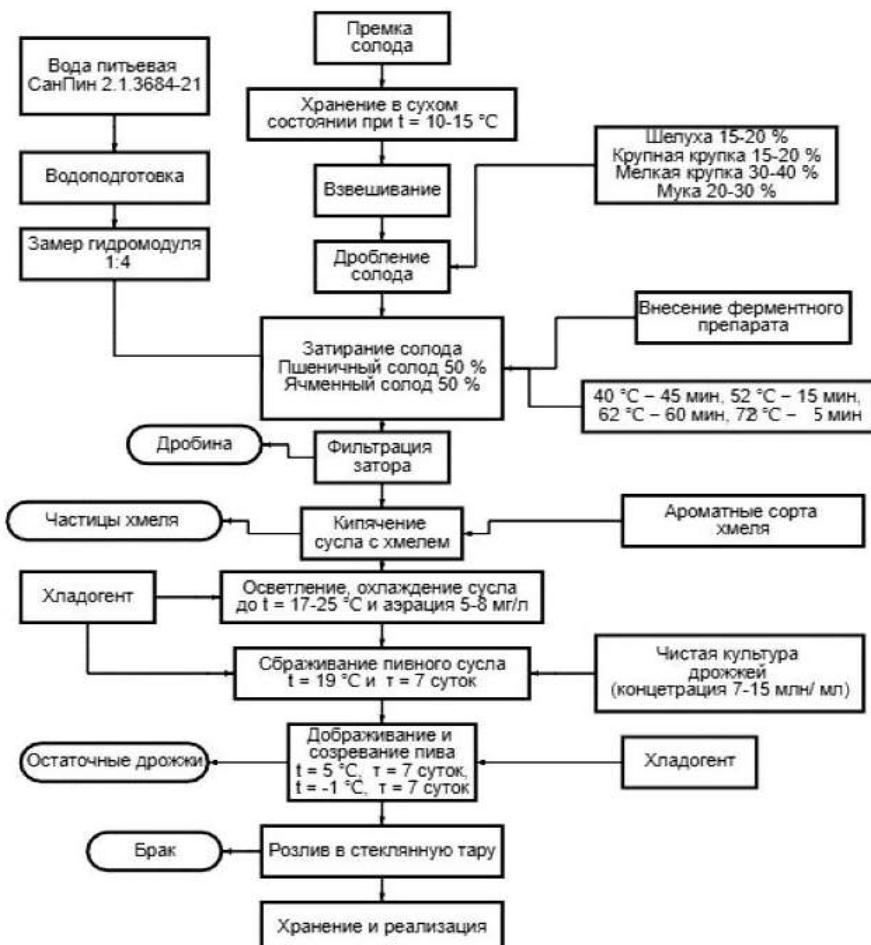


Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема производства пшеничного пива верхового брожения

Figure 1 – Basic technological scheme of production of top-fermented wheat beer

В качестве объектов исследования были выбраны специализированные сухие пивные дрожжи верхового брожения, отобранные для производства

пшеничного пива *Saccharomyces cerevisiae* штаммы SafAle WB-06 и SafAle T-58. Характеристика дрожжей представлена в таблице 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДРОЖЖЕЙ ВЕРХОВОГО БРОЖЕНИЯ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПШЕНИЧНОГО ПИВА

Таблица 1 – Характеристика штаммов дрожжей

Table 1 – Characteristics of yeasts strains

Показатель	SafAle WB-06	SafAle T-58
Тип брожения	Верховой	Верховой
Температура брожения	18–24 °C	15–20 °C
Седиментация	Медленная	Средняя
Флокуляция	Низкая	Низкая
Дозировка, г/гл	50–80	50–80
Концентрация сложных эфиров, мг/дм ³ (при 20 °C)	78	37
Концентрация высших спиртов, мг/дм ³ (при 20 °C)	404	228
Количество живых клеток	$> 6 \times 10^9$ /г	$> 6 \times 10^9$ /г

Следует отметить, что дрожжи штамма SafAle WB-06 способны образовывать легкие эфирные и фенольные ноты, характеризующие пшеничный сорт пива, а также отличаются хорошей взвешенностью и стабильностью в процессе брожения, способностью к образованию большего количества высших спиртов и сложных эфиров. Дрожжи штамма SafAle T-58 подходят для формирования фруктовых, пряных и перечных тонов, в сенсорном профиле превалируют банан, гвоздика и перец, а также имеют среднюю седиментацию и низкую флокуляцию.

Оптимальное соотношение ячменного и пшеничного солода – 50:50 при затирании было подобрано экспериментальным путем на основании лучших результатов по показателям экстрактивности, свободного аминного азота, вязкости сусла и редуцирующих сахаров. Гидромодуль затирания у пшеничного пива составил при соотношении солода и воды – 1:4.

На этапе затирания солода вносился ферментный препарат Аттенузим Коре с основной глюкоамилазной активностью (1600 AGU/г), доза внесения которого составила – 0,7 г/кг солода. При его использовании уменьшилась мутность сусла и увеличилось содержание редуцирующих сахаров на 9,5 % по сравнению с контролем (без применения ФП).

Для приготовления затора был выбран метод настойного затирания со следующими температурными паузами:

- кислотная пауза (40 °C, 20 минут). Происходит активация фермента фитазы, который расщепляет молекулы фитина, освобождая фитиновую кислоту в солодовом зерне и понижая pH затора. Кроме того, разрушаются глюканы, вследствие чего пиво становится более прозрачным;

- белковая пауза (55 °C, 15 минут). На данном этапе идет процесс расщепления пептидной связи между аминокислотами в белках при участии протеолитических ферментов протеиназы и пептидазы, а также повышается экстрактивность сусла;

- мальтозная пауза (63 °C, 40 минут), отмечается активизация фермента β -амилазы;

- декстриновая пауза (72 °C, 30 минут), в действие вступает α -амилаза, она образует несбраживаемые сахара, которые формируют тело пива, делает пиво сладким, происходит процесс формирования плотности пива;

- мэш-аут (78 °C, 5 минут), данная пауза используется для остановки работы ферментов, уменьшения вязкости и увеличения скорости фильтрации сусла [12].

После завершения всех пауз проводилось

охлаждение затора с последующей фильтрацией, затем кипячение сусла в течение 60 минут с ароматным сортом хмеля «Халлертау Миттельфрю», осветление и охлаждение сусла для внесения разводки дрожжей.

Главное брожение проводили при температуре 19±1 °C в течение 7 суток до достижения видимого экстракта 3,4–3,6 %. Для брожения использовали дрожжи первой генерации, дозировка введения которых рассчитывалась с учетом особенностей используемых штаммов и составила 0,65 г/л.

Сравнительная характеристика физико-химических и микробиологических показателей молодого пива с применением различных штаммов верховых дрожжей приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика образцов молодого пива, полученных с применением различных штаммов дрожжей

Table 2 – Comparative characteristics of young beer samples obtained using different yeast strains

Показатель	Штамм дрожжей	
	SafAle WB-06	SafAle T-58
Объемная доля спирта, %	4,75	4,84
Видимый экстракт, %	3,11	3,27
Действительная степень сбраживания, %	63,20	60,21
Плотность, г/см ³	1,01224	1,01245
Количество дрожжевых клеток, кл/см ³	12×10^6	10×10^6

На протяжении всего периода главного брожения исследуемые штаммы показали стабильную динамику брожения пивного сусла. Более интенсивно протекало брожение в молодом пиве с SafAle WB-06, о чем свидетельствует результат действительной степени сбраживания – 63,20 % и большее количество дрожжевых клеток – 12×10^6 кл/см³.

На этапе дображивания и созревания температура составила первые семь суток – 5 °C и еще семь суток – минус 1 °C. Оба штамма по остатку количества дрожжевых клеток на этапе завершения дображивания показали хорошие результаты, так как к концу дображивания нормой считается содержание дрожжевых клеток в пределах от 0,5 до 1 млн кл/см³. Расхождение по содержанию клеток также было незначительным – 3 %.

По итогам завершения полного цикла брожения и дображивания в образцах готового пшеничного пива был проведен сравнительный физико-химический анализ (таблица 3).

Таблица 3 – Физико-химические показатели образцов готового пива с применение штаммов дрожжей SafAle WB-06 и SafAle T-58

Table 3 – Physicochemical parameters of finished beer samples using yeast strains SafAle WB-06 and SafAle T-58

Показатель	Штамм дрожжей		ГОСТ 31711-2012
	SafAle WB-06	SafAle T-58	
Экстрактивность начального сусла, %	11,96	12,01	12,0
Объемная доля спирта, %	4,82	4,88	не менее 3,5
Массовая доля спирта, %	3,77	3,82	–
Видимый экстракт, %	2,91	2,84	–
Действительный экстракт, %	4,18	4,51	–
Действительная степень сбраживания, %	65,05	62,44	–
Кислотность, к.ед	2,25	2,40	не более 1,5-3,2
pH, ед	4,49	4,60	3,8-4,8
Плотность, г/см ³	1,00953	1,00928	–
Горечь, IBU	9,10	12,20	–
Мутность, 90Н, ЕВС	23,5	26,2	–
Цвет, ед. ЕВС	10,25	9,81	9,5-26,0
Цвет, ц. ед	0,70	0,65	0,6-2,0
Пеностойкость, мин	5:40	5:55	не менее 3
Высота пены, мм	62	70	не менее 40
Массовая доля двуокиси углерода, % г/л	0,7	0,8	не менее 0,4

Экспериментальные данные, приведенные в таблице 3, показывают, что оба опытных образца пива полностью отвечает требованиям действующей нормативно-технической документации ГОСТ 31711-2012 Пиво. Общие технические условия по показателям: объемная доля спирта; pH; цвет ц.ед. и ед.ЕВС; массовая доля двуокиси углерода; кислотность; высота пены и пеностойкость. Кроме того, по большинству физико-химических показателей не было выявлено существенных различий между опытными образцами, за исключением по-

казателей горечи и мутности, которые были несколько выше в образце с применением штамма SafAle T-58. При этом стоит отметить, что полученные значения показателей мутности – 23,5 и 26,2 90Н ЕВС – являются хорошими результатами для нефильтрованного пива без применения в технологии замутнителей.

Хроматографический анализ побочных продуктов брожения в готовом пиве с применением штаммов дрожжей SafAle WB-06 и SafAle T-58 представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Хроматографический анализ побочных продуктов брожения в готовом пиве с применение штаммов дрожжей SafAle WB-06 и SafAle T-58

Table 4 – Chromatographic analysis of fermentation by-products in finished beer using SafAle WB-06 and SafAle T-58 yeast strains

Показатель	Штамм дрожжей	
	SafAle WB-06	SafAle T-58
Ацетальдегид, мг/дм ³	3,7	3,9
Этилацетат, мг/дм ³	12,8	11,7
Диацетил, мг/дм ³	0,13	0,13
Изобутилацетат, мг/дм ³	0,06	0,04
1-пропанол, мг/дм ³	11,5	9,3
Изобутанол, мг/дм ³	14,9	12,5
2-метилбутанол+изоамилол, мг/дм ³	63,5	65,3
Сумма спиртов, мг/дм ³	89,9	87,1
Сумма эфиров, мг/дм ³	12,86	11,74

Известно, что ароматический профиль пива формируется благодаря различным классам химических веществ, таким как высшие спирты, сложные эфиры, жирные кислоты, карбонильные соединения, соединения серы, фурановые соединения, монотерпеноны, C13-ноизопреноиды и летучие фенолы [13].

Результаты анализа побочных продуктов брожения в готовом пиве свидетельствуют о стабильном протекании процесса брожения и дображивания.

Содержание отрицательно влияющего на вкус и аромат метаболита, такого как ацетальдегид, соответствовало норме (2–10 мг/дм³), что положительно сказывалось на органолептических характеристиках готовых напитков.

Диацетил является представителем вицинальных дикетонов и определяет не только вкусо-

вые особенности пива, но и характеризует степень созревания пива, направленность, глубину и завершенность технологического процесса. По мнению одних авторов, в светлых сортах пива верхового брожения нежелательно содержание общего диацетила более 0,1–0,15 мг/дм³ [14], по мнению других – предельно допустимая концентрация диацетила в пиве верхового брожения не должна превышать 0,6 мг/дм³ [15]. Содержание диацетила в обоих образцах пива составила 0,13 мг/дм³, что не превышало данных пороговых значений и является критерием удачного процесса созревания пива. Стоит отметить, что концентрация диацетила в пиве определяется не только штаммом дрожжей, но и технологией брожения и дображивания пива.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДРОЖЖЕЙ ВЕРХОВОГО БРОЖЕНИЯ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПШЕНИЧНОГО ПИВА

Этилацетат является представителем сложных эфиров (этиловым эфиром уксусной кислоты) и активно участвует в букетообразовании готового пива. В небольших концентрациях он способствуют появлению в напитке фруктового аромата и легкого аромата леденцов [16]. В исследуемых образцах его концентрации отличались незначительно – 12,8 мг/дм³ и 11,7 мг/дм³ – и не достигали пороговых значений, что косвенно свидетельствует о правильно подобранных технологических факторах, таких как штамм дрожжей, уровень их задачи, состав сусла, температура брожения, плотность сусла и др. [17]. Сумма эфиров в обоих образцах также находилась в умеренных количествах, что благоприятно сказалось на привкусе готовых напитков.

Известно, что основное количество высших спиртов образуется из аминокислот, преимущественно на этапе главного брожения, к концу которого в пиве накапливается примерно 40–80 мг/дм³ высших спиртов. Высшие спирты также формируют вкусовой профиль пива, однако значительная концентрация этих побочных продуктов (свыше 100 мг/дм³) негативно отражается на вкусе готового напитка. Сумма спиртов в экспериментальных образцах пива составила 89,9 мг/дм³ и 87,1 мг/дм³, что несколько выше допустимых норм (до 80 мг/дм³), но не превышают пороговое значение в 100 мг/дм³. Данные превышения в образцах находились в пределах допустимых отклонений и не повлияли на вкусовой профиль пива. В пиве с применением штамма дрожжей SafAle WB-06 на 2,2 мг/дм³ было выше содержание 1-пропанола по сравнению с образцом с SafAle T-58, что придавало ему слегка сладковатые тона в аромате.

Изобутанол производится дрожжами первоначально в цитоплазме по пути Эрлиха или путем анаболического синтеза внутри митохондрий. Этот высший спирт способен придавать пиву запах растворителя. Пороговое значение по аромату изобутанола составляет 100 мг/дм³ [18]. Согласно проведенным исследованиям, концентрация изобутанола в образце, полученном с использованием штамма SafAle WB-06, составила 14,9 мг/дм³, а в образце с применением SafAle T-58 – 12,5 мг/дм³.

Органолептическую оценку образцов готового пива проводили по 25-балльной системе с учетом следующих показателей: прозрачность, цвет, вкус, хмелевая горечь, аромат и пенообразование. Согласно дегустационной оценке, лучшими характеристиками обладало пиво, сброшенное дрожжами штамма SafAle WB-06 (23 балла), оно имело приятный, насыщенный вкус с легкими эфирными и фенольными нотами, характерный пшеничный аромат и умеренную хмелевую горечь. Образец, полученный с применением штамма SafAle T-58, набравший 20 баллов, имел яркую хмелевую горечь, обильную и устойчивую пену, но менее насыщенный вкусо-ароматический профиль.

ВЫВОДЫ

Проведен сравнительный анализ использования двух штаммов верховых дрожжей SafAle WB-06 и SafAle T-58 в технологии пшеничного пива, а также исследовано их влияние на качественные показатели молодого и готового пива.

Экспериментально установлено, что на протяжении всего периода главного брожения и дображивания исследуемые штаммы показали стабильную динамику брожения пивного сусла. Более интенсивно брожение протекало в сусле с применением штамма SafAle WB-06, о чем свидетельствует действительная степень сбраживания молодого пива – 63,20 % и готового пива – 65,05 %, превышающая данный показатель в пиве с использованием штамма SafAle T-58 в молодом пиве на 3 %, а в готовом – на 2,6 %.

Показано, что по физико-химическим показателям готового пива не было выявлено существенных различий между опытными образцами, за исключением показателей горечи и мутности, которые были несколько выше в образце с применением штамма SafAle T-58. Независимо от применяемого штамма дрожжей образцы готового пива соответствовали нормам ГОСТ 31711-2012 Пиво. Общие технические условия.

В большей степени изученные штаммы показали различное влияние на ароматический профиль пива и органолептические показатели.

Так, хроматографический анализ побочных продуктов брожения в готовом пиве показал несколько большее их суммарное количество в образце с SafAle WB-06 на 3,7 мг/дм³ по сравнению с образцом с SafAle T-58, без превышения пределов пороговых значений по всем исследуемым показателям, что не оказалось негативного влияния на вкусовой профиль пива. Кроме того, проведенная дегустационная оценка образцов пива выявила, что образец, полученный с использованием штамма SafAle WB-06, имел во вкусе легкие эфирные и фенольные ноты, характеризующие пшеничный сорт пива, и получил более высокий балл по сравнению с образцом с SafAle T-58.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сандаков О.А. Разработка технологии пшеничного пива верхового брожения с дображиванием в бутылках: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.07. СПб. : РГБ, 2006. 16 с.
- Алябьев Б.А., Ростовская М.Ф. Особенности получения пшеничного пива // Хранение и переработка сельхозсырья. 2021. № 3. С. 81–94.
- Иванова Е.Г. Оптимизация режимов приготовления пшеничного пива // Пиво и напитки. 2003. № 6. С. 16–17.
- Меледина Т.В., Сандаков О.А. Пшеничное пиво верхового брожения. Особенности вкуса, особенности технологии // О напитках. 2002. № 6(24). С. 6–9.
- McMurrough I., Madigan D., Donnelly D., Hurley J., Doyle A.-M., Hennigan G., McNulty N. Control of Ferulic Acid and 4-Vinyl Guaiacol in Brewing // Journal of the institute of brewing. 1996. Vol. 102. P. 327–332.
- Серегин С.Н., Свиридова Г.Н. Пивоваренная промышленность России : успехи и нерешенные проблемы // Пиво и напитки. 2011. № 3. С. 10–11.
- Кунце В. Технология солода и пива // Пер. с нем. 9-го изд. 3-е изд., перераб. и доп. Профессия, 2009. 1064 с.
- Саберянова Г.В., Каменская Е.П. Влияние различных штаммов верховых дрожжей на процессы главного брожения при производстве пшеничного пива // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Бийск : Изд-во АлтГТУ, 2024. С. 400–404.
- Vidgren V., Londenborough J. 125th Anniversary Re-

view: Yeast Flocculation and Sedimentation in Brewing // Journal of the institute of brewing. 2011. Vol. 17(4). p. 475–487.

10. Scholtes C., Nizet S., Collin S. Occurrence of sotolon, abhexon and theaspirane-derived molecules in Gueuze beers. Chemical similarities with 'yellow wines' // Journal of the institute of brewing. 2012. Vol. 118(2). P. 223–229.

11. Каменская Е.П., Аверьянова Е.В. Количественный учёт микроорганизмов: методические рекомендации к лабораторным работам. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. 35 с.

12. Попова Н.В., Потороко И.Ю. Современные подходы к возможности интенсификации процесса затирания пивного сусла. Патентный анализ // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2018. Т. 6, № 3. С. 12–21.

13. Rodrigues F., Caldeira M., Câmara J.S. Development of a dynamic headspace solid-phase microextraction procedure coupled to GC–qMSD for evaluation the chemical profile in alcoholic beverages // *Analytica Chimica Acta*. 2008. V. 609. № 1. P. 82–104.

14. Berry, D.R. & Watson, D.C. Production of organoleptic compounds. In *Yeast Biotechnology* (eds D.R. Berry, I. Russell and G.G. Stewart), Allen and Unwin, London. 1987. p. 345–368.

15. Mandl B., Geiger E., Piendl Q., Brwi, 1974, 27, s. 57–66.

16. Betancur M.I., Motoki K., Spence C., Velasco C. Factors influencing the choice of beer: A review // *Food Research International*. 2020. V. 137. P. 109367.

17. Каменская Е.П., Дворятина И.Б. Особенности использования специальных солодов в технологии безалкогольного пива // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2022. № 5 (76). С. 30–36.

18. Зипаев Д.В., Никитченко Н.В., Кашаев А.Г., Платонов И.А. [и др.]. Исследование показателей качества светлого пива, полученного с использованием солода из трииткале // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2015. № 5–6. С. 77–79.

Информация об авторах

Е. П. Каменская – кандидат биологических наук, доцент кафедры технологии бродильных производств и виноделия Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Г. В. Саберзянова – магистрант кафедры технологии бродильных производств и виноделия Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

REFERENCES

1. Sandakov, O.A. (2006). Development of technology for top-fermented wheat beer with secondary fermentation in bottles: author's abstract. diss. ... cand. tech. sciences: 05.18.07. SPb. : RGB, 16. (In Russ.).
2. Alyabyev, B.A. & Rostovskaya, M.F. (2021). Features of obtaining wheat beer. *Storage and processing of agricultural raw materials*, 3, 81-94. (In Russ.).
3. Ivanova, E.G. (2003). Optimization of wheat beer preparation modes. *Beer and drinks*, 6, 16-17. (In Russ.).
4. Meledina, T.V. & Sandakov, O.A. (2002). Top-fermented wheat beer. Features of taste, features of technology. *About drinks*, 6(24), 6-9. (In Russ.).
5. McMurrough, I., Madigan, D., Donnelly, D., Hurley, J., Doyle, A.-M., Hennigan, G. & McNulty, N. (1996). Control of Ferulic Acid and 4-Vinyl Guaiacol in Brewing. *Journal of the institute of brewing*, 102, 327-332.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

6. Seregin, S.N. & Sviridova, G.N. (2011). Brewing industry of Russia: achievements and unsolved problems. *Beer and drinks*, 3, 10-11. (In Russ.).

7. Kunze, V. (2009). Technology of malt and beer. Translated from German. 9th ed. 3rd ed., revised. and add. Profession. 1064. (In Russ.).

8. Saberzyanova, G.V. & Kamenskaya, E.P. (2024). Influence of various strains of top-fermenting yeast on the processes of main fermentation in the production of wheat beer. *Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries: Proceedings of the XVII All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation*. Biysk: Publishing house of Altai State Technical University, 400-404. (In Russ.).

9. Vidgren, V. & Londesborough, J. (2011). 125th Anniversary Review: Yeast Flocculation and Sedimentation in Brewing. *Journal of the institute of brewing*, 17(4), 475-487.

10. Scholtes, C., Nizet, S. & Collin, S. (2012). Occurrence of sotolon, abhexon and theaspirane-derived molecules in Gueuze beers. Chemical similarities with 'yellow wines'. *Journal of the institute of brewing*, 118(2), 223-229.

11. Kamenskaya, E.P. & Averyanova, E.V. (2007). Quantitative accounting of microorganisms: methodical recommendations for laboratory work. Biysk : Publishing house of Alt. state tech. university, 35. (In Russ.).

12. Popova, N.V. & Potoroko, I.Yu. (2018). Modern approaches to the possibility of intensifying the process of mashing beer wort. Patent analysis. *Bulletin of SUSU. Series "Food and biotechnology"*, 3, 12-21. (In Russ.).

13. Rodrigues, F., Caldeira, M. & Câmara, J.S. (2008). Development of a dynamic headspace solid-phase microextraction procedure coupled to GC–qMSD for evaluation of the chemical profile in alcoholic beverages. *Analytica Chimica Acta*, 1, 82-104.

14. Berry, D.R. & Watson, D.C. (1987). Production of organoleptic compounds. In *Yeast Biotechnology* (eds D.R. Berry, I. Russell and G.G. Stewart), Allen and Unwin, London. 345-368.

15. Mandl, B., Geiger, E. & Piendl, Q. (1974). Brwi, 27, 57-66.

16. Betancur, M.I., Motoki, K., Spence, C. & Velasco, C. (2020). Factors influencing the choice of beer: A review. *Food Research International*, 137, 109367.

17. Kamenskaya, E.P. & Dvoryatkina, I.B. (2022). Features of the use of special malts in the technology of non-alcoholic beer. *Technology and commodity science of innovative food products*, 5 (76), 30-36. (In Russ.).

18. Zipaev, D.V., Nikitchenko, N.V., Kashaev, A.G., & Platonov, I.A. (2015). Study of quality indicators of light beer obtained using triticale malt. News of higher educational institutions. *Food technology*, 5-6, 77-79. (In Russ.).

Information about the authors

E.P. Kamenskaya - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Fermentation and Winemaking of the Altay State Technical University.

G.V. Sabrezyanova - Master's Degree Student of the Department of Technology of Fermentation and Winemaking of the Altay State Technical University.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 613.28
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.012

EDN: UPHHVG

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ СВЕЖЕЙ РЫБЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Ирина Васильевна Можжерина¹, Владимир Григорьевич Попов²,
Елена Юрьевна Леонова³

^{1, 2, 3} ФГБОУ ВО Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

¹ mozzherinaiv@tyuiu.ru

² popovvg@tyuiu.ru, <https://orcid/0000-0002-5902-1768>

³ leonovaej@tyuiu <https://orcid/0000-0003-3162-8514>

Аннотация. Рыба в большинстве современных исследований рассматривается как ценный пищевой продукт, который обладает уникальными свойствами и не уступает мясу крупного рогатого скота. Мясо рыбы не содержит грубых соединительных тканей, поэтому оно хорошо усваивается организмом человека. Однако рыба является скоропортящимся продуктом питания, и за последние годы важное значение придается современным методам обработки рыбы низкими температурами, что позволяет максимально сохранить пищевую ценность. Объектом исследования является рыба семейства карповых как наиболее востребованная в прудовом рыбоводстве аквакультура. Один из перспективных способов сохранения рыбы – замораживание с использованием диоксида углерода. При понижении температуры до минус 78 °С активируется сублимационный процесс, в результате которого углекислота переходит из твердого состояния в газообразное. Рассматриваемый способ подразумевает применение снегообразного диоксида углерода как на поверхности рыбы, так и размещение его внутри тушки. При хранении свежей рыбы необходимо учитывать не только температурный режим, но и упаковочный материал для герметичного хранения, способного сохранить углекислотную среду внутри и товарный вид рыбной продукции до 10 суток. По проведенным результатам исследования, по показателям безопасности можно резюмировать, что охлаждение карпа диоксидом углерода приводит к значительному замедлению процессов порчи и увеличивает хранимоспособность.

Ключевые слова: рыба, прудовое рыболовство, снегообразный диоксид углерода, продовольственная безопасность, потребительские свойства.

Для цитирования: Можжерина И. В., Попов В. Г., Леонова Е. Ю. Исследование длительности хранения свежей рыбы с применением диоксида углерода // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 81–87.
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.012. EDN: <https://elibrary.ru/UPHHVG>.

Original article

STUDY ON DURATION OF STORAGE OF FRESH FISH USING CARBON DIOXIDE

Irina V. Mozzherina¹, Vladimir G. Popov², Elena Y. Leonova³

^{1, 2, 3} Industrial University of Tyumen, Russia

¹ mozzherinaiv@tyuiu.ru

² popovvg@tyuiu.ru, <https://orcid/0000-0002-5902-1768>

³ leonovaej@tyuiu <https://orcid/0000-0003-3162-8514>

Abstract. In most modern studies, fish is considered as a valuable food product that has unique properties and is not inferior to cattle meat. Fish meat does not contain coarse connective tissue, so it is well absorbed by the human body. However, fish is a perishable food product and in recent years, great importance has been attached to modern methods of processing fish at low temperatures, which allows for maximum preservation of nutritional value. The object of the study is fish of the carp family as the most popular aquaculture in pond fish farming. One of the promising ways to preserve fish is freezing using carbon dioxide. When the temperature drops to minus 78 °C, the sublimation process is activated, as a result of which carbon dioxide passes from a solid to a gaseous state. The method under consideration involves the use of snow-like carbon dioxide, both on the surface of the fish and placing it inside the carcass. When storing fresh fish, it is necessary to take into account not only the temperature regime, but also the packaging material for hermetically sealed storage, which can preserve the carbon dioxide environment inside and the presentation of fish products for up to 10 days. Based on the results of the study, in terms of safety indicators, it can be summarized that cooling carp with carbon dioxide leads to a significant slowdown in spoilage processes and increases storage capacity.

Keywords: fish, pond fishing, snow-like carbon dioxide, food safety, consumer properties.

For citation: Mozzherina, I.V., Popov, V.G. & Leonova, E.Yu. (2025). Study of duration of storage of fresh fish using carbon dioxide. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 81-87. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.012. EDN: <https://elibrary.ru/UPHHVG>.

ВВЕДЕНИЕ

В доктрине продовольственной безопасности отмечается, что уровень продовольственной независимости определяется уровнем самообеспечения в процентном соотношении и рассчитывается, как объем отечественного товаропроизводства сельскохозяйственного сырья и продовольствия к общему объему их потребления, имеющий огромное значение для основных продовольственных продуктов питания. Рыба и продукты ее переработки входят в состав потребительской корзины, как продукт, необходимый для обеспечения жизнедеятельности и сохранения здоровья человека (на 2024 г – 18 кг) [1].

Следует отметить, что в России рациональной нормой потребления рыбы считается 22 кг на одного человека в год. Министерство здравоохранения РФ 30 декабря 2022 года пересмотрело норму потребления рыбы в сторону значительного увеличения до 28 кг в год [2]. Обусловлена данная корректировка тем, что рыба обладает целой группой полезных свойств. Для лиц, имеющих заболевания желудочно-кишечного тракта, рыба – источник легкоусвояемого белка, с сердечно-сосудистыми заболеваниями – источник необходимых микронутриентов, а для больных сахарным диабетом – диетический продукт с минимальным количеством содержания сахаров, клетчатки и крахмала. Следовательно, вызывает необходимость активизировать поставки и решать научно-практические задачи в рыбной отрасли [3].

В России рыболовство широко развито, так как имеет доступ к двенадцати морям, трем океанам и более двум миллионам рек, по протяженности береговой линии занимает четвертое место в мире. Российская Федерация среди всех стран мира занимает девятое место по добыче рыбных ресурсов, и это несмотря на то, что на ее территорию приходится наибольшая часть суши [4]. Рыболовство в нашей стране развивается по следующим направлениям: пастбищное, интегрированное разведение аквакультуры, прудовое и индустриальное.

По данным Федерального агентства по рыболовству РФ (на 06.02.2024 г.), производство продукции аквакультуры, в том числе в рамках прудового рыболовства, за 10 лет выросло в два раза и составило 402 тыс. т. в год. Основными видами товарной рыбы в нашей стране является: семейство карповых как наиболее производительное для территории РФ [5].

Российская Федерация имеет широкие перспективы по воспроизводству водных биоресурсов, прежде всего, за счет территориальных преимуществ (озер – 25 млн. га., водохранилищ – 5 млн. га., прудов – 155 тыс.га.). Основной вид деятельности – производство рыбной продукции – отводится на вылов, причем 70 % добычи осуществляется в Тихоокеанском регионе, при этом половина выловленной рыбы экспортируется в ближайшие зарубежные страны для реализации [6]. Производ-

ство прудовой рыбы имеет ряд преимуществ, но достаточно слабо развито и не претендует на лидерские позиции в мире. Сложившаяся проблема подчеркивает острую необходимость создания программ федерального уровня по потреблению отечественной прудовой рыбной продукции. Вследствие этого был создан «свод законов» – программа по развитию рыболовства в РФ.

Актуальная задача по обеспечению качественной рыбной продукцией населения стоит для тех российских регионов, которые не имеют доступа к шельфу морей и океанов, и именно для них необходимо рассмотреть вопрос развития прудового производства на местах и активно включаться в стратегию развития регионального АПК [7]. Введение санкций по отношению к России и ответного удара промышленного эмбарго по вопросу импортозамещения является одним из ключевых для отечественной пищевой промышленности. На сегодняшний день эмбарго особенно выгодно для отечественных предприятий, занимающихся рыболовством, они практически избавлены от жесткой конкуренции.

По данным органов государственной статистики, из всех субъектов РФ по уровню урбанизированности территории, Тюменская область стоит на первом месте, является высокоурбанизированным индустриальным регионом с развитой нефтяной, газовой промышленностью, при этом аграрный сектор – жизненно важная и системообразующая отрасль в экономике и социальной жизни населения региона [7].

Нормативно-правовой обзор решения исследуемой проблемы рассматривался на заседании Правительства РФ от 22.11.2018 г., по его результатам принята стратегия развития сельского хозяйства, пищевой промышленности Тюменской области на период до 2036 года. В целях разграничения полномочий между органами федеральной государственной власти и региональными властями в сфере рыболовства и аквакультуры (рыболовства) был принят ряд документов, регламентирующий вопросы рыболовства и сохранения водных ресурсов, а также обновлено законодательство об аквакультуре [8].

В последние годы также принят ряд документов, регламентирующих вопрос развития прудового рыболовства в Тюменском регионе, в частности утвержден Перечень рыболовных участков Тюменской области [9].

В Уральском Федеральном округе для разведения часто используется аквакультура семейства окуневых, сиговых, карповых и других. Местом разведения или добычи являются пресноводные водоемы, которые расположены недалеко от крупных городов в связи с тем, что рыба этих семейств не рекомендуется к заморозке. Это обусловлено, прежде всего, высоким риском пищевых отравлений микробной этиологии, которые составляют 80 % всех случаев пищевых интоксикаций [3]. Отпускается потребителям в живом или охлажденном виде или направляется для промышленной переработки.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ СВЕЖЕЙ РЫБЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Теоретические и экспериментальные исследования влияния диоксида углерода на пищевые продукты представлены в работах Е.Н. Неверова, И.А. Короткого [10], И.Б. Плотникова, П.С. Коротких [11] О.А. Каширской, Н.В. Беляевой, И.В. Королевой [12].

Одним из способов сохранения потребительских качеств рыбной продукции можно рассматривать применение снегообразного диоксида углерода, в частности его влияние на хранимость карпа.

МЕТОДЫ

Для подготовки исследовательской части работы использовались современные методы, в том числе инструментальные, органолептические, физико-химические, в том числе инструментальные лабораторные методы с применением статистической обработки результатов. Показатели безопасности оценивались на основании требований нормативно-правовой документации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве объекта настоящего исследования выбран карп отборный, разделанный, потрошеный (аквакультура) массой 920 г, толщина рыбы составляет 40 мм в охлажденном виде, которую подвергли обработке сnegoобразным CO_2 . Живая, сырец, охлажденная – продукция аквакультуры по массе подразделяется в соответствии с требованиями ГОСТ 1368-2003 [13].

На первом этапе эксперимента исследована паразитарная чистота образца рыбы в связи с тем, что риск заражения речной рыбы достаточно высок.

При исследовании образца рыбы личинки паразитов (гельминтов) не обнаружены.

В условиях воздействия на тушку рыбы низких температур осуществляется передача тепла от тушки рыбы к более прохладной среде.

Технология охлаждения основана на исполь-

зовании сублимационного эффекта при воздействии низкой температуры (-78°C), что позволяет превратить твердый CO_2 в газообразный. С помощью воздействия низких температур на тушку рыбы увеличиваются сроки хранения и сохраняется пищевая ценность рыбной продукции. Используемый метод представляет собой нанесение на разные части тушки рыбы сnegoобразный диоксид углерода на внешнюю часть и дросселированный CO_2 – во внутреннюю.

Для сохранения свежести упаковочный материал должен быть воздухонепроницаемым, но во избежание избыточного давления в результате химических реакций, сублимации диоксида углерода необходимо предусмотреть клапан для предотвращения деформаций и повреждений упаковки, а также сохранения оптимальной среды.

Обязательна герметизация потребительской тары при фасовке рыбы, именно поэтому диафрагма полностью соприкасается с основанием, чтобы не допустить потери газовой среды, а также препятствовать проникновению воздуха во внутрь упаковки.

Процесс охлаждения тушки карпа при температуре $3\pm0,5^{\circ}\text{C}$ с применением сnegoобразного CO_2 представлен на рисунке 1.

Проанализировав полученные результаты, можно отметить, что процесс снижения уровня температуры во внутренней полости тушки карпа происходит более интенсивно, и, в первую очередь, обусловлено тем, что внутренняя поверхность непосредственно контактирует со сnegoобразным CO_2 .

В первые минуты эксперимента внутренний слой тушки начинает подтаивать, это происходит в период сублимации за счет уменьшения сnegoобразного диоксида углерода. Происходят изменения в результате того, что образуется газовая прослойка, вследствие этого теплообмен будет значительно снижен.

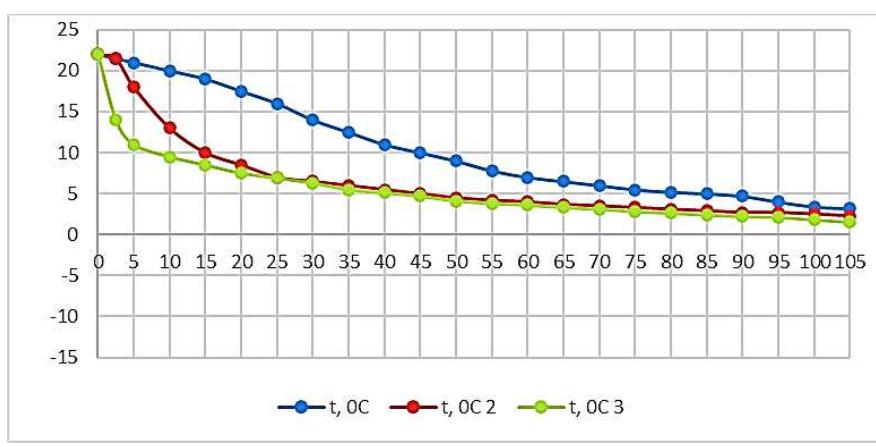


Рисунок 1 – Визуализация термограммы охладительного процесса рыбы

Figure 1 – Visualization of the thermogram of the fish cooling process

Интенсивное понижение температурного режима в верхней центральной части туловища рыбы на расстоянии 21 мм от внутренней полости происходит в процессе отвода тепла к внутренней части тушки, в которой присутствует сnegoобразный CO_2 .

Процесс охлаждения поверхностной части карпа протекает вследствие теплоотвода к воз-

душно-газовой среде, которая образуется в упаковке в результате сублимационного процесса сnegoобразного CO_2 , благодаря процессу теплоотдачи от центральных слоев мышечной ткани к внутренней поверхности тушки. Охлаждающей эффект поверхности рыбы происходит значительно быстрее в сравнении с центральной частью

тушки, так как присутствует конвективный обмен теплом с окружающей средой, а температурный режим составляет $3\pm0,5$ °C. Тем не менее, охлаждение брюшной части рыбы протекает значительно интенсивней.

Гистограмма (рисунок 2) отражает динамику

изменения фактических показателей плотности теплового потока верхней части рыбы в процессе охлаждения снегообразным CO₂, находящимся внутри потрошенной рыбьей тушки (температурный режим при этом составляет $3\pm0,5$ °C).

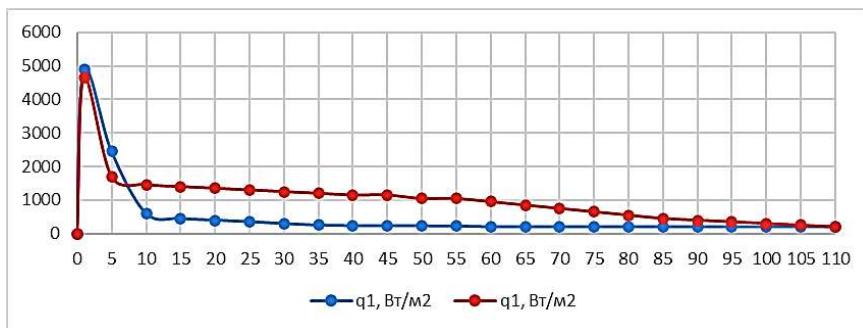


Рисунок 2 – Визуализация динамики изменения фактических показателей плотности теплового потока верхней части рыбы в процессе охлаждения снегообразным CO₂

Figure 2 – Visualization of the dynamics of changes in actual indicators of the heat flux density of the upper part of the fish during the cooling process with snow-like CO₂

В начальной фазе экспериментального исследования выражена высокая интенсивность теплового потока ввиду несовпадения температур между CO₂ и исследуемым объектом.

Естественно, что в данном случае интенсивность отдачи тепла гораздо эффективнее.

Снижение плотности потока регистрируется на втором этапе эксперимента в связи с тем, что теплоотдача объекта исследования снижается. Термограмма ярко демонстрирует охлаждение воздушно-газовой смесью хребтовой части карпа, ввиду отсутствия прямого контакта с ней сублимированного CO₂. В итоге сублимации тепловой процесс стремится к нулю.

Средняя величина плотности теплового потока в хребтовой части карпа составляет 222 Вт/м², а нижней части рыбы – 1045 Вт/м² (где, Вт – величина тепла, м² – площадь). Предельные значения плотности теплового потока составили 4888 Вт/м² и 4655 Вт/м², соответствующие верхней и нижней части исследуемого образца.

Рисунок 3 демонстрирует динамику коэффициентов теплоотдачи охладительного процесса рыбы с использованием снегообразного диоксида углерода. Расчет интенсивности теплообмена тушки рыбы с окружающей средой является отношением плотности теплового потока и производится по формуле: $\lambda = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

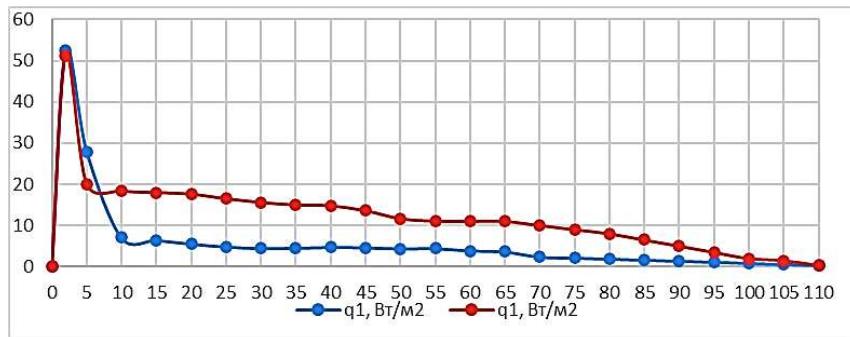


Рисунок 3 – Визуализация динамики коэффициента теплоотдачи охладительного процесса рыбы

Figure 3 – Visualization of the dynamics of the heat transfer coefficient of the fish cooling process

Коэффициенты теплопередачи в процессе охлаждения карпа демонстрируют корреляцию с величиной теплового потока и совпадают с кривыми теплового потока, как показано на диаграмме 3.

Таким образом, интегральные значения коэффициентов теплоотдачи равняются $\lambda = 4,4$ для хребтовой части карпа, а для нижней части рыбы составляет $\lambda = 11,6$. Предельные показатели коэффициента теплоотдачи равняются 55,44 и 11,6 для верхней и нижней частей карпа.

С целью сокращения времени процесса сублимации необходимость применения снегообразного CO₂ во внутренней части образца оправдана как его активным поглощением тепла, выделяемого тушкой карпа, так и влияние на снижение температуры внешней среды, что в конечном итоге сокращает время на обработку рыбы. Благодаря своим свойствам подавлять микроорганизмы, его размещение внутри карпа способствует увеличению срока его хранения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ СВЕЖЕЙ РЫБЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Рыбу, охлажденную этим способом, хранили при определенных температурных условиях в течение 10 дней, регулярно контролируя качественные характеристики.

Для проведения исследования органолептических показателей выбрали идентичного по массе тушку карпа, но без применения диоксида углерода. Сравнительный анализ рыб осуществлялся при хранении их в идентичных условиях.

По истечении 48 часов при температуре хра-

нения $3\pm0,5$ °C у контрольного образца визуально наблюдались признаки порчи, такие как изменение цвета чешуи, мутные глаза, также присутствовал аммиачный запах под жаберными крышками.

Исследуемый образец рыбы, охлажденный с применением диоксида углерода, внешне имел признаки свежей рыбы на протяжении всего срока хранения: естественная окраска, блестящие глаза и чешуя, отсутствие постороннего запаха.

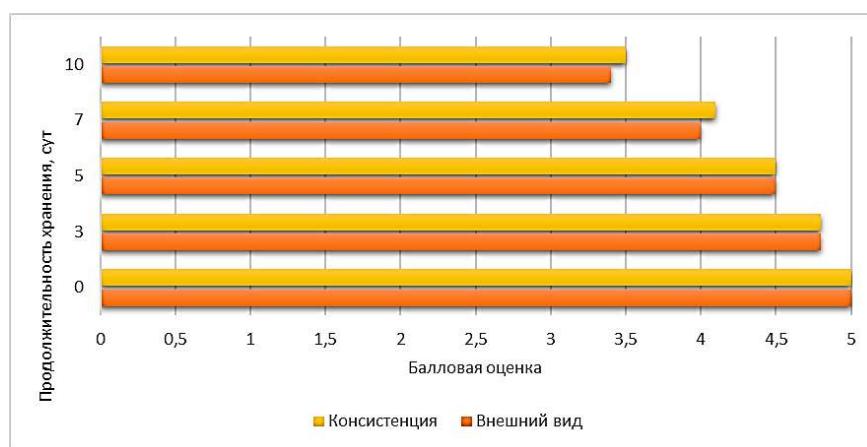


Рисунок 4 – Сравнительная оценка органолептических показателей рыбы на разных сроках хранения

Figure 4 – Comparative assessment of organoleptic characteristics of fish at different storage times

В период с 1 по 6 сутки хранения образца карпа, охлажденного с использованием CO₂, органолептические показатели имеют наивысшие оценки, и только по истечении 7 суток наблюдались признаки прогнозируемой порчи, такие как снижение показателей консистенции и цвета без признаков неприятного запаха и вкуса (с использованием метода термообработки), при этом оценка снизилась до 21 балла из max 25. Органолептиче-

ская оценка на конец срока хранения составила 19 баллов и является приемлемой, к предъявляемым требованиям нормативной документации [14].

Исследования показали, что в процессе хранения рыбы произошли незначительные изменения, которые существенно не повлияли на качество рыбы и ее органолептические характеристики (рисунок 4 демонстрирует оценку органолептических свойств).

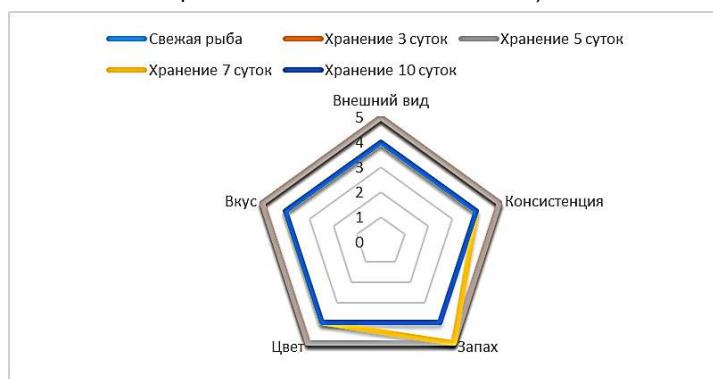


Рисунок 5 – Профилограмма органолептической оценки характеристик образца рыбы

Figure 5 – Profilogram of organoleptic evaluation of the characteristics of a fish sample

На диаграмме 5 представлена комплексная органолептическая оценка исследуемой тушки карпа, которая рассчитывалась как среднеарифметическое значение оценок.

Однако органолептические показатели не являются гарантом определения достоверных сроков годности охлажденной рыбной продукции, по-

этому дополнительно требуется проведение лабораторных исследований.

В частности, к наиболее важным показателям можно отнести разложение жира. Его особенностью является прогоркание вследствие окислительных процессов. Исследовательские данные по физико-химическим и микробиологическим свойствам отражены на рисунке 6.

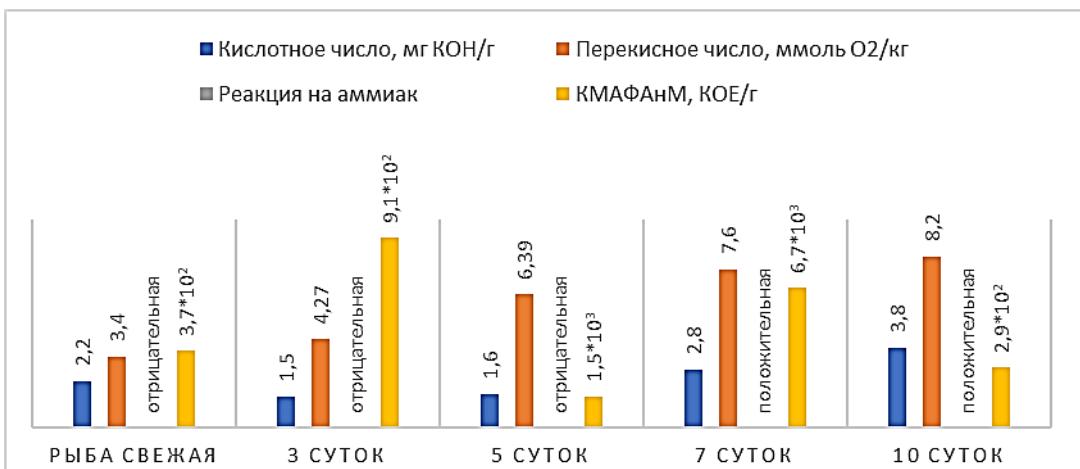


Рисунок 6 – Качественные показатели карпа, охлажденные с помощью диоксида углерода

Figure 6 – Quality indicators of carp cooled with carbon dioxide

В соответствии с данными, представленными на рисунке 6, значения кислотного и перекисного чисел незначительно увеличиваются в процессе хранения, при этом находятся в границе предельно допустимой нормы. На 7 сутки проявляется несущественная реакция на аммиак.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные по показателям безопасности, дают подтверждение о том, что обработка снегообразным диоксидом углерода увеличивает сроки хранения охлажденной рыбной продукции с сохранением товарного вида. Исходя из анализа вышеизложенных данных, можно утверждать, что тушка рыбы, подвергнутая обработке СО₂, способна храниться на протяжении 10 суток при температуре, рекомендованной нормативными документами, а также обеспечит сохранности пищевой ценности рыбы.

Данный срок реализации можно с уверенностью рекомендовать для рыбоперерабатывающих предприятий, так как рыба будет пригодной для питания на всех стадиях производства согласно системе менеджмента пищевой безопасности ХАССП (ГОСТ Р ИСО 22000; ISO 22000).

Этот метод охлаждения можно применять не только для всех видов разделки рыбы, но и расширить, гармонизировать торговый ассортимент по всем семействам, следовательно, в полной мере оптимизировать структуру видового предложения с целью его увеличения. Тюменская область в значительной мере удалена от мест рыболовного промысла океанической и морской рыбы, поэтому рыба, выловленная в этих водоемах и обработанная сnegoобразным диоксидом углерода в местах добычи, на всей стадии логистической цепочки будет сохранять высокое качество.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс» (дата обращения: 21.04.2024).
- Официальный сайт Министерства здравоохранения РФ. URL : <https://minzdrav.gov.ru/> (дата обращения: 21.04.2024).

3. Официальный сайт Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Тюменской области. URL : <https://72.rosпотребнадзор.ru/?ysclid=lwgr9m6g1r71430652> (дата обращения: 21.04.2024).

4. База данных «ФАОСТАТ». Официальный сайт «Продовольственной и сельскохозяйственной организации объединённых наций». URL : <http://www.fao.org/faostat/ru/#home> (дата обращения: 21.04.2024).

5. Официальный сайт Федерального агентства по рыболовству РФ. URL : <https://fish.gov.ru/> (дата обращения: 21.04.2024).

6. Официальный сайт Управления Федеральной службы государственной статистики по Тюменской области, Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре и Ямало-Ненецкому автономному округу. URL : <https://72.rosstat.gov.ru/?ysclid=lwgr63e45q312827343>. (дата обращения: 21.04.2024).

7. Балабейкина О.А., Файбусович Э.Л. Уровень урбанизированности территории Российской Федерации: региональный разрез // Географический вестник, 1(44): 72–82. DOI : 10.17072/2079-7877-2018-1-72-82) Региональные геосистемы. 2023. Т. 47, № 3 (368–381).

8. Федеральный закон «Об аквакультуре (рыбоводстве) и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс» (дата обращения: 21.04.2024).

9. Распоряжение Департамента агропромышленного комплекса Тюменской области от 12.03.2020 г. № 5 «Об утверждении перечня рыболовных участков в Тюменской области. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс» (дата обращения: 21.04.2024).

10. Исследование параметров процесса теплообмена при сублимации диоксида углерода / Е.Н. Неверов, И.А. Короткий, И.Б. Плотников [и др.] // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2020. № 6(159). С. 215–222.

11. Studying the sublimation of carbon dioxide / E.N. Neverov, I.A. Korotkiy, E.V. Korotkaya, A.N. Rasshchepkin // Periodico Tche Quimica. 2021. Vol. 18, № 37. P. 1–12.

12. Каширская О.А. Изучение влияния обогащенной диоксидом углерода среды на качество замороженного минтая / О.А. Каширская, Н.В. Беляева, И.В. Королева // Сибирский экологический журнал. 2020. № 4. С. 530–536.

13. ГОСТ 1368-2003. Межгосударственный стандарт. «Рыба. Длина и масса» ; введен в действие Постановлением Госстандарта РФ от 27.01.2004 г. № 36-ст.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ СВЕЖЕЙ РЫБЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс» (дата обращения: 21.04.2024).

14. ТР ЕАЭС 040/2016. Технический регламент Евразийского экономического союза. «О безопасности рыбы и рыбной продукции». Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс» (дата обращения: 21.04.2024).

Информация об авторах

И. В. Можжерина – кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения и технологии продуктов питания ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

В. Г. Попов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой товароведения и технологии продуктов питания ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

Е. Ю. Леонова – кандидат социологических наук, доцент кафедры товароведения и технологии продуктов питания ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

REFERENCES

1. Decree of the President of the Russian Federation of January 21, 2020 No. 20 "On approval of the Doctrine of Food Security of the Russian Federation (2020). Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).
2. Official website of the Ministry of Health of the Russian Federation. Retrieved from <https://minzdrav.gov.ru/> (In Russ.).
3. Official website of the Office of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare in the Tyumen Region. Retrieved from <https://72.rosпотребнадзор.ru/?ysclid=lwgr9m6g1r71430652>. (In Russ.).
4. FAOSTAT database - Official website of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://https://www.fao.org/faostat/ru/#home>. (In Russ.).
5. Official website of the Federal Fisheries Agency of the Russian Federation. Retrieved from <https://fish.gov.ru/> (In Russ.).
6. Official website of the Office of the Federal State Statistics Service for the Tyumen Region, Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Ugra and Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Retrieved from <https://72.rosstat.gov.ru/?ysclid=lwgr63e45q312827343>. (In Russ.).
7. Balabeykina, O.A. & Faibusovich, E.L. (2023). Level of urbanization of the territory of the Russian Federa-

tion: regional profile. *Geographical Bulletin*, (44), 72-82. (In Russ.). DOI : 10.17072/2079-7877-2018-1-72-82).

8. Federal Law of July 2, 2013 N148 "On aquaculture (fish farming) and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation." (2013). Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

9. Order of the Department of Agro-Industrial Complex of the Tyumen Region dated March 12, 2020 No. 5 "On approval of the list of fishing grounds in the Tyumen Region. (2020). Tyumen : Standards Publishing House. (In Russ.).

10. Neverov, E.N., Korotkiy, I.A. & Plotnikov, I.B., and others. (2020). Study of parameters of the heat exchange process during sublimation of carbon dioxide. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*. (159). 215-222. (In Russ.).

11. Neverov, E.N., Korotkiy, I.A., Korotkaya, E.V. & Rasshchepkin, A.N. (2021). Studying the sublimation of carbon dioxide. *Periodico Tche Quimic*, (37), 1-12. (In Russ.).

12. Kashirskaya, O.A., Belyaeva, N.V. & Koroleva, I.V. (2020). Study of the influence of an environment enriched with carbon dioxide on the quality of frozen pollock. *Siberian Ecological Journal*, (4), 530-536. (In Russ.).

13. Fish. Length and weight. (2003). HOST R 1368-2003 from January 27, 2004. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

14. Technical regulations of the Eurasian Economic Union. On the safety of fish and fish products. (2016). TR EAEU 040/2016 from September 1, 2017. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).

Information about the authors

I.V. Mozzherina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Commodity Research and Food Technology of the Industrial University of Tyumen.

V.G. Popov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Commodity Research and Food Technology of the Industrial University of Tyumen.

E.Yu. Leonova - Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor of the Department of Commodity Research and Food Technology of the Industrial University of Tyumen.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ И СОСТАВА ЖИРОВОЙ ФАЗЫ СЛИВОЧНОГО МАСЛА ИЗ МОЛОЧНЫХ И ПОДСЫРНЫХ СЛИВОК

Татьяна Александровна Павлова ¹, Анастасия Андреевна Афанасьева ²,
Юлия Сергеевна Сумеркина ³

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

¹ tompakoz.ru@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2404-4147>

² a.afanasyeva@fncps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0323-2507>

³ yu.sumerkina@fncps.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1388-7075>

Аннотация. В статье представлены результаты исследований подсырных и молочных сливок, а также масла, выработанного из них. Целью настоящей работы являлось: исследование микроструктуры подсырных и молочных сливок-сырья, а также масла сливочного, вырабатываемого из них; изучение жирно-кислотного состава жировой фазы масла сливочного из подсырных и молочных сливок. Исследования микроструктуры проводили с применением микроскопа МБИ-6 при увеличении в $\times 280$ раз. Установлено, что средний диаметр жирового шарика в подсырных сливках составил 9,6 мкм, в молочных – 11,0 мкм. Расчетным путем установлено, что в созревших как молочных, так и подсырных сливках основную долю (более 50,0 %) составляют жировые шарики диаметром от 4,0 до 10,0 мкм. Степень дисперсности жировых частиц в подсырных сливках несколько выше, чем в молочных, что объясняется меньшим количеством в них крупных жировых шариков, большая часть которых переходит в сыр. Выявлено, что микроструктура масла подсырного в сравнении со сладкосливочным маслом имеет отличительные особенности, заключающиеся в пониженной степени дисперсности плазмы. Это обусловлено особенностями состава подсырных сливок и технологией их получения. Анализ жирнокислотного состава жировой фазы масла подсырного сравнительно с маслом сладкосливочным проводили методом газовой хроматографии. Выявлено, что в жировой фазе масла сливочного подсырного содержится меньше насыщенных жирных кислот, в т.ч. низкомолекулярных летучих, а также несколько больше ненасыщенных жирных кислот, чем в масле сладкосливочном аналогичного состава. Это также объясняется сырьевыми и технологическими особенностями цикла получения масла из подсырных сливок.

Ключевые слова: молочные продукты, подсырные сливки, масло сливочное подсырное, микроскопия, структура, жирнокислотный состав жировой фазы.

Для цитирования: Павлова Т. А., Афанасьева А. А., Сумеркина Ю. С. Особенности микроструктуры и состава жировой фазы сливочного масла из молочных и подсырных сливок // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 88–93. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.013. EDN: <https://elibrary.ru/YNQHEB>.

Original article

PECULIARITIES OF MICROSTRUCTURE AND COMPOSITION FAT PHASE OF BUTTER FROM DAIRY AND WHEY CREAM

Tatiana A. Pavlova ¹, Anastasia A. Afanasyeva ², Yulia S. Sumerkina ³

^{1, 2, 3} All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking - branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

¹ tompakoz.ru@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2404-4147>

² a.afanasyeva@fncps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0323-2507>

³ yu.sumerkina@fncps.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1388-7075>

Abstract. The article presents the results of research on cheese and milk cream, as well as the oil produced from them. The purpose of this work was: to study the microstructure of whey cream and milk cream-raw materials, as well as butter extracted from them; to study the fatty acid composition of the fatty phase of butter from whey cream and milk cream. Microstructure studies were carried out using an MBI-6 microscope at an increase of $\times 280$ times. It was found that the average diameter of the fat ball in whey cream was 9.6 microns, in dairy - 11.0 microns. It was found by calculation that in ripe both dairy and subcutaneous cream, the main share (more than 50.0 %) is made up of fat balls with a diameter from 4.0 to 10.0 microns. The degree of dispersion of fat particles in whey cream is slightly higher than

© Павлова Т. А., Афанасьева А. А., Сумеркина Ю. С., 2025

ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ И СОСТАВА ЖИРОВОЙ ФАЗЫ СЛИВОЧНОГО МАСЛА ИЗ МОЛОЧНЫХ И ПОДСЫРНЫХ СЛИВОК

in dairy, which is explained by the smaller number of large fat balls in them, most of which turn into cheese. It was revealed that the microstructure of the podsyrny oil, in comparison with sweet-cream oil, has distinctive features consisting in a reduced degree of plasma dispersion. This is due to the peculiarities of the composition of whey cream and the technology of their production. The analysis of the fatty acid composition of the fatty phase of the subsurface oil in comparison with sweet-cream oil was carried out by gas chromatography. It has been revealed that the fat phase of butter contains less saturated fatty acids, including low molecular weight volatile ones, as well as slightly more unsaturated fatty acids than in sweet butter of a similar composition. This is also explained by the raw materials and technological features of the cycle of obtaining butter from whey cream.

Keywords: dairy products, whey cream, whey butter, microscopy, structure, fatty acid composition of the fat phase.

For citation: Pavlova, T.A., Afanasyeva, A.A. & Sumerkina, Y.S. (2025). Peculiarities of microstructure and composition fat phase of butter from dairy and whey cream. (2025). *Polzunovskiy vestnik*, (2), 88-93. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.013. EDN: <https://elibrary.ru/YNQHEB>.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в России отмечается устойчивый рост производства сыров. В этой связи увеличиваются и объемы подсырной сыворотки, являющейся побочным продуктом сыродельного производства. Многие зарубежные и отечественные исследователи рассматривают сыворотку как перспективное сырье, на основе которого создаются традиционные и новые сывороточные продукты. Примером эффективной переработки молочной сыворотки могут служить многие зарубежные страны, а также Республика Беларусь, где практически 99,0 % сыворотки используется на пищевые цели [1, 2]. В России пока объемы переработки сыворотки недостаточны [1, 3, 4]. Поэтому для отечественных производителей вопрос рационального использования сыворотки как сырьевого компонента для изготовления полноценных пищевых продуктов является актуальным и интересным.

В подсырной сыворотке заключены все компоненты молока, но в измененном соотношении. При этом наибольший интерес представляют белки, молочный сахар и молочный жир, которые целесообразно максимально полно извлекать из этого ценного сырья и направлять на пищевые цели.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что на основе сыворотки получают целый ряд белковых концентратов, изолятов и даже отдельных нативных белков и их гидролизатов, микропартикулятов, обладающих биологической активностью и функциональными свойствами, описываемыми в обзорах и научных статьях российских (Храмцов А.Г., Евдокимов И.А., Мельникова Е.И., Станиславская Е.Б. и др.), польских (Zandonà E., Blažić M., Režek Jambrak A.), американских (Minj S., Anand S., Rama G. R., Kilara A., Kuhn D., Beux S. и др.), греческих (Lappa I.K., Papadaki A., Kachrimanidou V. и др.), индийских ученых (Panghal A., Patidar R., Jaglan S. и др.) [1–9]. Эти продукты применяют для обогащения кисломолочных напитков, улучшения качества сметаны, повышения пищевой и биологической ценности хлебобулочных, кондитерских изделий и др.

Обязательной технологической операцией при производстве продуктов из сыворотки является ее обезжиривание путем сепарирования. Этот процесс обеспечивает получение сливок массовой долей жира от 30 до 50 %, которые применяются, в основном, для производства подсырного масла. Подсырные сливки при их средней жирности 40,0 %

характеризуются следующим составом: массовая доля белков ($0,94 \pm 0,30$) %, общего азота ($0,138 \pm 0,012$) %, лактозы ($3,31 \pm 0,10$) %, минеральных веществ ($0,29 \pm 0,06$) %, влаги ($55,5 \pm 0,1$) % [10]. При условии идентичной с подсырными сливками жирности физико-химический состав молочных сливок отличается по содержанию белковой, углеводной и минеральной составляющей. Массовая доля белков в таких сливках составляет ($2,47 \pm 0,30$) %, лактозы ($3,25 \pm 0,10$) %, общего азота ($0,376 \pm 0,009$) %, минеральных веществ ($0,46 \pm 0,08$) % и влаги ($53,8 \pm 0,1$) %. Изменение физико-химического состава может оказать влияние на свойства сливок при их созревании и последующем сбивании.

На стадии разработки технологии подсырного масла отечественные производители использовали этот продукт для дальнейшей переработки в топленое масло. В настоящее время технология подсырного масла позволяет использовать этот вид масла для непосредственного потребления в пищу [11], а также применять его в качестве пищевого компонента. В связи с этим интересны исследования подсырного масла в сравнении со сливочным маслом, получаемым из молочных сливок.

Как и сливочное масло, получаемое из молочных сливок, подсырное масло представляет собой жировой продукт, основу физической структуры которого составляет жировая фаза. Показатели качества сливочного масла предопределяются пространственным расположением и взаимосвязью структурных элементов продукта: молочного жира в разных состояниях, молочной плазмы и воздуха [11, 12]. Различия в составе и качестве исходного сырья для получения молочных и подсырных сливок, наряду с применяемыми технологическими режимами производства, могут повлиять на особенности состава жировой фазы продукта, процессы ее кристаллизации, формирование структуры и реологических характеристик масла, а также распределение отдельных компонентов в нем [13–16]. Изучению этих вопросов посвящен ряд работ зарубежных ученых. Так, египетскими учеными было установлено, что подсырные сливки и масло, изготовленное из них, характеризовались высокой концентрацией ненасыщенных жирных кислот, а также биологически активных веществ (в том числе сфингомиелинов и муцинов) по сравнению с молочными сливками и сладко-сливочным маслом [17]. Ливанскими учеными Jinjarak S., Olabi A., Jiménez-Flores R., Walker J.H. проведены исследования по изучению вкусо-ароматических

особенностей масла подсырного [18]. Было установлено, что этот вид масла по вкусу приближался к сладко-сливочному маслу, но имел большую выраженность орехового привкуса и пористость.

Состав жировой фазы подсырного масла имеет отличия от сливочного масла из молочных сливок, что, может быть, связано с частичной трансформацией триглицеридов молочного жира. Этот процесс происходит как во время переработки молока-сырья в сыр [19], так и в процессе дальнейшей переработки сыворотки в подсырные сливки и масло.

Следует отметить, что работы, проведенные в разное время отечественными и зарубежными учеными, не в полной мере раскрывают особенности органолептических, биохимических, физико-химических, а также структурно-механических показателей подсырного масла. В связи с этим интерес представляет расширение исследований в данном направлении. Поскольку в формировании качества масла существенное значение имеет жировая фаза, в данной работе поставлена цель – изучить и описать особенности состава жировой фазы масла, получаемого из подсырных сливок, а также исследовать дисперсность основных морфологических элементов его микроструктуры в сравнении со сливочным маслом идентичной жирности, получаемым из молочных сливок.

МЕТОДЫ

При проведении исследований были использованы молочные и подсырные сливки массовой долей жира 40,0 %, полученные из одного и того же молока в условиях ООО «Угличский сырорельно-молочный завод» (Ярославская область, г. Углич). Образцы сливок пастеризовали при (85 ± 2) °C с выдержкой 15 минут, охлаждали до температуры (6 ± 1) °C и подвергали созреванию в течение 10–12 часов. Из созревших сливок вырабатывали опытный (масло подсырное) и кон-

трольный образец сливочного масла методом периодического сбивания сливок с получением готового продукта с массовой долей жира 80,0 %.

Микроскопические исследования сливок и образцов масла проводили с помощью микроскопа МБИ-6 (ЛОМО, Россия) при увеличении в 280 раз в проходящем свете с применением оранжевого светофильтра. Фотографирование осуществляли в 5-ти кратной повторности. Полученные микрофотографии обрабатывали с помощью программы «Image J».

Определение жирнокислотного состава жировой фазы масла проводили методом газовой хроматографии метиловых эфиров жирных кислот по ГОСТ 31663-2012 с использованием хроматографа «Хромос ГХ-1000» (ООО «Хромос», Россия), оснащенного капиллярной колонкой CP – Sil 88 for FAME100 m \times 0.25 mm \times 0.2 μm (Agilent Technologies, США). Расчет содержания метиловых эфиров жирных кислот проводили методом нормализации в программе «Хромос». Получение метиловых эфиров жирных кислот проводили по ГОСТ 31665-2012 переэтерификацией с метанольным раствором метилата натрия.

Математическую обработку данных и построение графиков проводили с использованием компьютерной программы «Microsoft Excel 2016». Для проведения попарного сравнения выборок использовали критерии Тьюки. Статистически значимый результат оценивали при $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование проводили, оценивая микроструктуру сливок-сырья: подсырных (опыт) и молочных (контроль). Сравнительная оценка микроструктуры сливок до окончания и после нее их физического созревания представлена на рисунке 1.

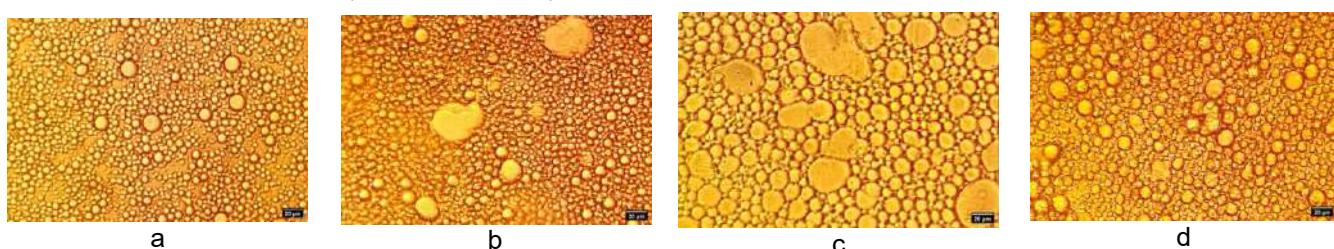


Рисунок 1 – Микроструктура молочных (а), подсырных (б); созревших молочных (с) и созревших подсырных (д) сливок

Figure 1 – Microstructure of dairy (a), whey (b); ripened dairy (c) and ripened whey (d) cream

Результаты исследования характера распределения жировых шариков в образцах сливок представлены на рисунке 2. Размеры жировых частиц в исходных сливках колеблются в диапазоне от 0,5 до 22,0 мкм. Микроструктура исходных контрольных сливок (а) представляет собой эмульсию, в которой жировые шарики имеют преимущественно окружную форму и равномерно распределены в дисперсионной среде. Средний диаметр жировых шариков, окруженных нативной липопротеиновой оболочкой, в исходных в молочных сливках составляет 4,7 мкм. В этих сливках количественно преобладают жировые частицы размерами от 2,0 до 6,0 мкм, доля которых составляет

69,8 % от общего их количества. Известно, что мелкие и крупные жировые шарики имеют разное происхождение. Мелкие жировые шарики выделяются в основном путем мерокриновой секреции, а самые мелкие могут синтезироваться непосредственно цитоплазмой эпителиальных секретирующих клеток [20]. Более крупные жировые шарики образуются из жира и его предшественников, которые синтезируются за пределами эпителиальных клеток. Происхождение жировых шариков влияет главным образом на температуру кристаллизации жира при пониженных температурах [21]. Крупные жировые шарки более легко разрушаются в процессе получения масла.

ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ И СОСТАВА ЖИРОВОЙ ФАЗЫ СЛИВОЧНОГО МАСЛА ИЗ МОЛОЧНЫХ И ПОДСЫРНЫХ СЛИВОК

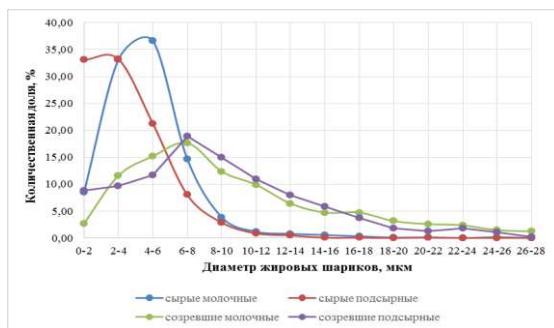


Рисунок 2 – Распределение жировых шариков в анализируемых образцах сливок

Figure 2 – Distribution of fat globules in the analyzed cream samples

Средний диаметр одиночных жировых шариков в исходных подсырных сливках (b) составил 3,5 мкм. Средний диаметр одиночных жировых шариков в исходных подсырных сливках (b) составил 3,5 мкм. На долю жировых шариков диаметром от 0,5 до 4,0 мкм приходилось 66,3 %, что указывает на более высокую дисперсность их жировой фазы. Из полученных данных (рис. 2) было установлено, что в подсырных сливках содержится жировых шариков диаметром до 4,0 мкм на 24,6 % больше, чем в молочных сливках. В подсырных сливках на фоне мелких жировых шариков было отмечено наличие отдельных конгломератов жира размерами от 44,0 до 46,0 мкм. По-видимому, это связано с формированием данных структурных элементов на основе свободного жидкого жира, присутствующего в исходной сыворотке за счет воздействия температурного и механического факторов в процессе получения сырного зерна, его вымешивания и формования сыра.

При оценке микроструктуры созревших сливок выявлено увеличение размеров жировых шариков в подсырных сливках. Их средний диаметр составлял 9,6 мкм. В структуре преобладали жировые шарики диаметром от 6,0 до 8,0 мкм (18,9 %). Отмечено, что в структуре подсырных сливок уменьшилось количество мелких жировых частиц. Это можно объяснить тем, что в процессе созревания оболочки жировых шариков становятся более тонкими и хрупкими, что способствует нарушению целостности оболочки и вытеканию жидкого жира из жирового шарика, который является связующим звеном для формирования более крупных частиц жира и их агломератов. Средний диаметр жировых частиц в молочных сливках составлял 11,0 мкм. В эмульсии данных сливок пре-

обладали жировые частицы диаметром от 6,0 до 8,0 мкм, и на их долю приходилось 17,6 % от общего количества частиц. В данных сливках было отмечено образование конгломератов жира размером от 28,0 до 78,0 мкм.

Таким образом, экспериментальные данные показали, что в подсырных сливках жировые частицы обладают меньшим размером, чем в молочных сливках.

Общеизвестно, что свойства сливочного масла зависят от природы и состава молочного жира и условий переработки сырья в готовый продукт. Учитывая повышенную степень дисперсности жировых шариков в подсырных сливках, логично было предполагать иной результат воздействия внешних технологических факторов на них, нежели на молочные сливки. Однако, несмотря на выявленные различия в дисперсности жировой фазы и микроструктуре, это не оказалось негативного воздействия на процесс сбивания подсырных сливок. Он, как и при сбивании молочных сливок, протекал стабильно и в тех же временных рамках.

Микроструктура масла, полученного из подсырных и молочных сливок, представлена рисунком 3. Как видно из данных микрофотографии, структура масла оценивается как полидисперсная система типа «вода в масле», представляющая собой ассоциацию из разрушенных и неразрушенных жировых шариков, окруженных свободным жидким жиром с включением капель молочной плазмы. Характер распределения молочной плазмы в исследуемых образцах масла отвечает тенденции, характеризующей структуру масла, изготовленного методом сбивания сливок. Диапазон колебаний размеров капель плазмы в образцах масла составляет от 0,5 до 6,0 мкм.



Рисунок 3 – Микроструктура масла сливочного из молочных сливок (а) и масла из подсырных сливок (б)

Figure 3 – Microstructure of butter made from dairy cream (a) and butter made from whey cream (b)

В масле из молочных сливок численно преобладают частицы размерами от 1,0 до 2,0 мкм (41,3 %). В масле из подсырных сливок содержание капель плазмы данной размерной группы больше, чем в контроле, и составляет 48,7 %. В контрольном образце большая часть плазмы представлена в виде капель размером от 0,5 до 4,0 мкм, тонко распределенных в структуре масла. В опытном масле отмечено наличие капель молочной плазмы размером от 0,6 до 4,5 мкм. Выявлено, что количество крупных капель превысило содержание таковых в контроле в 2 раза.

Таблица 1 – Жирнокислотный состав образцов масла

Table 1 – Fatty acid composition of butter samples

Наименование жирной кислоты и ее обозначение	Масло из подсырных сливок	Масло из молочных сливок	ГОСТ 32261-2013 (Приложение Б)
C _{4:0} Масляная	2,32±0,29	3,16±0,28	2,4–4,2
C _{6:0} Капроновая	1,79±0,21	2,86±0,26	1,5–3,0
C _{8:0} Каприловая	1,13±0,09	1,47±0,10	1,0–2,0
C _{10:0} Каприновая	2,68±0,11	3,09±0,11	2,0–3,8
C _{10:1} Деценовая	0,22±0,01	0,25±0,01	0,2–0,4
C _{12:0} Лауриновая	3,25±0,08	3,49±0,08	2,0–4,4
C _{14:0} Миристиновая	9,64±0,18 ^a	9,85±0,16 ^a	8,0–13,0
C _{14:1} Миристолеиновая*	1,49±0,03 ^a	1,45±0,04 ^a	0,6–1,5
C _{16:0} Пальмитиновая	28,78±0,29	26,86±0,28	21,0–33,0
C _{16:1} Пальмитолеиновая*	3,02±0,04	2,27±0,05	1,5–2,4
C _{18:0} Стеариновая	10,01±0,09	11,84±0,12	8,0–13,5
C _{18:1} Олеиновая	25,81±0,27	22,24±0,28	20,0–32,0
C _{18:2} Линолевая**	5,32±0,16	3,12±0,12	2,2–5,5
C _{18:3} Линоленовая*	0,55±0,03	0,45±0,03	до 1,5
C _{20:0} Арахиновая	0,16±0,01 ^a	0,16±0,01 ^a	до 0,3
C _{22:0} Бегеновая	0,05±0,01	0,12±0,02	до 0,1
Прочие	3,78±0,23	7,32±0,44	4,0–6,5

Примечание 1: * расчет произведен по сумме изомеров; ** расчет произведен по сумме изомеров, включая изомер линолевой кислоты с сопряженными двойными связями.

Примечание 2: значения с одинаковой буквой в одной строке существенно не различаются ($p > 0,05$), для остальных показателей значения существенно различаются ($p < 0,05$)

Особенно отмечено относительное снижение массовой доли масляной кислоты (на 36,2 %), которая относится к наиболее летучей среди жирных кислот. При этом также отмечено повышение доли жирных кислот с длиной цепи C₁₄–C₁₈. Кроме того, в подсырном масле относительное количество миристолеиновой кислоты было больше, чем в сладкосливочном масле идентичного состава на 2,8 %; пальмитолеиновой – на 33,0 %, олеиновой – на 16,0 %, линолевой – на 70,5 %, линоленовой – на 22,2 %. Выявлено снижение содержания стеариновой кислоты при одновременном повышении суммарного количества ненасыщенных жирных кислот (миристолеиновой, пальмитолеиновой и линоленовой кислот).

Выявленная разница количественного содержания летучих жирных кислот в жировой фазе масла подсырного в сравнении со сладкосливочным маслом обусловлена как имеющимися различиями в составе сырья (молока и сыворотки молочной), так и влиянием технологических факторов на разных стадиях переработки сырья в масло.

При сравнении жирнокислотного состава жира, выделенного из подсырного и сладко-сливочного масла, установлены определенные различия. Большой удельный объем в общем количестве кислот (более 30,0 %) в подсырном масле занимают ненасыщенные жирные кислоты (C_{18:1}; C_{18:2}; C_{18:3}), которые наиболее

Происхождение сливок-сырья, а также использованные технологические параметры производства масла в разной мере оказывают влияние на состояние и качество жировой фазы продукта. Проведенными исследованиями (таблица 1) установлено, что в масле, изготовленном из подсырных сливок, в сравнении с маслом из молочных сливок, наблюдалась тенденция небольшого снижения массовой доли низкомолекулярных насыщенных жирных кислот C₄–C₁₀, что можно связать частичной трансформацией жира под воздействием липолитических ферментов [19].

активно влияют на стабильность жировой фазы продукта к окислению. Полученные результаты подтверждаются литературными данными [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С помощью микрокопирования установлены размеры жировых частиц опытных и контрольных сливок. Установлено, что в подсырных сливках содержится жировых шариков диаметром до 4,0 мкм на 24,6 % больше, чем в молочных сливках. В них же отмечено наличие отдельных конгломератов жира размерами от 44,0 до 46,0 мкм.

2. При оценке микроструктуры созревших сливок выявлено увеличение размеров жировых шариков в подсырных сливках. Их средний диаметр составлял 9,6 мкм. В структуре преобладали жировые шарики диаметром от 6,0 до 8,0 мкм (18,9 %).

3. Проведенными исследованиями выявлено, что в процессе изготовления подсырного масла наблюдалась тенденция снижения массовой доли низкомолекулярных насыщенных жирных кислот C₄–C₁₀ в масле, изготовленном сравнительно с маслом из молочных сливок. Особенно отмечено изменение массовой доли масляной кислоты (на 36,2 %), которая относится к наиболее летучей среди кислот этого семейства. При этом отмечено

ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ И СОСТАВА ЖИРОВОЙ ФАЗЫ СЛИВОЧНОГО МАСЛА ИЗ МОЛОЧНЫХ И ПОДСЫРНЫХ СЛИВОК

повышение доли ненасыщенных жирных кислот с длиной цепи C₁₄–C₁₈.

4. Установлено, что выявленная разница количественного содержания летучих жирных кислот в жировой фазе масла подсырного в сравнении со сладкосливочным маслом обусловлена как имеющимися различиями в жирнокислотном составе сырья (молока и сыворотки молочной), так и влиянием технологических факторов на разных стадиях переработки сырья в масло.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Храмцов А.Г., Борисенко А.А., Евдокимов И.А., Борисенко А.А., Брацихин А.А., Борисенко Л.А. Эволюция переработки молочной сыворотки: прошлое, настоящее, будущее (часть 2). Современная наука и инновации. 2021; (3): 126–139. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2021.3.12>.
- Климова М.Л. Инновационные технологии повышения рентабельности молокоперерабатывающих предприятий: переработка молочной сыворотки. Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья. 2011; (6): 104–121.
- Кручинин А.Г. Современное состояние рынка вторичных сырьевых ресурсов молочной промышленности / А.Г. Кручинин, А.В. Бигаева, С.Н. Туровская, Е.Е. Илларионова // Ползуновский вестник. 2022. № 4. т. 1. С. 140–149. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.018.
- Топникова Е.В., Волкова Т.А. (2023). Вопросы переработки молочной сыворотки. Сыроделие и маслоделие. 2023. № 4. С. 76–80.
- Мельникова Е.И., Станиславская Е.Б. Получение и применение микропартикулята сывороточных белков в технологии производства сметаны. Пищевые системы. 2021; 4(2):117–125. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2020-4-2-117-125>.
- Rama G.R., Kuhn D., Beux S., Maciel M.J. & de Souza C.F.V. (2019). Potential applications of dairy whey for the production of lactic acid bacteria cultures. International Dairy Journal, 98, 25–37. (In Russ.) doi. 10.1016/j.idairyj.2019.06.012.
- Kilara A. (2015). Whey and whey products. Dairy processing and quality assurance, 349–366. <https://doi.org/10.1002/9781118810279.ch15>.
- Lappa I.K., Papadaki A., Kachrimanidou V., Terpou A., Koulougliotis D., Eriotou E. & Kopsahelis N. (2019). Cheese whey processing: integrated biorefinery concepts and emerging food applications. Foods, 8(8), 347. (In Russ.). doi.org/10.3390/foods8080347.
- Panghal A., Patidar R., Jaglan S., Chhikara N., Khatkar S.K., Gat Y. & Sindhu N. (2018). Whey valorization: current options and future scenario - a critical review. Nutrition & Food Science, 48(3), 520–535. (In Russ.) doi.org/10.1108/NFS-01-2018-0017.
- Храмцов А. Г. Переработка вторсырья. 2003.
- Вышемирский Ф.А., Красуля Н.Г. & Иванова Н.В. (2003). Новая технология сливочного подсырного масла. Сыроделие и маслоделие, 4, 3–5.
- Грищенко А.Д. (1983). Сливочное масло. Москва : Легкая и пищевая промышленность. 20–21.
- Rønholst S., Mortensen K. & Knudsen J.C. (2013). The effective factors on the structure of butter and other milk fat-based products. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 12(5), 468–482. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12022>.
- Rønholst S., Kirkensaard J.J.K., Mortensen K., Knudsen J.C. (2014). Effect of cream cooling rate and water content on butter microstructure during four weeks of storage. Food Hydrocolloids, 34, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.10>.
- Rønholst S., Kirkensaard J.J.K., Pedersen T.B., Mortensen K. & Knudsen J.C. (2012). Polymorphism, microstructure and rheology of butter. Effects of cream heat treatment. Food chemistry, 135(3), 1730–1739. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.05.087>.
- El-Bakry M., Sanchez A. & Mehta B.M. (Eds.). (2018). Microstructure of Dairy Products. Chichester (UK): John Wiley & Sons Ltd. 145–171.
- Aly A.H. (2009). Fatty acid composition, textural and organoleptic properties of whey butter. Journal of Food and Dairy Sciences, 34(4), 3081–3094.
- Jinjarak S., Olabi A., Jiménez-Flores R. & Walker J.H. (2006). Sensory, functional, and analytical comparisons of whey butter with other butters. Journal of Dairy Science, 89(7), 2428–2440. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72316-5](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72316-5).
- Мордвинова В.А., Топникова Е.В., Данилова Е.С., Остроухова И.Л. (2022). Влияние изменений в жировой фазе на особенности формирования показателей качества полутвердых и твердых сыров. Пищевые системы, 5(4), 361–368. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-4-361-368>.
- Рашевская Т.А. (2011). Растительные пищевые добавки для регулирования наноструктуры сливочного масла. Сыроделие и маслоделие, 5, 49–51.
- El-Bakry M., Sanchez A. & Mehta B.M. (Eds.). (2018). Microstructure of Dairy Products. Chichester (UK): John Wiley & Sons Ltd. 145–171.

Информация об авторах

Т. А. Павлова – кандидат технических наук, научный сотрудник направления исследований жировой фазы молочной продукции ВНИИМС – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

А. А. Афанасьева – младший научный сотрудник направления исследований по технологии сливочного и топленого масла ВНИИМС – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

Ю. С. Сумеркина – инженер I категории направления исследований жировой фазы молочной продукции ВНИИМС – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

Information about the authors

T.A. Pavlova - Candidate of Technical Sciences, Researcher in the direction of studies of the fat phase of dairy products of VNIIMS - Branch of Gorbatov Federal Research Center for Food Systems.

A.A. Afanasyeva - Junior Researcher in the direction of research on the technology of butter and ghee of VNIIMS - Branch of Gorbatov Federal Research Center for Food Systems.

Yu.S. Sumerkina - Engineer of the 1st category of the direction of research of the fat phase of dairy products VNIIMS - Branch of Gorbatov Federal Research Center for Food Systems.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.64
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.014

EDN: YPQQWH

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЗАВАРНОГО ПОЛУФАБРИКАТА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Ирина Юрьевна Резниченко ¹, Татьяна Александровна Мирошина ²

^{1,2} Кузбасский государственный аграрный университет имени В. Н. Полеткова, 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. Расширение ассортимента отечественных аглутиновых мучных кондитерских изделий с нетрадиционным сырьем позволяет удовлетворить растущий спрос на продукцию специализированной направленности и повышенной пищевой ценности. Недостатком заварных полуфабрикатов является их низкая пищевая ценность. Применение новых видов биологически ценного аглутинового сырья позволит обогатить изделие и придать оригинальные вкусовые качества и дополненную пищевую ценность. Цель работы заключалась в разработке заварного полуфабриката с применением нового источника ценного растительного сырья – муки конопляной. При выполнении исследований опирались на стандартные методы испытаний мучных кондитерских изделий. Модельные образцы заварных полуфабрикатов готовили в лабораторных условиях по традиционной технологии с заменой муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта на смесь муки безглютеновой универсальной и муки конопляной. Экспериментально установлены соотношения муки универсальной безглютеновой и конопляной в составе заварного полуфабриката. В результате определение органолептических показателей качества показано, что лучшими качественными характеристиками обладают изделия с соотношением муки универсальной и конопляной 70:30 и 80:20. Изделия характеризовались более темным цветом по сравнению с контрольным образцом, правильной формой с выпуклой верхней корочкой и достаточным объемом внутренней полости, приятным вкусом и запахом, мягкой текстурой с включением частиц конопляной муки. Определены линейные характеристики и физико-химические показатели качества предложенных полуфабрикатов. Установлено, что массовая доля влаги соответствует установленным требованиям. Разработанные безглютеновые заварные полуфабрикаты отличаются от традиционных повышенным содержанием белков (на 5–6 %) и пищевых волокон, доля которых составляет 6–4 %. Применение муки конопляной в технологиях безглютеновых мучных кондитерских изделий позволяет расширить ассортимент отечественной продукции высокого качества и повышенной пищевой ценности. Содержание белков в разработанных полуфабрикатах увеличилось в среднем на 50–60 %, физиологическая суточная норма потребления пищевых волокон составляет 17–25 %. Полученные результаты могут найти практическое применение в технологии заварных полуфабрикатов с привлечением новых источников биологически ценного сырья.

Ключевые слова: мука конопляная, заварной полуфабрикат, рецептура, оценка качества, специализированная направленность, пищевая ценность.

Для цитирования: Резниченко И. Ю., Мирошина Т. А. Разработка и оценка качества заварного полуфабриката специализированной направленности // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 94–99. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.014. EDN: <https://elibrary.ru/YPQQWH>.

Original article

DEVELOPMENT AND QUALITY EVALUATION OF SPECIALISED CHOUX SEMI-FINISHED PRODUCT

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. Expanding the range of domestic gluten flour confectionery products with non-traditional raw materials allows meeting the growing demand for specialized products with increased nutritional value. The disadvantage of choux semi-finished products is their low nutritional value. The use of new types of biologically valuable gluten raw materials will enrich the product and give it original taste qualities and additional nutritional value. The aim of the work was to develop a choux semi-finished product using a new source of valuable plant raw materials - hemp flour. The research was based on standard testing methods for flour confectionery products. Model samples of custard semi-finished products were prepared in laboratory conditions using traditional technology with the replacement of premium wheat flour with a mixture of universal gluten-free flour and hemp flour. The ratios of universal gluten-free flour and hemp flour in the choux semi-finished product were experimentally established. As a result of determining the organoleptic quality indicators, it

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЗАВАРНОГО ПОЛУФАБРИКАТА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

was shown that the best quality characteristics were possessed by products with the ratio of universal and hemp flour of 70:30 and 80:20. The products were characterized by a darker color compared to the control sample, the correct shape with a convex upper crust and sufficient volume of the internal cavity, pleasant taste and smell, soft texture with the inclusion of hemp flour particles. Linear characteristics and physicochemical quality indicators of the proposed semi-finished products were determined. It was found that the mass fraction of moisture meets the established requirements. The developed gluten-free choux semi-finished products differ from traditional ones in the increased content of proteins (by 5-6 %) and dietary fiber, the share of which is 6-4 %. The use of hemp flour in the technologies of gluten-free flour confectionery allows expanding the range of domestic products of high quality and increased nutritional value. The protein content in the developed semi-finished products increased by an average of 50-60 %, the physiological daily intake of dietary fiber is 17-25 %. The results obtained can find practical application in the technology of choux semi-finished products with the involvement of new sources of biologically valuable raw materials.

Keywords: hemp flour, choux semi-finished product, recipe, quality assessment, specialized focus, nutritional value.

For citation: Reznichenko, I.Yu. & Miroshina, T.A. (2025). Development and quality evaluation of specialized choux semi-finished product. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 94-99. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.014. EDN: <https://elibrary.ru/YPQQWH>.

ВВЕДЕНИЕ

Заварные пирожные – популярное кондитерское изделие. Родиной заварного теста является Франция. Заварные мучные изделия имеют разные формы и разные названия, самыми известными являются эклеры и профитроли. Эклеры появились позже профитролей, они отличаются продолговатой формой и тем, что всегда были десертным блюдом и имели только сладкие начинки (от французского слова choux) [1].

Среди мучных кондитерских изделий выделяют заварные торты и пирожные, основой которых служит заварной полуфабрикат. Заварные изделия характеризуются мягкой текстурой с большими полостями, которые можно наполнять различными начинками.

Технология заварных полуфабрикатов имеет свои отличительные особенности и необходимо учитывать множество факторов для получения качественного изделия как с точки зрения внешнего вида, так и вкуса. Для изготовления заварных кондитерских изделий, как правило, применяют такие основные ингредиенты, как пшеничную муку, маргарин или сливочное масло, яйца, воду, соль [2]. Заварные изделия отличаются также от других видов процессом изготовления. Масло, соль и воду нагревают до кипения и в кипящую массу добавляют муку. Таким образом, мука заваривается кипятком до выпекания, при этом клейковина уплотняется и не дает парам воды выйти наружу, образуя внутри теста пустоты при выпекании в духовке [2].

Пшеничная мука имеет особые белки, которые делают ее идеальной для определенных применений. Уникальные свойства пшеницы обычно приписываются вязкоупругим свойствам ее глютеновых белков, в то время как мономерные глютеновые белки (глиадин) демонстрируют вязкое поведение, полимерные глютеновые белки (глютенин) являются эластичными. Таким образом, глиадины и глютенины пшеницы в присутствии воды и механической работы образуют непрерывную fazu, называемую глютеновой сетью. Она отвечает за растяжимые и связующие свойства теста, одновременно снижая его липкость. Пшеничное тесто характеризуется своей прочностью, устойчивостью теста к растяжению и эластичностью, способностью теста восстанавливать свою первоначальную форму после растяжения. Особенная эластич-

ность глютенина в значительной степени обусловлена его полимерной природой. Глютенин представляет собой гетерогенную смесь полимеров, состоящую из ряда различных субъединиц глютенина с высокой и низкой молекулярной массой, связанных дисульфидными связями [3].

Замена глютена является одной из самых сложных проблем для пищевой науки и технологии, поскольку поиск высококачественных безглютеновых продуктов представляет серьезную проблему для страдающих целиакией.

Целиакия – сложное аутоиммунное заболевание, приводящее к повреждению тонкого кишечника, атрофии ворсинок и, как следствие, аномальному всасыванию питательных веществ. Классические симптомы включают кишечные расстройства, такие как рвота, вздутие живота и хроническая диарея. С другой стороны, около 50 % пациентов с целиакией проявляют внекишечные симптомы, включая герпетiformный дерматит, остеопороз, анемию и неврологические проблемы. Распространенность заболевания составляет около 1,0 % во всем мире, 275 818 человек страдают целиакией на глобальном уровне. Однако распространенность заболевания недооценивается во многих странах из-за отсутствия осведомленности о нетипичном проявлении симптомов заболевания [4]. Целиакия – заболевание, вызванное как экологическими, так и генетическими факторами. Факторы окружающей среды, как правило, связаны с потреблением глютена в рационе. Глютен является основным белком, присутствующим в пшенице, ячмене, ржи и напрямую связанным с тяжестью болезни Крона и исходами заболевания. Единственным эффективным лечением является строгое пожизненное соблюдение безглютеновой диеты. Тем не менее, замена глютена является серьезной технологической проблемой, поскольку это один из важнейших структурообразующих белков, который отвечает за повышение качества, эластичности, растяжимости, которые характеризуют реологические свойства продуктов на основе пшеницы. Однако можно использовать альтернативный подход для разработки безглютеновых продуктов с аналогичным качеством и структурными свойствами, как у зерновых продуктов. Многочисленные безглютеновые продукты питания, такие как рис, кукуруза, сорго, просо и картофельный/гороховый крахмал, а также различные заменители глютена, включая ксантановую камедь, известны как подходящие альтернативы, со-

храняющие при этом физико-сенсорные свойства безглютеновых продуктов на основе злаков. Учитывая это, исследователи предпринимают попытки разработки безглютенового заварного теста за счет использования местных пищевых ингредиентов. Так, исследователи из Индонезии сделали продукт из безглютенового заварного теста на основе рисовой муки с добавлением муки из листьев моринги (*moringa oleifera*), которая содержит клетчатку, витамины. Предложенный продукт имеет повышенную питательную ценности и полезен для широкого потребления, обладает потенциалом стать кулинарным туристическим продуктом [5]. Ученые из Таиланда разработали новую формулу для заварного безглютенового теста из красного жасминового риса, который имеет высокую долю фенольных соединений и обладает большей антиоксидантной активностью, чем другие виды риса с добавлением гидроколлоидов, включая карбоксиметилцеллюлозу и каррагинан. [3]. Добавление гидроколлоидов в безглютеновые продукты необходимо для того, чтобы гидроколлоиды действовали как полимерные вещества, которые должны имитировать вязкоупругие свойства глютена и увеличивать газоудерживающую способность теста. Отечественными учеными предложены составы безглютеновых заварных полуфабрикатов на основе смеси муки рисовой, кукурузной и крахмала кукурузного, оптимизировано соотношение рецептурных ингредиентов с целью создания продукта высокого качества [6].

Учитывая полезность для здоровья безглютеновых продуктов, а также то, что зерновые продукты, предназначенные для удовлетворения потребностей пациентов с целиакией, скучны и ограничены, это исследование направлено на разработку кондитерских безглютеновых изделий, а именно заварного полуфабриката, который можно использовать для приготовления пирожных, профитролей, эклеров с различными видами начинки, для расширения ассортимента мучных кондитерских изделий специализированного назначения.

Цель исследований – разработка заварного полуфабриката с заменой пшеничной муки на смесь универсальной безглютеновой муки и конопляной муки.

Задачи исследования: определение соотношений муки универсальной и конопляной в составе заварного полуфабриката; исследование органолептических и физико-химических показателей; анализ пищевой ценности.

МЕТОДЫ

Объектами исследований служили лабораторные образцы заварного полуфабриката, приготовленные по традиционной рецептуре на основе муки пшеничной хлебопекарной [7], и образцы, приготовленные с заменой муки пшеничной хлебопекарной на смесь универсальной безглютеновой муки и конопляной муки.

Основное и дополнительное сырье, применяемое в работе: мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта; мука семенная конопляная; мука безглютеновая универсальная, изготовленная из муки рисовой, амарантовой, льняной, крахмала тапиокового, кукурузного, картофельного и загустителя – ксантановой камеди (произведена по

ТУ 9195-012-89751414-11, ООО «Гарнец»); масло сливочное крестьянское с массовой долей жира 72,5 %; яйцо куриное; соль пищевая.

При проведении исследований опирались на общепринятые методы испытаний органолептических и физико-химических показателей качества мучных кондитерских изделий. Для обработки результатов экспериментальных исследований применяли статистический метод обработки данных, используя программный пакет Microsoft Excel.

Органолептические показатели определяли по ГОСТ 5897-90, вкус и запах, форму и состояние поверхности, вид на разрезе, текстуру, цвет анализировали при температуре (18 ± 3) °C, массовую долю влаги определяли по ГОСТ 5900-2014.

Для проведения экспериментальных исследований были приготовлены модельные образцы заварного полуфабриката:

- образец № 1 (контрольный) – по стандартной рецептуре заварного полуфабриката № 22 [7];
- образец № 2 – с соотношением муки универсальной и конопляной в рецептуре 50:50;
- образец № 3 – с соотношением муки универсальной и конопляной 60:40;
- образец № 4 – с соотношением муки универсальной и конопляной 70:30;
- образец № 5 – с соотношением муки универсальной и конопляной 80:20.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение готовой муки безглютеновой универсальной в производстве мучных кондитерских изделий позволяет облегчить технологический процесс, так как универсальная мука содержит сбалансированный состав аглютеновых видов муки и крахмалов. Также в качестве ингредиента для использования в безглютеновой выпечке предлагается мука из семян конопли, которая имеет высокую биологическую ценность [8]. Конопляная мука богата белками, доля которых составляет 28–30 %, содержит 6–9 % липидов с хорошим балансом жирных кислот, незначительную долю усвояемых углеводов 4–6 %, большое количество пищевых волокон (40–42 %), преимущественно нерастворимых, а также витамины и минералы [9]. Из витаминов наибольшее количество приходится на β-каротин, тиамин, рибофлавин и пиридоксин. Из минеральных веществ – на калий, кальций, магний, железо.

На первом этапе исследований определяли органолептические показатели лабораторных образцов заварных полуфабрикатов с различным соотношением муки универсальной и конопляной в рецептуре. Оценку органолептических показателей проводили по разработанной балловой шкале, согласно которой каждый показатель максимально оценивался в 5 баллов [10]. Если образец в сумме набирал от 21 до 25 баллов, оценивался на «отлично», от 16 до 20 – «хорошо», 11–15 – «удовлетворительно», 6–10 – «неудовлетворительно», 0–5 – «очень плохое качество».

Зависимости органолептических показателей, выраженные в баллах, от различных соотношений муки универсальной и конопляной приведены на рисунке 1.

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЗАВАРНОГО ПОЛУФАБРИКАТА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

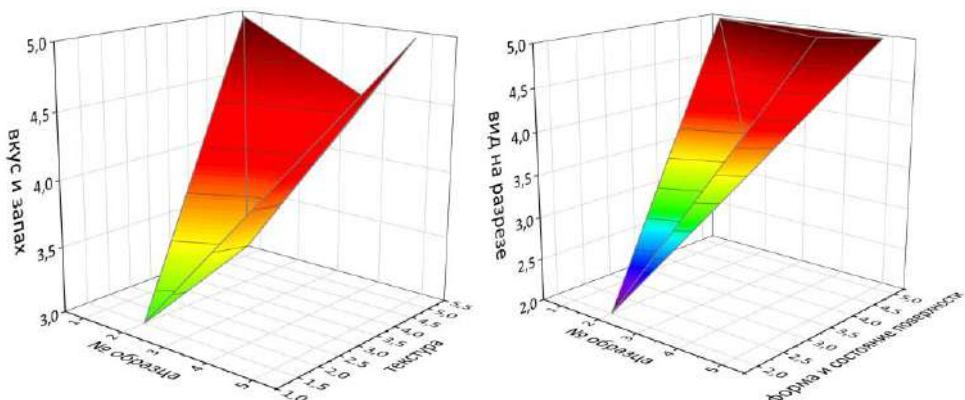


Рисунок 1 – Зависимости органолептических показателей качества от соотношений муки

Figure 1 – Dependence of organoleptic quality indicators on flour ratios

При определении вкуса и запаха отмечено, что в образцах полуфабрикатов с долей конопляной муки более 30 % при разжевывании чувствуются крупинки конопляной муки, запах приятный, свойственный.

Форма образцов с долей конопляной муки 50 % и 40 % – правильная, однако состояние поверхности выпеченного полуфабриката характеризуется недостаточным подъемом, впадинами и

изломами, что недопустимо для заварных полуфабрикатов. Лучшими качественными характеристиками обладали образцы с долей конопляной муки 20 % и 30 %, они имели выпуклую верхнюю корочку, правильную форму и достаточный подъем (рис. 2). При увеличении доли конопляной муки цвет изделий приобретал более темный оттенок.

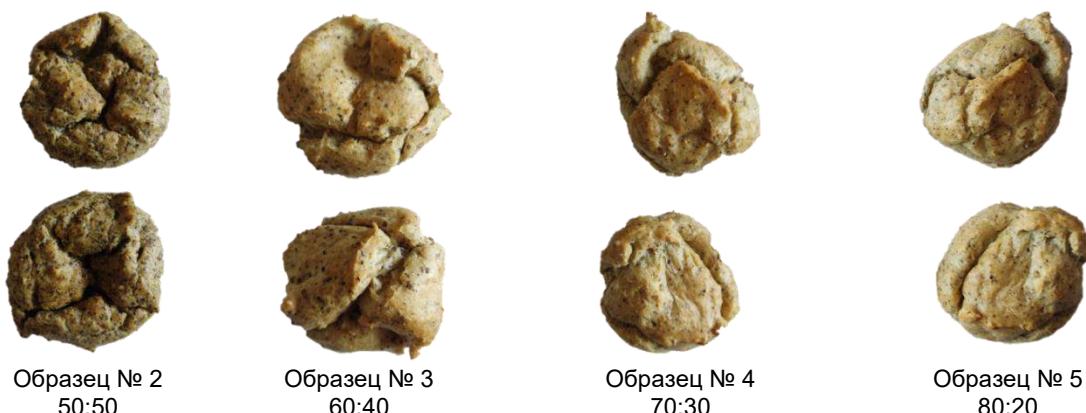


Рисунок 2 – Внешний вид образцов заварных полуфабрикатов

Figure 2 – Appearance of samples of choux semi-finished products

Анализ массовой доли влаги в образцах показал, что при увеличении доли конопляной муки в смеси происходит незначительное повышение влажности (рис. 3). Так как особенностью заварного полуфабриката является образование внутри

изделий при выпечке полостей, которые можно заполнять различными видами начинки, анализировали линейные характеристики образцов, такие как диаметр полости и высота полости (рис. 4).

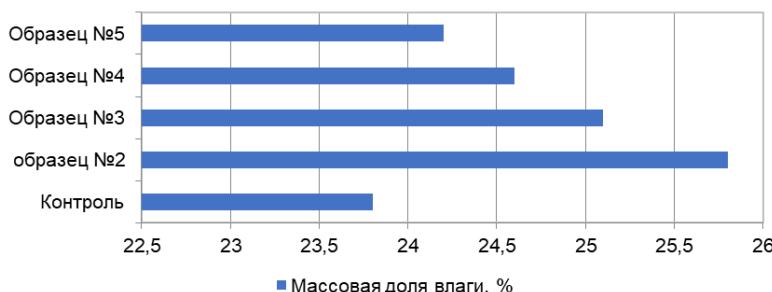


Рисунок 3 – Изменение массовой доли влаги в образцах

Figure 3 – Change in the mass fraction of moisture in samples

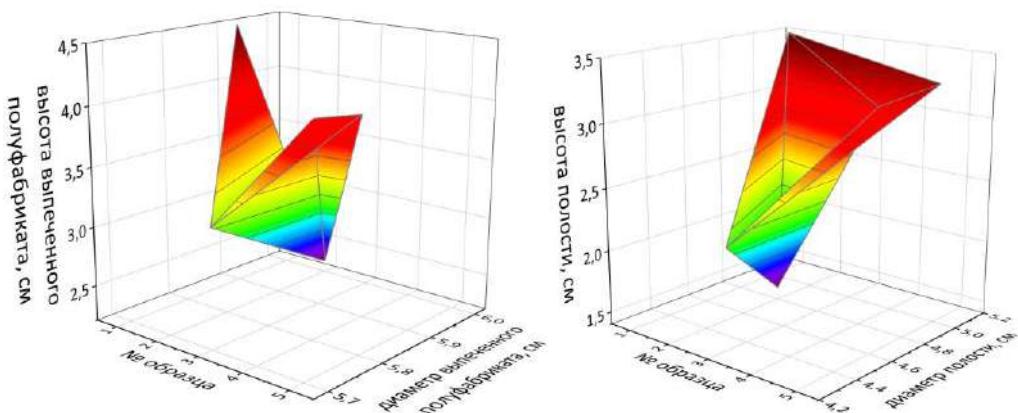


Рисунок 4 – Линейные характеристики образцов заварных полуфабрикатов

Figure 4 – Linear characteristics of samples of choux semi-finished products

Анализ линейных характеристик выявил, что применение конопляной муки в количестве 50 и 40 % к универсальной (образцы № 2 и № 3) значительно влияет на высоту выпеченного полуфабриката, которая по сравнению с контролем снижается на 2,3 и 1,3 см соответственно. По сравнению с образцами № 4 и № 5 высота выпеченных полуфабрикатов образцов № 2 и № 3 меньше в среднем на 1,7 и 1,8 см.

Высота и диаметр полости выпеченных полуфабрикатов с долей конопляной муки 50 и 40 % также характеризовались меньшими размерами по сравнению с образцами с меньшей долей конопляной муки. Это объясняется тем, что конопляная мука имеет более высокую водопоглотительную способность за счет высокого количества пищевых волокон и большую плотность [11].

Таким образом, анализ органолептических и линейных характеристик выявил, что лучшими свойствами обладали образцы с соотношением универсальной и конопляной муки 70:30 и 80:20.

Однако известны исследования по разработ-

ке состава и технологии безглютеновых заварных полуфабрикатов с долей рисовой и конопляной муки в соотношении 50:50 [11]. Очевидно, применение конопляной муки в количестве 50 % к рисовой связано с новой технологией, которая основана на применении белково-полисахаридных смесей и заменой масла сливочного на конопляное масло, капсулированной в оболочку из белково-полисахаридной смеси.

В нашем исследовании применяли традиционную технологию получения заварного полуфабриката, что не требует внесение изменений в технологический процесс.

У образцов № 4 и № 5 рассчитана пищевая ценность (таблица 1). Доля белков по сравнению с контрольным образцом повысилась на 64 % у образца № 4 и на 51 % – у образца № 5. Доля жиров увеличилась незначительно, в среднем на 8 %. Разработанные изделия обогатились пищевыми волокнами, суточная норма физиологической потребности в которых будет удовлетворена на 25–17 %.

Таблица 1 – Расчет пищевой ценности образцов заварных полуфабрикатов, г/100 г

Table 1 – Calculation of nutritional value of samples of choux semi-finished products, g/100 g

Номер образца	Белки, г	Жиры, г	Углеводы, г	Пищевые волокна, г	Энергетическая ценность, ккал
Контроль	9,8	17,2	26,3	0	299,0
Образец № 4	16,1	18,9	28,3	6,3	359,5
Образец № 5	14,8	18,6	32,0	4,2	354,8

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований показана возможность использования муки универсальной безглютеновой и конопляной в рецептуре заварного полуфабриката специализированной направленности. Установлено, что соотношение муки универсальной и конопляной 70:30;80:20 позволяет получить изделие с хорошими органолептическими показателями и повышенной пищевой ценностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Choux paste quality with canna flour substitution / E. Syukra [et al.] // Jurnal Pendidikan Tata Boga dan Teknologi. 2023. 5. 118. doi: 10. 24036/jptbt. v5i1. 12925.

2. Lestari F., Utami N. & Irfan, M. Addition of avocado seed flour in the making of choux paste // Jurnal Pendidikan Tata Boga dan Teknologi. 2022. 3. 80. doi: 10. 24036/jptbt. v3i3. 506.

3. Development of gluten-free cream puff with the addition of carboxymethylcellulose and carrageenan / P. Penjumras [et al.] // Food Research. 2018. 3. 141–147. doi: 10. 26656/fr. 2017. 3(2). 133.

4. Development and characterization of high-fiber, gluten-free pasta for celiac disease patients / S. Maghayadah [et al.] // Applied Sciences. 2024. 14. 3779. doi: 10. 3390/app14093779.

5. Cica Yu., Sri S. & Suhaastami S.Yu. Development of gluten free moringa choux paste as a culinary tourism product // Jurnal Bosaparis: Pendidikan Kesejahteraan Keluarga. 2022. 13. 3. doi: 10. 23887/jppkk. v13i3. 54199.

6. Разработка рецептуры заварного полуфабриката специализированного назначения на основе безглютеново-

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЗАВАРНОГО ПОЛУФАБРИКАТА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

го сырья / Л. Т. Фахртдинова [и др.] // Хлебопродукты. 2021. № 3. С. 26–31. doi: 10. 32462/0235-2508-2021-30-3-26-31.

7. Павлов А.В. Сборник рецептур мучных кондитерских и булочных изделий для предприятий общественного питания. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1998. 294 с.

8. Оценка пищевой ценности муки конопляной относительно традиционных видов безглютеновой муки / Л.Г. Ермощ [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2022. № 8 (185). С. 194–201. doi: 10. 36718/1819-4036-2022-8-194-201.

9. Резниченко И.Ю., Мирошина Т.А. Потенциал фитохимических веществ *Cannabissativa* L. в индустрии питания // Вестник КрасГАУ. 2023. № 9(198). С. 199–206. doi: 10. 36718/1819-4036-2023-9-199-206.

10. Резниченко И.Ю., Бородулин Д.М., Пикулина Н.С. Разработка рецептуры и оценка качества безглютенового мучного изделия // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 82–86. doi: 10. 25712/ASTU. 2072-8921. 2020. 02. 016.

11. Влияние продуктов переработки конопли и природы белка в стеновом материале эмульсионного геля на качество и структуру заварного полуфабриката для эклеров / В.А. Васькина [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 1. С. 150–162. doi: 10. 36107/spfp. 2023. 414.

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. Полецкова».

Т. А. Мирошина – канд. педагог. наук, доцент кафедры педагогических технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный аграрный университет имени В.Н. Полецкова».

REFERENCES

1. Syukra, E., Elida, E., Kasmita, K. & Anggraini, E. (2023). Choux paste quality with canna flour substitution. *Jurnal Pendidikan Tata Boga dan Teknologi*, 5, 118. doi: 10. 24036/jptbt. v5i1. 12925.
2. Lestari, F. Utami, N. & Irfan, M. (2022). Addition of avocado seed flour in the making of choux paste. *Jurnal Pendidikan Tata Boga dan Teknologi*, 3, 80. doi: 10. 24036/jptbt. v3i3. 506.
3. Penjumras, P., Janmeesup, C., Umnat, S., Chokeprasert, P., Wattananapakasem, I. & Phaiphan, A. (2018). Development of gluten-free cream puff with the addition of carboxymethylcellulose and carrageenan. *Food Research*, 3, 141-147. doi: 10. 26656/fr. 2017. 3(2). 133.
4. Maghaydah, S., Abu-Ghoush, M., Hayajneh, W. & Iqbal, S. (2024). Development and characterization of high-fiber, gluten-free pasta for celiac disease patients. *Applied Sciences*, 14, 3779. doi: 10. 3390/app14093779.
5. Cica, Yu., Sri, S. & Suahastami, S.Yu. (2022). Development of gluten free moringa choux paste as a culinary tourism product. *Jurnal Bosaparis: Pendidikan Kesejahteraan Keluarga*, 13, 3. doi: 10. 23887/jppkk. v13i3. 54199.
6. Fahrtdinova, L.T., Sadygova, M.K., Kirillova, T.V. & Sajdullaeva, Y.U.T. (2021). Development of a recipe for a specialized choux semi-finished product based on gluten-free raw materials. *Bread products*, 3, 26-31. (In Russ.). doi: 10. 32462/0235-2508-2021-30-3-26-31.
7. Pavlov, A.V. Collection of recipes for flour confectionery and bakery products for public catering establishments. (1998). St. Petersburg : Gidrometeoizdat. (In Russ.).
8. Ermosh, L.G., Prisuhina, N.V., Nepomnyashchih, E.N. & Savenkov, S.S. (2022). Assessment of the nutritional value of hemp flour relative to traditional types of gluten-free flour. *Bulletin of KrasSAU*, 8 (185), 194-201. (In Russ.). doi: 10. 36718/1819-4036-2022-8-194-201.
9. Reznichenko, I.YU. & Miroshina, T.A. (2023). Potential of phytochemicals of *Cannabis sativa* L. in the food industry. *Bulletin of KrasSAU*, 9(198), 199-206. (In Russ.). doi: 10. 36718/1819-4036-2023-9-199-206.
10. Reznichenko, I.YU., Borodulin, D.M. & Plikulina, N.S. (2020). Development of a recipe and quality assessment of a gluten-free flour product. *Polzunovsky Vestnik*, 2, 82-86. (In Russ.). doi: 10. 25712/ASTU. 2072-8921. 2020. 02. 016.
11. Vas'kina, V.A., SHarshunov, V.A., Mashkova, I.A., Bykov, A.A. & SHCHegoleva, I.D. (2023). The influence of hemp processing products and the nature of protein in the wall material of emulsion gel on the quality and structure of the choux semi-finished product for éclair. *Storage and processing of agricultural raw materials*, 1, 150-162. (In Russ.). doi: 10. 36107/spfp. 2023. 414.

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 23 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 23 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



ВЛИЯНИЕ ЦУКАТОВ ИЗ МЕСТНОГО ОВОЩНОГО СЫРЬЯ НА КАЧЕСТВО МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ПРИМЕРЕ СОЕВОГО ПЕЧЕНЬЯ

Антонина Александровна Рядинская ¹, Сергей Александрович Чуев ²

^{1, 2} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина», Россия

¹ dzm225@yandex.ru

² info@bsaa.edu.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние обогащения соевого печенья цукатами из плодов кабачков и тыквы, корнеплодов столовых моркови и свеклы местного производства на пищевую и энергетическую ценности, органолептические характеристики мучного кондитерского изделия.

Установлено улучшение функциональных свойств, вкуса и запаха готового продукта. Оптимальным опытным образцом определено соевое печенье, обогащенное цукатами из корнеплодов столовой моркови. Порция указанного мучного кондитерского изделия в объеме 100 г может удовлетворить суточную потребность организма взрослого человека в белке на 22,6 %; жирах – 12,8 %; углеводах – 16,2 %; витамине А – 222,3 %; витамине В₁ – 25,2 %; витамине В₂ – 12,7 %; витамине С – 1,2 %; витамине РР – 17,4 %; калии – 61,0 %; кальции – 22,5 %; магнезии – 50,9 %; натрии – 9,6 % и фосфоре – 53,8 %.

По итогам органолептической оценки соевое печенье, выработанное с добавлением цукатов из корнеплодов столовой моркови, получило 23 балла из 25 возможных.

Проведенные исследования позволили получить мучное кондитерское изделие с уникальными качественными свойствами, потребляя которое, человек сможет получать больше полезных веществ.

Ключевые слова: обезжиренная соевая мука, цукаты из кабачков, цукаты из тыквы, цукаты из столовой моркови, цукаты из столовой свеклы, мучное кондитерское изделие, печенье.

Для цитирования: Рядинская А. А., Чуев С. А. Влияние цукатов из местного овощного сырья на качество мучных кондитерских изделий на примере соевого печенья // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 100–107. doi: 10. 25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.015. EDN: <https://elibrary.ru/MFUZQG>.

Original article

EFFECT OF CANDIED FRUITS FROM LOCAL VEGETABLE RAW MATERIALS ON QUALITY OF FLOUR CONFECTIONERY PRODUCTS USING EXAMPLE OF SOY COOKIES

Antonina A. Ryadinskaya ¹, Sergey A. Chuev ²

Russia Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin», Russia

¹ dzm225@yandex.ru

² info@bsaa.edu.ru

Abstract. The influence of fortification of soy biscuits with candied fruits of zucchini and pumpkin, table root vegetables of carrots and beets of local production on nutritional and energy values, organoleptic characteristics of flour confectionery is considered. An improvement in the functional properties, taste and smell of the finished product has been established. Soy biscuits enriched with candied fruits from table carrot root vegetables were determined to be the best experimental sample. A 100 g portion of the specified pastry can satisfy the daily requirement of the adult body for protein by 22.6 %; fats - 12.8 %; carbohydrates - 16.2 %; vitamin A - 222.3 %; vitamin B1 - 25.2 %; vitamin B2 - 12.7 %; vitamin C - 1.2 %; vitamin PP - 17.4 %; potassium - 61.0 %; calcium - 22.5 %; magnesium - 50.9 %; sodium - 9.6 % and phosphorus - 53.8 %. According to the results of the organoleptic evaluation, soy biscuits made with the addition of candied fruits from table carrot root crops received 23 points out of a possible 25. The conducted research has made it possible to obtain flour confectionery products with unique qualitative properties, by consuming which, a person will be able to obtain more useful substances.

Keywords: low-fat soy flour, candied zucchini, candied pumpkin, candied carrot, candied beetroot, flour confectionery, biscuits.

For citation: Ryadinskaya, A.A., Chuev, S.A. (2025). Effect of candied fruits from local vegetable raw materials on quality of flour confectionery products using example of soy cookies. Polzunovskiy vestnik, (2), 100-107. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.015. EDN: <https://elibrary.ru/MFUZQG>.

© Рядинская А. А., Чуев С. А., 2025

ВЛИЯНИЕ ЦУКАТОВ ИЗ МЕСТНОГО ОВОЩНОГО СЫРЬЯ НА КАЧЕСТВО МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ПРИМЕРЕ СОЕВОГО ПЕЧЕНЬЯ

ВВЕДЕНИЕ

Полноценное и правильно организованное питание важно и необходимо для ежедневного восстановления, укрепления и сохранения здоровья граждан. Увеличение потребления полезных продуктов позволяет улучшить структуру питания и способствует повышению на отечественном рынке объема популярных продуктов массового потребления с высокой пищевой ценностью и выраженными вкусовыми данными.

Для устранения качественной неполноценности отдельных продуктов необходимы источники натуральных компонентов, содержащих биологически активные соединения. Растет интерес к соевым бобам и продуктам их переработки. Продукты на основе соевого сырья становятся одними из наиболее значимых в питании населения.

Соя обладает практически совершенным по аминокислотному составу белком, содержит минеральные вещества, полиненасыщенные жирные кислоты, многие водо- и жирорастворимые витамины, особенно витамин Е – важнейший природный антиоксидант; иные компоненты, полезные по своему биологическому действию для организма человека [1, 2], в связи с чем расширение продуктов питания на основе сырья из соевых бобов представляется перспективным и значимым для перерабатывающей и пищевой промышленности.

Цель работы – определить влияние овощных цукатов из местного овощного сырья на качество мучных кондитерских изделий на примере соевого печенья.

Задачи:

- разработать уникальные рецептуры соевого печенья, обогащенного овощными цукатами;
- апробировать отдельные технологические приемы изготовления мучных кондитерских изделий с добавлением цукатов из плодов кабачков, тыквы, корнеплодов столовых моркови и свеклы;
- изготовить экспериментальные образцы продукта, обосновать пищевую ценность, выполнить органолептическую оценку, выделить лучшие;
- определить функциональную направленность готового продукта;
- сформировать предложения по совершенствованию технологических процессов производства соевого печенья.

Объектами исследований стали выработанные мучные кондитерские изделия с функциональными свойствами, содержащие цукаты из плодов кабачков, тыквы, корнеплодов столовых моркови и свеклы.

МЕТОДЫ

Исследования организованы и проведены в условиях кафедры технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции технологического факультета ФГБОУ ВО «Белгородский ГАУ». Испытания направлены на совершенствование технологии производства мучных кондитерских изделий с целью улучшения пищевой ценности готового продукта.

Качественные показатели опытных образцов соевого печенья, обогащенного овощными цукатами, установлены согласно общепринятым методикам.

Сведения, полученные в рамках исследований, обработаны посредством статистических методов обработки данных.

Исследованы мучные кондитерские изделия:

- контрольный – образец № 1 – мучное кондитерское изделие – соевое печенье, выработанное по рецептуре сахарного печенья с полной заменой пшеничной муки высшего сорта на муку соевую обезжиренную и без добавлений;

- опытный образец № 2 – мучное кондитерское изделие, выработанное с добавлением цукатов из плодов кабачков;

- опытный образец № 3 – мучное кондитерское изделие, выработанное с добавлением цукатов из плодов тыквы;

- опытный образец № 4 – мучное кондитерское изделие, выработанное с добавлением цукатов из корнеплодов столовой моркови;

- опытный образец № 5 – мучное кондитерское изделие, выработанное с добавлением цукатов из корнеплодов столовой свеклы.

Основным компонентом образцов мучного кондитерского изделия выбрана обезжиренная соевая мука, обладающая богатым химическим составом (рисунок 1).

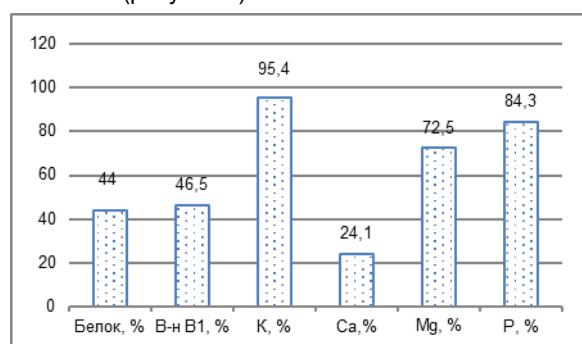


Рисунок 1 – Содержание отдельных компонентов в обезжиренной соевой муке

Figure 1 – The content of individual components in low-fat soy flour

В белке обезжиренной соевой муки, получаемой из высокопroteиновых шротов, зафиксированы практически все незаменимые аминокислоты. Пищевые белки соевых бобов сбалансированы по аминокислотному составу [3, 4].

Объем добавленных в рецептуру мучного кондитерского изделия овощных цукатов составил 20 % к массе муки соевой обезжиренной. Указанное содержание цукатов в готовом продукте определено путем изготовления пробных выработок и установлено как наилучшее для сохранения необходимых органолептических характеристик мучного кондитерского изделия.

Использовали цукаты из местного овощного сырья. В хозяйствах Белгородской области наращиваются объемы производства овощной продукции.

Цукаты часто применяют в качестве наполнителей с целью придания готовому продукту неповторимого вкуса. Для изготовления цукатов отлично подходят плоды кабачков, тыквы, корнеплоды столовых моркови и свеклы [5].

В овощах содержатся различные вкусовые и

ароматические вещества, значительно улучшающие вкус пищи и способствующие ее усвоению.

Кабачки содержат легкоусвояемые углеводы, минеральные вещества, витамины. Являются гипоаллергенным продуктом. Свойства сырья полностью раскрываются при выработке цукатов.

Тыква – ценный продукт питания с отличными вкусовыми свойствами, длительным сроком хранения. Цукаты из тыквы относят к источникам физиологически функциональных ингредиентов.

Корнеплоды столовой моркови являются самым богатым в средней полосе источником бета-каротина – предшественника витамина А. В цукатах сохраняются полезные свойства овоща.

Корнеплоды столовой свеклы – ценное местное овощное сырье. Овощ является уникальным источником бета-лайновых пигментов и других фитонутриентов, обладающих сильными антиоксидантными свойствами. Из корнеплодов производят сушёные продукты, различные виды консервов [6–14].

Технология выработки цукатов не требует сложного, дорогостоящего оборудования. Производство организовано в условиях кафедры технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции технологического факультета ФГБОУ ВО «Белгородский ГАУ».

Полученные овощные цукаты характеризовались отсутствием основных дефектов: без механических повреждений, не загрязненные, не засахаренные, без темных пятен, что соответствует положениям ГОСТ 34130-2017 Фрукты и овощи сушёные. Методы испытаний.

Массовая доля сухих веществ в цукатах составила от 80 % (цукаты из плодов тыквы) до 83 % (цукаты из корнеплодов столовой моркови) (табл. 1).

Таблица 1 – Физико-химические показатели овощных цукатов

Table 1 – Physico-chemical parameters of candied vegetables

Показатель	Цукаты			
	Из кабачков	Из тыквы	Из столовой моркови	Из столовой свеклы
Массовая доля сухих веществ, %	82	80	83	82
Массовая доля общего сахара, %	74	73	74	72

Массовая доля общего сахара варьировала от 72 % (цукаты из корнеплодов столовой свеклы) до 74 % (цукаты из плодов кабачков и корнеплодов столовой моркови).

Овощные цукаты обладали следующими органолептическими показателями.

По внешнему виду – однородные и сохраняющие форму нарезки.

Цукаты из плодов кабачков желтоватые с белым оттенком, из плодов тыквы – оранжевые, из корнеплодов столовой моркови – светло-желтые, из корнеплодов столовой свеклы – бордового цвета.

Консистенция овощных цукатов слегка плотная, запах – гармоничный без посторонних ароматов, вкус – приятный, сладкий, свойственный использованному местному растительному сырью.

Выработка опытных образцов мучного кондитерского изделия состояла из следующих операций.

Изготовленные овощные цукаты подвергали измельчению. Размер частиц составил 5–7 мм. Его определяли при помощи лупы при переносе измельченных овощных цукатов на измерительную сетку. Затем смешивали с компонентами теста с учетом рецептур опытных образцов. Массу тщательно вымешивали до однородного состояния и равномерного распределения компонентов. Из теста с овощными цукатами формировали заготовки.

Заготовки выкладывали на противень с пергаментом и придавали соевому печенью желаемую форму. Соевое печенье выпекали 20 минут при температуре 180 °C.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В выработанных опытных образцах мучного кондитерского изделия рассчитаны: пищевая ценность (количество белков, жиров и углеводов), энергетическая ценность (калорийность); содержание макроэлементов и витаминов.

Содержание белков изменилось от 23,7 г в соевом печенье без добавок до 26,4 г в соевом печенье, обогащенном цукатами из плодов кабачков, и соевом печенье, изготовленном с добавлением цукатов из корнеплодов столовой моркови (табл. 2).

Таблица 2 – Действие добавки из овощных цукатов на пищевую и энергетическую ценность готового продукта (из расчета на 100 г)

Table 2 – The effect of candied vegetable additives on the nutritional and energy value of the finished product (per 100 g)

Образец	Пищевая ценность (г)			Энергетическая ценность (кКал)
	Белки	Жиры	Углеводы	
1	23,7± 1,14	19,5± 0,84	26,1± 1,29	374,7± 17,62
2	26,4± 1,21	20,7± 0,92	92,4± 4,51	661,6± 31,97
3	25,1± 1,19	19,7± 0,87	68,6± 3,32	551,9± 26,48
4	26,4± 1,21	19,7± 0,87	94,8± 4,63	661,9± 32,01
5	24,6± 1,17	19,6± 0,85	57,3± 2,75	503,9± 24,08

Количество жиров в опытных образцах мучного кондитерского изделия варьировало от 19,6 г в соевом печенье без добавок до 20,7 г в соевом печенье, обогащенном цукатами из плодов кабачков.

Содержание углеводов составило от 26,1 г в соевом печенье без добавок до 94,8 г в соевом печенье, обогащенном цукатами из корнеплодов столовой моркови.

Энергетическая ценность опытных образцов мучного кондитерского изделия изменилась от 374,7 кКал в соевом печенье без добавок до 661,9 кКал в соевом печенье, обогащенном цукатами из корнеплодов столовой моркови.

Проанализирован макроэлементный состав опытных образцов мучного кондитерского изделия (табл. 3).

ВЛИЯНИЕ ЦУКАТОВ ИЗ МЕСТНОГО ОВОЩНОГО СЫРЬЯ НА КАЧЕСТВО МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ПРИМЕРЕ СОЕВОГО ПЕЧЕНЬЯ

Таблица 3 – Действие добавки из овощных цукатов на количество макроэлементов в готовом продукте (из расчета на 100 г)

Table 3 – The effect of candied vegetable additives on the amount of macronutrients in the finished product (per 100 g)

Образец	Макроэлементы (мг)				
	Na	K	Ca	Mg	P
1	74,1± 3,68	1095,1± 53,62	115,0± 5,64	132,7± 6,52	313,5±1 5,56
2	83,8± 4,07	2211,3± 109,45	185,4± 9,16	172,3± 8,50	365,4±1 8,16
3	80,5± 3,91	1409,0± 69,34	152,7± 7,52	153,3± 76,54	348,9±1 7,32
4	125,3± 6,14	1525,6± 75,17	225,4± 11,16	203,6± 10,07	430,7±2 1,42
5	101,5± 0,94	1282,9± 63,03	140,4± 6,91	147,1± 73,43	338,8±1 6,83

Наибольшее содержание натрия – 125,3 мг среди опытных образцов зафиксировано в соевом печенье, обогащенном цукатами из корнеплодов столовой моркови, наименьшее – 80,5 мг – в соевом печенье, обогащенном цукатами из плодов тыквы, при контрольном значении 74,1 мг.

Наивысшее количество калия – 2211,3 мг – среди опытных образцов определено в соевом печенье, обогащенном цукатами из плодов кабачков, наименьшее – 1282,9 мг – в соевом печенье, обогащенном цукатами из корнеплодов столовой свеклы, при контрольном значении 1095,1 мг.

Наибольшее содержание кальция – 225,4 мг – среди опытных образцов установлено в соевом печенье, обогащенном цукатами из корнеплодов столовой моркови, наименьшее – 140,4 мг – в соевом печенье, обогащенном цукатами из корнеплодов столовой свеклы, при контрольном значении 115,0 мг.

Наивысшее количество магния – 203,6 мг – среди опытных образцов зафиксировано в соевом печенье, обогащенном цукатами из моркови, наименьшее – 147,1 мг – в соевом печенье, обогащенном цукатами из корнеплодов столовой свеклы, при контрольном значении – 132,7 мг.

Наибольшее содержание фосфора – 430,7 мг – среди опытных образцов установлено в соевом печенье, обогащенном цукатами из корнеплодов столовой моркови, наименьшее – 348,9 мг – в соевом печенье, обогащенном цукатами из плодов тыквы, при контрольном значении 313,5 мг.

Рассмотрен витаминный состав опытных образцов мучного кондитерского изделия (таблица 4).

По содержанию витамина С значительно отличается соевое печенье, обогащенное цукатами из плодов кабачков. Показатель составил 27,5 мг. Среди опытных образцов в соевом печенье, обогащенном цукатами из корнеплодов столовой моркови, наименьшее значение – 1,1 мг.

По количеству витаминов группы В (тиамина и рибофлавина) опытные образцы мучного кондитерского изделия существенно не различались.

Содержание витамина РР среди опытных образцов изменилось от 1,7 мг в соевом печенье,

обогащенном цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 4,2 мг в соевом печенье, обогащенном цукатами из плодов кабачков.

Таблица 4 – Действие добавки из овощных цукатов на количество отдельных витаминов в готовом продукте (из расчета на 100 г)

Table 4 – Effect of candied vegetable supplement on the amount of individual vitamins in the finished product (per 100 g)

Образец	Витамины (мг)				
	C	B ₁	B ₂	PP	A (мкг)
1	0,01± 0,0004	0,3± 0,02	0,1± 0,01	1,4± 0,06	150,1± 7,41
2	27,5± 1,26	0,4± 0,02	0,3± 0,02	4,2± 0,19	170,9± 8,43
3	4,9± 0,15	0,4± 0,02	0,2± 0,01	2,5± 0,11	517,3± 25,75
4	1,1± 0,04	0,4± 0,02	0,2± 0,01	3,5± 0,15	2000,9± 99,93
5	3,5± 0,15	0,3± 0,02	0,2± 0,01	1,7± 0,08	151,3± 7,45

По количеству витамина А существенно выделилось соевое печенье, обогащенное цукатами из корнеплодов столовой моркови. Показатель равен 2000,9 мг. Значительное накопление – 517,3 мг биологически значимого вещества – определено в соевом печенье, обогащенном цукатами из плодов тыквы. Примерно на одном уровне содержание витамина А в соевом печенье, обогащенном цукатами из плодов кабачков, и в соевом печенье, обогащенном цукатами из корнеплодов столовой свеклы: 170,9 и 151,3 мг соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проанализированы данные расчета нутриентного баланса опытных образцов мучного кондитерского изделия на основании физиологически необходимого объема пищевых веществ, энергии, минералов и витаминов.

Обеспеченность белком изменилась от 21,0 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 22,6 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из плодов кабачков, и у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой моркови, при контрольном значении 20,3 % (рисунок 2).

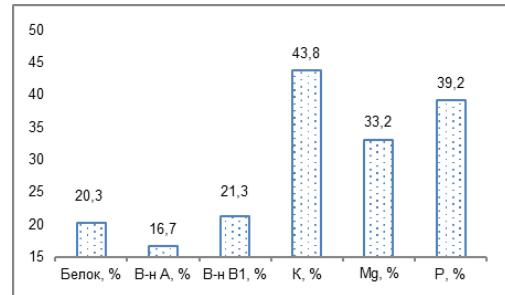


Рисунок 2 – Содержание отдельных компонентов в соевом печенье

Figure 2 – The content of individual components in soy biscuits

Обеспеченность жирами значительно не отличалась между опытными образцами мучного кондитерского изделия и составила 12,7–13,4 %.

Обеспеченность углеводами варьировала от 9,8 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 16,2 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой моркови, при контрольном значении 4,4 %.

Обеспеченность витамином А составила от 16,8 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 222,3 % (рисунок 3) у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой моркови, при контрольном значении 16,7 %.

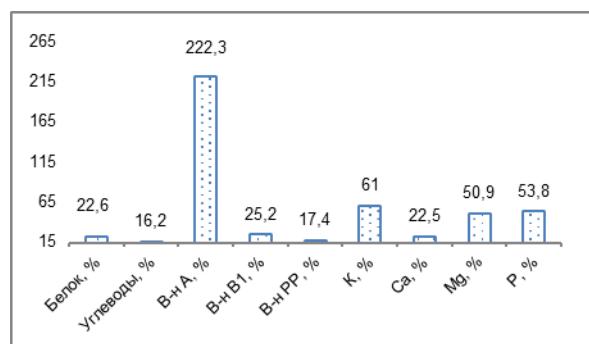


Рисунок 3 – Содержание отдельных компонентов в соевом печенье с цукатами из корнеплодов столовой моркови

Figure 3 – The content of individual components in soy biscuits with candied fruit from table carrot roots

Высокая обеспеченность витамином А среди опытных образцов мучного кондитерского изделия отмечена у соевого печенья, обогащенного цукатами из плодов тыквы, – 57,5 % (рисунок 4).

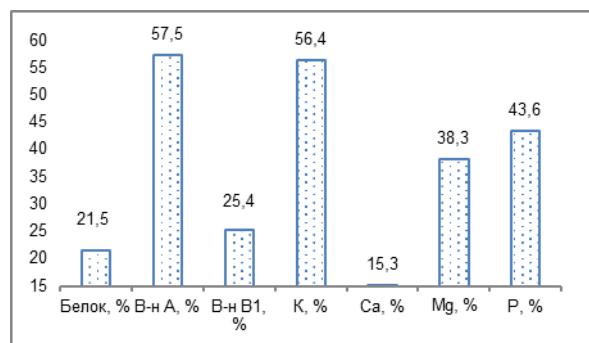


Рисунок 4 – Содержание отдельных компонентов в соевом печенье с цукатами из плодов тыквы

Figure 4 – The content of individual components in soy biscuits with candied pumpkin fruits

Обеспеченность витамином В₁ изменилась от 22,1 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 29,2 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из плодов кабачков (рисунок 5), при контрольном значении 21,3 %.

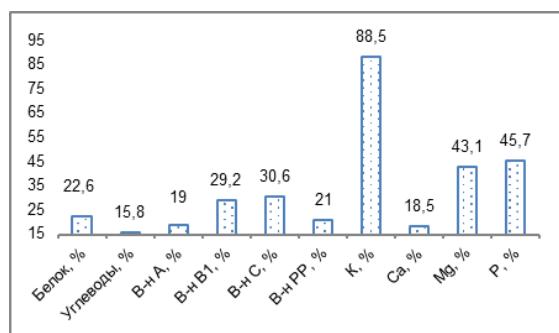


Рисунок 5 – Содержание отдельных компонентов в соевом печенье с цукатами из плодов кабачков

Figure 5 – The content of individual components in soy biscuits with candied zucchini fruits

Обеспеченность витамином В₂ варьировала от 9,0 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 14,4 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из плодов кабачков, при контрольном значении 7,8 %.

Обеспеченность витамином С составила от 1,2 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой моркови, до 30,6 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из плодов кабачков, при контрольном значении 0,01 %.

Обеспеченность витамином РР изменялась от 8,5 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 21,0 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из плодов кабачков, при контрольном значении 7,0 %.

Обеспеченность калием варьировала от 51,3 % (рисунок 6) у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 88,5 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из плодов кабачков, при контрольном значении 43,8 %.

Обеспеченность кальцием составила от 14,0 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 22,5 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой моркови, при контрольном значении 11,5 %.

Обеспеченность магнием изменилась от 36,8 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 50,9 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой моркови, при контрольном значении 33,2 %.

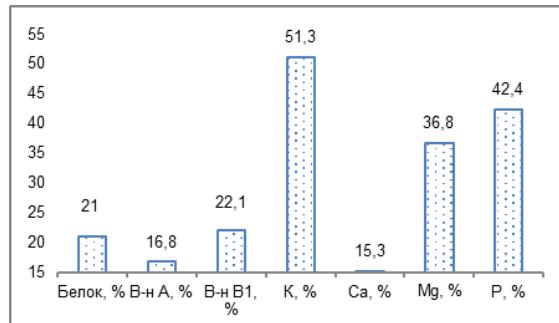


Рисунок 6 – Содержание отдельных компонентов в соевом печенье с цукатами из корнеплодов столовой свеклы

Figure 6 – The content of individual components in soy biscuits with candied fruit from beetroot

ВЛИЯНИЕ ЦУКАТОВ ИЗ МЕСТНОГО ОВОЩНОГО СЫРЬЯ НА КАЧЕСТВО МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ПРИМЕРЕ СОЕВОГО ПЕЧЕНЬЯ

Обеспеченность натрием составила от 6,2 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из плодов тыквы, до 9,6 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой моркови, при контрольном значении 5,7 %.

Обеспеченность фосфором варьировала от 42,4 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, до 53,8 % у соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой моркови, при контрольном значении 39,2 %.

Готовый продукт – мучное кондитерское изделие – изучили на соответствие требованиям ГОСТ 24901-2014. «Межгосударственный стандарт. Печенье. Общие технические условия.

Оценка органолептических показателей проводилась комиссионно с помощью органов чувств исследователей (рисунок 7).

Готовый продукт обладал вкусом и запахом хорошо пропеченного мучного кондитерского изделия с приятным ароматом соевой муки и овощных цукатов.

Форма выработанных мучных кондитерских изделий оценена как плоская, без повреждения края, вмятин и вздутий.

Поверхность готового продукта неподгорелая, шероховатая с вкраплением овощных цукатов.

Цвет выработанных мучных кондитерских изделий коричневый с цветными вкраплениями овощных цукатов.

У готового продукта вид в изломе характеризовался как пропеченное печенье с пористой структурой и мелкими добавлениями овощных цукатов, без пустот и следов непромеса.

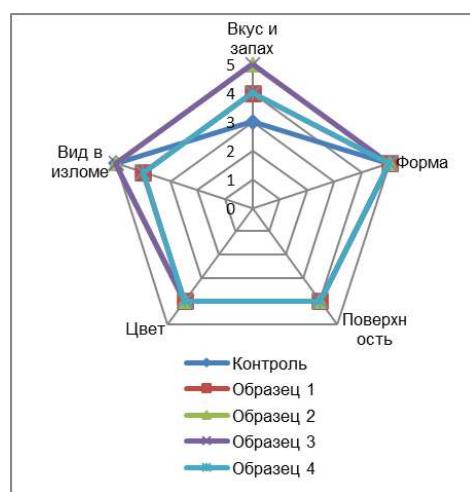


Рисунок 7 – Оценка органолептических показателей опытных образцов мучного кондитерского изделия

Figure 7 – Evaluation of organoleptic properties of experimental samples of flour confectionery

Из физико-химических показателей определяли щелочность и намокаемость (табл. 5).

Концентрация токсических элементов, микротоксинов и пестицидов в готовом продукте не превышало норм ТР ТС 021/2011.

Микробиологические показатели разработан-

ных мучных кондитерских изделий соответствовали нормам ТР ТС 021/2011.

Таблица 5 – Отдельные физико-химические показатели опытных образцов мучного кондитерского изделия

Table 5 – Individual physico-chemical parameters of experimental samples of flour confectionery

Показатель	Образец				
	1	2	3	4	5
Щелочность, град.	1,5	1,3	1,4	1,4	1,4
Намокаемость, %	190	187	185	185	184

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработаны и апробированы рецептуры мучного кондитерского изделия с добавлением цукатов из местного овощного сырья: плодов кабачков и тыквы, корнеплодов столовых моркови и свеклы.

Введение цукатов в соевое печенье способствовало приданию готовому продукту уникальных вкусовых свойств и повышению функциональной направленности.

Соевое печенье, обогащённое овощными цукатами, не содержит продукты переработки зерновых культур, и с учетом индивидуальных особенностей организма может быть рекомендовано для организации полноценного питания населения.

Функциональные свойства соевого печенья, обогащенного овощными цукатами, подтвердились способностью обеспечивать питание взрослого человека биологически важными веществами на 15 % и более (МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации»).

Так, 100 г соевого печенья, обогащенного цукатами из плодов кабачков, характеризовались обеспеченностью белком на 22,6 %; углеводами – 15,8 %; витамином А – 19,0 %; витамином В₁ – 29,2 %; витамином С – 30,6 %; витамином РР – 21,0 %; калием – 88,5 %; кальцием – 18,5 %; магнием – 43,1 % и фосфором – 45,7 %.

В свою очередь, 100 г соевого печенья, обогащенного цукатами из плодов тыквы, характеризовались обеспеченностью белком на 21,5 %; витамином А – 57,5 %; витамином В₁ – 25,4 %; калием – 56,4 %; кальцием – 15,3 %; магнием – 38,3 % и фосфором – 43,6 %.

Также 100 г соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой моркови, характеризовались обеспеченностью белком на 22,6 %; углеводами – 16,2 %; витамином А – 222,3 %; витамином В₁ – 25,2 %; витамином РР – 17,4 %; калием – 61,0 %; кальцием – 22,5 %; магнием – 50,9 % и фосфором – 53,8 %.

В том числе 100 г соевого печенья, обогащенного цукатами из корнеплодов столовой свеклы, характеризовались обеспеченностью белком на 21,0 %; витамином А – 16,8 %; витамином В₁ – 22,1 %; калием – 51,3 %; магнием – 36,8 % и фосфором – 42,4 %.

Для промышленного изготовления по совокупности содержания биологически важных ве-

ществ, органолептических показателей и круглодиничной доступности сырьевой базы для выработки добавки рекомендовано соевое печенье, обогащенное цукатами из корнеплодов столовой моркови, с целью совершенствования ассортимента мучных кондитерских изделий функциональной направленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стациенко Е.С. Оценка технологических свойств зерна сои сортов селекции Всероссийского НИИ сои и продуктов его переработки для определения их пригодности к использованию в пищевом производстве / Е.С. Стациенко, О.В. Литвиненко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2019. Т. 7, № 3. С. 31–40. DOI: 10.14529/food190304. EDN HFZLKL.
2. Моргунова Е.М. Разработка низкобелковых смесей для выпечки мучных кондитерских изделий специализированного назначения / Е.М. Моргунова, Ю.А. Сорокина // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2021. Т. 14, № 4 (54). С. 12–16. DOI: 10.47612/2073-4794-2021-14-4(54)-12-16. EDN ZZOBEX.
3. Мхитарьянц Л.А. Влияние добавки соевой муки на потребительские свойства пшеничного хлеба / Л.А. Мхитарьянц, О.В. Таранец, Г.А. Мхитарьянц // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2020. № 1(373). С. 21–24. DOI: 10.26297/0579-3009.2020.1.5. EDNBLIJJC.
4. Типсина Н.Н. Применение белково-растительного сырья для функциональных мучных кондитерских изделий (на примере печенья соевого) / Н.Н. Типсина, Г.А. Демиденко, М.С. Белошапкин // Вестник КрасГАУ. 2024. № 4(205). С. 239–246. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-4-239-246. EDN PUSDIW.
5. Мачнева Н.Л. Производство овощных цукатов / Н.Л. Мачнева, М.Д. Трус, А.С. Фомина // Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции: сборник статей по материалам VI Международной научно-практической конференции, Краснодар, 31 марта 2020 года / Ответственный за выпуск А.В. Степовой. Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2020. С. 547–551. EDNNUGFIS.
6. Исследование пищевой безопасности и санитарных показателей цукатов из овощей / Ш.Ш.У. Отаханов, У.Р. Нишонов, Д. Тошпұлатова [и др.] // Universum: технические науки. 2022. № 7–2(100). С. 60–64. DOI: 10.32743/UniTech.2022.100.7.14028. EDNBXAAJY.
7. Влияние сорта и степени зрелости плода на органолептические показатели цукатов из кабачков / Т.А. Санникова, В.А. Мачулкина, Л.В. Павлов, А.В. Гулин // Овощи России. 2020. № 1. С. 42–44. DOI: 10.18619/2072-9146-2020-1-42-44. EDNUQBYNS.
8. Глебова О.М. Особенности технологии производства цукатов из кабачков / О.М. Глебова // Молодежная наука: инновации и технологии: сборник материалов региональной научно-практической конференции, Великий Новгород, 12 мая 2022 года. Великий Новгород : Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, 2022. С. 89–94. DOI: 10.34680/978-5-89896-808-3/2022.young.15. EDNBLXTM.
9. Трушин Ю.Е. Технология производства и первичной переработки органической тыквы / Ю.Е. Трушин, Т.Б. Путиловская, Е.А. Моренова // Аграрный научный журнал. 2024. № 4. С. 150–155. DOI: 10.28983/asj.y2024i4pp150-155. EDNGNHBZC.
10. Исследование влияния обогащающего компонента на качество плавленого сыра / Е.И. Решетник, С.Л. Грибанова, Ю.И. Держапольская [и др.] // Агронавка. 2024. Т. 2, № 3. С. 46–51. DOI: 10.24412/2949-2211-2024-2-3-46-51. EDNSYGYICO.
11. Технологии эффективной переработки тыквы / А.А. Рядинская, Н.Б. Ордина, К.В. Мезинова [и др.]. Екатеринбург : Общество с ограниченной ответственностью «Издательские решения», 2020. 196 с. ISBN 978-5-0051-8712-3. EDNIKUDGO.
12. Трус М.Д. Разработка биотехнологии производства морковных цукатов с повышенными функциональными свойствами / М.Д. Трус, А.С. Фомина, Н.Л. Мачнева // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сборник статей по материалам 76-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2020 год. В 3-х частях, Краснодар, 10–30 марта 2021 г. / Отв. за выпуск А.Г. Кощаев. Часть 1. Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. С. 687–690. EDNQKRCCLD.
13. Технологии производства и переработки моркови / И.А. Кощаев, А.А. Рядинская, С.А. Чуев [и др.]. Без места : Общество с ограниченной ответственностью «Издательские решения», 2022. 234 с. ISBN 978-5-0059-1675-4. EDNVNRLYO.
14. Костко И.Г. Совершенствование элементов технологии производства цукатов из свеклы / И.Г. Костко // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург – Пушкин, 23–25 января 2020 года. Часть 1. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2020. С. 111–114. EDNXFCTYR.

Информация об авторах

А. А. Рядинская – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры производства и переработки сельскохозяйственной продукции технологического факультета ФГБОУ ВО «Белгородский ГАУ» (e-mail: antonina.yurchenko.63@mail.ru).

С. А. Чуев – кандидат биологических наук, доцент кафедры производства и переработки сельскохозяйственной продукции технологического факультета ФГБОУ ВО «Белгородский ГАУ».

REFERENCES

1. Statsenko, E.S. Evaluation of the technological properties of soybean grain of varieties of the All-Russian Research Institute of Soybeans and its processed products to determine their suitability for use in food production / E.S. Statsenko, O.V. Litvinenko // Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and biotechnology. 2019. Vol. 7, No. 3. pp. 31-40. DOI: 10.14529/food190304. EDN HFZLKL. (In Russian).
2. Morgunova, E.M. Development of low-protein mixtures for baking flour confectionery products for specialized purposes / E.M. Morgunova, Yu.A. Sorokina // Food industry: science and technology. 2021. Vol. 14, No. 4 (54). pp. 12–16. DOI: 10.47612/2073-4794-2021-14-4(54)-12-16. EDN ZZOBEX. (In Russian).
3. Mkhitaryants, L.A. The influence of soy flour additives on the consumer properties of wheat bread / L.A. Mkhitaryants, O.V. Taranets, G.A. Mkhitaryants // News of higher educational institutions. Food technology. 2020. No. 1(373). Pp. 21-24. DOI: 10.26297/0579-3009.2020.1.5. EDNBLIJJC. (In Russian).
4. Tipsina, N.N. The use of protein-vegetable raw materials for functional flour confectionery products (using soy biscuits as an example) / N.N. Tipsina, G.A. Demidenko, M.S. Beloshapkin // Bulletin of the KrasGAU. 2024. No. 4(205). Pp. 239-246. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-4-106.

ВЛИЯНИЕ ЦУКАТОВ ИЗ МЕСТНОГО ОВОЩНОГО СЫРЬЯ НА КАЧЕСТВО МУЧНЫХ КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ПРИМЕРЕ СОЕВОГО ПЕЧЕНЬЯ

239-246. EDN PUSDIW. (In Russian).

5. Machneva, N.L. Production of candied vegetables / N.L. Machneva, M.D. Trus, A.S. Fomina // Modern aspects of the production and processing of agricultural products: a collection of articles based on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Krasnodar, March 31, 2020 / Responsible for the release of A.V. Stepova. Krasnodar : I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, 2020, pp. 547-551. EDN NUGFIS. (In Russian).

6. Research of food safety and sanitary indicators of candied fruits from vegetables / Sh.Sh.U. Otakhanov, U.R. Nishonov, D. Toshpylatova [et al.] // Universum: technical sciences. 2022. № 7-2(100). Pp. 60-64. DOI: 10.32743/UniTech.2022.100.7.14028. EDN BXAAJY. (In Russian).

7. Sannikova, T.A., Machulkina, V.A., Pavlov, L.V., Gulin, A.V. Influence of the variety and degree of fruit maturity on the organoleptic parameters of candied zucchini. Vegetables of Russia. 2020. No. 1. PP. 42-44. DOI: 10.18619/2072-9146-2020-1-42-44. EDN UQBYNS. (In Russian).

8. Glebova, O.M. Features of candied zucchini production technology / O.M. Glebova // Youth science: innovations and technologies: collection of materials of the regional scientific and practical conference, Veliky Novgorod, May 12, 2022. Veliky Novgorod: Yaroslav the Wise Novgorod State University, 2022. pp. 89-94. DOI: 10.34680/978-5-89896-808-3/2022.young.15. EDN BLXTTM. (In Russian).

9. Trushin, Yu.E. Technology of production and primary processing of organic pumpkin / Yu.E. Trushin, T.B. Putivskaya, E.A. Morenova // Agrarian Scientific journal. 2024. No. 4. pp. 150-155. DOI: 10.28983/asj.y2024i4. pp. 150-155. EDN GNHBZC. (In Russian).

10. Investigation of the effect of the enriching component on the quality of processed cheese / E.I. Reshetnik, S.L. Gribanova, Yu.I. Derzhapolskaya [et al.] // Agronauka. 2024. Vol. 2, No. 3. pp. 46-51. DOI: 10.24412/2949-2211-2024-2-3-46-51. EDN SYGICO. (In Russian).

11. Technologies of effective pumpkin processing / A.A. Ryadinskaya, N.B. Ordina, K.V. Mesinova [et al.]. Yekaterinburg: Publishing Solutions Limited Liability Company, 2020. 196 p. ISBN 978-5-0051-8712-3. EDN IKUDGO. (In Russian).

12. Trus, M.D. Development of biotechnology for the production of candied carrots with enhanced functional properties / M.D. Trus, A.S. Fomina, N.L. Machneva // Scientific support of the agro-industrial complex: A collection of articles based on the materials of the 76th scientific and practical conference of students on the results of research for 2020. In 3 parts, Krasnodar, March 10-30, 2021 / Editor-in-chief A.G. Koshchaev. Volume Part 1. Krasnodar: I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, 2021. pp. 687-690. EDN QKRCLD. (In Russian).

13. Technologies of carrot production and processing / I.A. Koshchaev, A.A. Ryadinskaya, S.A. Chuev [et al.]. Without a place: Publishing Solutions Limited Liability Company, 2022. 234 p. ISBN 978-5-0059-1675-4. EDN VNRLYO. (In Russian).

14. Kostko, I.G. Improving the elements of technology for the production of candied beet products / I.G. Kostko // Scientific support for the development of agriculture in the context of import substitution: A collection of scientific papers based on the materials of the international scientific and practical conference, St. Petersburg - Pushkin, January 23-25, 2020. Volume Part 1. Saint Petersburg: Saint Petersburg State Agrarian University, 2020. pp. 111-114. EDN XFCTYR. (In Russian).

Information about the authors

A.A. Ryadinskaya - Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Production and Processing of Agricultural Products of the Technological Faculty of the Belgorod State Agrarian University (e-mail: antonina.yurchenko.63@mail.ru).

S.A. Chuev - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Production and Processing of Agricultural Products of the Technological Faculty of the Belgorod State Agrarian University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 23 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 637.041
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.016

EDN: JMFXGV

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ БЕЛКОВ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ В ЭНТЕРАЛЬНОМ ПИТАНИИ

Алла Львовна Новокшанова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», Москва, Россия
novokshanova@ion.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5049-1472>

Аннотация. Базовые пищевые продукты энтерального питания как разновидность специализированной пищевой продукции предназначены для зондового питания и/или перорального употребления как единственный или дополнительный источник пищевых веществ и энергии при недостаточности питания. На текущий момент производство продуктов энтерального питания в России не обеспечивает потребности государства в них и нуждается в масштабировании. Важнейший макронутриент продуктов энтерального питания – белки. Стандартом на продукты энтерального питания разрешено использование ряда пищевых белков, в том числе концентратов сывороточного белка сухого с массовой долей сухих веществ не менее 80 %. Этому определению соответствуют концентраты сывороточных белков с массовой долей белка 80 % (КСБ-УФ-80), 60 % (КСБ-УФ-60) и 40 % (КСБ-УФ-40), полученные мембранными методами с последующей сушкой. Диапазон содержания жиров и углеводов в этих концентратах очень широкий. Протеиновый компонент концентратов сывороточных белков представлен преимущественно двумя фракциями: β -лактоглобулином и α -лактальбумином. Структурные особенности строения этих белков, их молекулярные массы и размеры, обуславливают коллоидные свойства систем с их участием. При этом гидрофильность, поверхностная активность, термолабильность и способность к межмолекулярным взаимодействиям приобретают значение технологических функций, от которых будут зависеть параметры производства продуктов энтерального питания.

Ключевые слова: специализированное питание, продукты энтерального питания, концентраты сывороточных белков, β -лактоглобулин, α -лактальбумин, технологические свойства.

Для цитирования: Новокшанова А. Л. Разработки в области специализированного питания с использованием молочного сырья // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 108–111. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.016. EDN: <https://elibrary.ru/JMFXGV>.

Original article

TECHNOLOGICAL FUNCTIONS OF WHEY PROTEINS IN ENTERAL NUTRITION

Alla L. Novokshanova

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety», Moscow, Russia, novokshanova@ion.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5049-1472>

Abstract. Basic enteral nutrition products, as a type of specialized food products, are intended for tube feeding and/or oral use as the only or additional source of nutrients and energy in case of malnutrition. Currently, the production of enteral nutrition products in Russia does not meet the state's needs for them and requires scaling. The most important macronutrient of enteral nutrition products is proteins. The standard for enteral nutrition products allows the use of a number of food proteins, including dry whey protein concentrate with a dry matter content of at least 80%. This definition corresponds to whey protein concentrates with a protein content of 80% (WPC-UF-80), 60% (WPC-UF-60) and 40% (WPC-UF-40), obtained by membrane methods with subsequent drying. The range of fat and carbohydrate content in these concentrates is very wide. The protein component of whey protein concentrates is represented mainly by two fractions: β -lactoglobulin and α -lactalbumin. The structural features of these proteins, their molecular weights and sizes determine the colloidal properties of systems with their participation. In this case, hydrophilicity, surface activity, thermolability and the ability to intermolecular interactions acquire the significance of technological functions on which the parameters of enteral nutrition products production will depend.

Keywords: specialized nutrition, enteral nutrition products, whey protein concentrates, β -lactoglobulin, α -lactalbumin, technological properties.

For citation: Novokshanova, A.L. (2025). Developments in the field of specialized nutrition using dairy raw materials. Polzunovskiy vestnik, (2), 108-111. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.016. EDN: <https://elibrary.ru/JMFXGV>.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ БЕЛКОВ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ В ЭНТЕРАЛЬНОМ ПИТАНИИ

ВВЕДЕНИЕ

Специализированные базовые пищевые продукты энтерального питания предназначены для зондового питания и/или перорального употребления как единственный или дополнительный источник пищевых веществ и энергии при недостаточности питания или риске ее формирования, когда обычный прием пищи невозможен или ограничен [1]. Недостаточность питания, связанная с хроническим заболеванием, представляет собой серьезную проблему для системы здравоохранения, поскольку наблюдается у 85 % пожилого населения и у 50 % всех госпитализированных пациентов [2].

Продукты энтерального питания необходимы не только при нутритивной недостаточности или риске ее развития. Эти продукты могут быть использованы в диагностическом профилактическом и/или диетическом лечебном питания взрослых и детей старше одного года и показаны при ряде «состояний»:

- ограничения в приеме твердой пищи в посттравматический, послеоперационный периоды;
- неполная проходимость пищевода, желудка и тонкой кишки;
- переломы челюстей;
- выраженный катаболизм;
- истощение;
- саркопения;
- кахексия (тяжелая и сочетанная травма, при обширных и глубоких ожогах, длительных и тяжело протекающих инфекциях, в том числе сепсис, онкологические заболевания, почечная, печеночная, дыхательная или сердечная недостаточность);
- переход от зондового энтерального питания к обычному диетическому питанию [3].

Установлено, что пациенты, получавшие продукты энтерального питания, на 38,8 % реже нуждаются в повторной внеплановой госпитализации в течение 30 дней после выписки [3].

На текущий момент производство отечественных продуктов энтерального питания не обеспечивает

Таблица 1 – Состав концентратов сывороточных белков / Table 1 – Composition of whey protein concentrates

Показатели	Значения для концентрата		
	КСБ-УФ-40	КСБ-УФ-60	КСБ-УФ-80
Массовая доля влаги, %, не более		5,0	
Массовая доля белка в сухом веществе, %, не менее	40,0	60,0	80,0
Массовая доля белка, %, не менее	37,0	57,0	76,0
Массовая доля жира, %, не более	4,5	5,5	8,0
Массовая доля лактозы, %, не более	47,0	28,0	8,0
Массовая доля золы, %, не более	–	4,5	3,0
Активная кислотность, ед. pH	От 5,5 до 6,8 включительно		
Индекс растворимости, см ³ сырого осадка, не более	0,3		
Группа чистоты, не ниже	I		
Энергетическая ценность, кДж/ккал	1705/408	1577/377	1631/390

Из таблицы 1 видно, что при общем содержании сухих веществ более 80 % остальные показатели этих ингредиентов, за исключением группы чистоты и индекса растворимости, отличаются значительно. Особенно большая разница наблюдается в содержании лактозы и, как следствие, в соотношении между белками и углеводами. Поскольку в продуктах для энтерального питания контролируется осмотическая концентрация, и эти продукты содержат целый ряд низкомолекулярных ингредиентов, таких как витамины, минеральные вещества и пр., можно предположить, что по этой причине более предпочтительным будет использование КСБ-УФ-60 и КСБ-УФ-80, в которых концентрация лактозы составляет 28,0 и 8,0 % соответственно. Либо для формирования нужного

потребности государства в них, и на российском рынке представлена преимущественно импортная продукция этого вида [4]. Для достижения показателей продовольственной независимости Российской Федерации требуется увеличить собственное производство специализированной пищевой продукции, к которой относятся и продукты энтерального питания [5, 6].

Согласно требованиям стандарта для производства продуктов энтерального питания, может быть использовано сырье, соответствующее требованиям Технических регламентов Таможенного союза [7, 8, 9, 10] или нормативным правовым актам, действующим на территории государства, принявшего стандарт.

Важнейший макронутриент продуктов энтерального питания – белки.

МЕТОДЫ

Методологической, теоретической и информационно-эмпирической основой исследования служил фонд нормативной и технической документации для разработки продуктов энтерального питания.

Предмет анализа – технологические функции белков молочной сыворотки в составе специализированных пищевых продуктов энтерального питания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Стандартом на продукты энтерального питания разрешено использование ряда пищевых белков, в том числе сухого концентрата сывороточного белка с массовой долей сухих веществ не менее 80 % [1]. Этому требованию соответствует несколько видов сухих концентратов сывороточных белков, получаемых ультрафильтрацией и диафильтрацией с последующей распылительной сушкой. В зависимости от содержания белка выделяют концентрат сывороточных белков с массовой долей белка 80 % (КСБ-УФ-80), 60 % (КСБ-УФ-60) и 40 % (КСБ-УФ-40). Показатели состава и энергетической ценности этих ингредиентов представлены в таблице 1.

содержания белка в продукте энтерального питания, которое должно составлять от 15 до 25 %, необходимо сочетание КСБ-УФ-40 и КСБ-УФ-60 с другими протеиновыми ингредиентами, в которых углеводный компонент отсутствует.

Как к самой специализированной пищевой продукции, так и к ее сырьевым ингредиентам предъявляют более жесткие требования, чем в случае с традиционными пищевыми продуктами. Для производства всех трех видов концентратов сывороточных белков, которые разрешены в изготовлении продуктов энтерального питания, может быть использована только подсырная молочная сыворотка. Причем при выработке сыра недопустимо применять консервирующие агенты в виде нитратов натрия или калия и

молокосвертывающие ферментные препараты и бактериальные закваски, содержащие ГМО [11].

Современные мембранные технологии получения концентратов сывороточных белков практически не вызывают нареканий. Для концентрирования белков молочной сыворотки в настоящее время применяют щадящие режимы обработки с использованием целлюлозных ионообменников и пористых силикагелевых катионо- и анионообменных материалов. Все процессы отработаны так, чтобы после восстановления сухих ингредиентов максимально сохранять нативные функции сывороточных белков. Однако в производстве продуктов энтерального питания ряд технологических этапов может повлиять на физико-химические свойства белков молочной сыворотки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Протеиновый компонент концентратов сывороточных белков представлен преимущественно двумя фракциями: β -лактоглобулином, который составляет 56 % от всей массы сывороточных белков и α -лактальбумином, на долю которого приходится 21 %. Молекулярная масса β -лактоглобулина равна 18 277 г/моль, а α -лактальбумина – 14 175 г/моль. Каждая молекула α -лактальбумина в нативной форме связывает ион Ca^{+2} . Поперечные диаметры β -лактоглобулина и α -лактальбумина составляют соответственно 3,6 и 3,7 нм [12]. Следовательно, в растворенной форме оба белка образуют тонкодисперсную коллоидную систему.

Методами рентгеновской кристаллографии были выяснены трехмерные структуры этих белков. Установлено, что благодаря достаточно равномерному распределению полярных и неполярных участков в молекулах β -лактоглобулина и α -лактальбумина пространственная конфигурация их полипептидных цепей типична для многих глобулярных белков, в которых заряженные аминокислотные радикалы ориентируются на поверхности вокруг гидрофобного ядра. В результате такой организации молекулы этих белков в среде, близкой к нейтральной, имеют суммарный отрицательный заряд, поэтому массовой их ассоциации друг с другом или взаимодействия с другими белками не происходит.

Однако сместь равновесие могут различные факторы, которые являются неизбежными в производстве продуктов энтерального питания. В частности, при обогащении основного сырья функциональными пищевыми ингредиентами, такими как витамины и минеральные вещества, возможно изменение реакции среды и ионной силы раствора.

Например, известно, что состояние β -лактоглобулина зависит от значения pH. При реакции среды, соответствующей свежему молоку, он образует димеры, при pH 3,5–5,2 димеры агрегируют до октамеров. В очень кислой среде при значении pH менее 3,5 и в слабо щелочной среде олигомеры диссоциируют на слегка увеличенные в объеме мономеры (рис. 1).

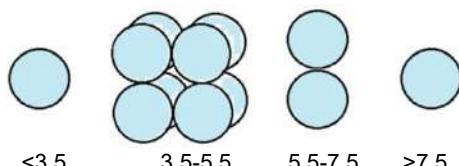


Рисунок 1 – Переход от олигомерных форм β -лактоглобулина к мономерным при разном значении реакции среды в молоке (по А. Терелу)

Figure 1 – Transition from oligomeric forms of β -lactoglobulin to monomeric forms with different values of the reaction medium in milk (according to A. Terpel)

Молекулы α -лактальбумина тоже могут агрегировать и образовывать большие скопления. Происходит это после вытеснения протонами Ca^{+2} из структуры α -лактальбумина при pH ниже 5,0 [12].

В перечне нормируемых физико-химических показателей продуктов энтерального питания нет требований к значению активной кислотности, следовательно, априори неизвестно, в какой из описанных форм, в виде мономеров или агрегированных молекул, будут находиться β -лактоглобулин и α -лактальбумин в жидких продуктах энтерального питания. По этой причине заранее судить об устойчивости системы или склонности к образованию геля невозможно.

Для обеспечения показателей промышленной стерильности в продуктах энтерального питания подготовленные смеси ингредиентов необходимо будет подвергать температурной обработке, а, следовательно, учитывать и термолабильность сывороточных белков.

Повышение температуры ведет к увеличению энтропии и снижению упорядоченности между структурными элементами β -лактоглобулина и α -лактальбумина, но глубина этих перестроек различна. Хотя α -лактальбумин начинает денатурировать при более низкой температуре, его структура восстанавливается после охлаждения, в отличие от β -лактоглобулина, денатурация которого необратима.

Многие технологические свойства сывороточных белков зависят от степени их денатурации. В целом денатурация белка снижает его растворимость. Именно путем термической денатурации получали первый белковый продукт из сыворотки «Лактоальбумин», который представлял собой смесь фракций сывороточных белков, осажденных путем нагревания кислой сыворотки.

Термическая денатурация неблагоприятно влияет на свойства, требующие высокой поверхностной активности. В результате термообработки смеси поверхностная активность β -лактоглобулина и α -лактальбумина может значительно уменьшиться и вести к дестабилизации системы, что крайне нежелательно в готовом продукте энтерального питания.

При исследовании денатурации β -лактоглобулина и α -лактальбумина следует рассматривать не только их водные растворы, но и смеси с другими функциональными ингредиентами, которые согласно рецептуре необходимо вносить в продукты энтерального питания, что значительно усложняет планирование экспериментов. Кроме того, для выявления степени термической денатурации важен методологический подход при исследовании, поскольку с использованием разных методов были получены противоречивые результаты. При изучении термостабильности отдельных фракций сывороточных белков путем определения коллоидной растворимости меньше неденатурированных белков обнаружено во фракции α -лактальбумина, чем во фракции β -лактоглобулина. А при исследовании термоустойчивости сывороточных белков дифференциальной калориметрией большая стабильность выявлена у β -лактоглобулина, чем у α -лактальбумина [12].

Основные изменения при денатурации β -лактоглобулина и α -лактальбумина связаны с высвобождением HS-групп этих белков и разворачиванием их полипептидных цепей. В результате этих перестроек известно об образовании новых дисульфидных связей и образовании комплексов β -лактоглобулина и α -лактальбумина. Еще больший интерес вызывает исследование контактов сывороточных белков с низкомолекулярными миорными ингредиентами, кото-

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ БЕЛКОВ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ В ЭНТЕРАЛЬНОМ ПИТАНИИ

рыми обогащают продукты энтерального питания. Известны публикации об образовании комплексов кверцетина, дигидрокверцетина, галловой кислоты, кемпферола, катехина, фикоцианина и других биологически активных соединений с нефракционированными белками молока, а также с β -лактоглобулином и α -лактальбумином [13, 14, 15, 16]. Высока вероятность того, что протеиновая часть этих комплексов предотвращает небелковый компонент от разрушения при хранении, а возможно и при переваривании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в производстве продуктов энтерального питания гидрофильность белков молочной сыворотки, их поверхностно-активные свойства, термолабильность и способность к межмолекулярным взаимодействиям приобретают значения технологических функций. От способности основных сывороточных белков β -лактоглобулина и α -лактальбумина к гидратации и поглощению воды в созданном продукте энтерального питания будет зависеть не только набухание и растворимость самих белков, но и вязкость, гелеобразование всей системы и диспергируемость в ней других ингредиентов. Поверхностная активность и способность к межмолекулярным контактам β -лактоглобулина и α -лактальбумина могут изменяться как под влиянием добавленных ингредиентов, так и в результате термообработки системы. Возможно, молочные белки будут выполнять функцию носителей минорных ингредиентов, предотвращая их разрушение в технологическом процессе, при хранении продукта и/или улучшая биодоступность в пищеварительном тракте. Следовательно, изучение агрегации, вязкоупругих свойств, способности к эмульгированию и адсорбции сывороточными белками различных низкомолекулярных ингредиентов, а также выяснение других функций белков молочной сыворотки в поликомпонентных системах представляет научный и практический интерес при обосновании технологических параметров производства продуктов энтерального питания.

Материал подготовлен в рамках государственного задания FGMF-2025-0011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. ГОСТ 35004-2023 Продукты пищевые энте-рального питания базовые. М. : ФГБУ «Институт стан-дартизации», 2023. 21 с.
2. Fabbro E.D., Shalini D., Bruera E. Symptom Control in Palliative Care – Part II: Cachexia/Anorexia and Fatigue. *J Palliat Med* 2006; 9(2): 409–421. 25. Cotogni P, Stragliotto S, Ossola M, Collo A, Riso S. The Role of Nutritional Support for Cancer Pa-tients in Palliative Care. *Nutrients*. 2021 Jan 22;13(2):306.
3. Шестопалов А.Е., Дмитриев А.В. Сипинг как вид нутритивно-метаболической поддержки в клинической медицине. Современная Онкология. 2019; 21 (4): 35–44. DOI: 10.26442/18151434.2019.4.190702.
4. Инновации в питании для взрослых: Ежегодное издание с каталогом. Выпуск 1 / Под ред. В.А. Тутельяна, Д.Б. Никитюка, А.В. Погожевой, А.Е. Шестопалова,

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 23 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

Т.С. Поповой. Москва : ООО «Медицинское информационное агентство», 2021. 176 с. : ил.

5. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20.

6. О реализации Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <http://council.gov.ru/activity/documents/139304>. (дата обращения 16.11.2023).

7. Технический регламент Таможенного союза 021/2011 «О безопасности пищевой продукции». Утвержден решением Комиссии Таможенного союза № 880 от 9 декабря 2011 г.

8. Технический регламент Таможенного союза 024/2011 «Технический регламент на масложировую продукцию». Утвержден решением Комиссии Таможенного союза № 883 от 9 декабря 2011 г.

9. Технический регламент Таможенного союза ТРТС027/2012 «О безопасности отдельных видов специализированной пищевой продукции, в том числе диетического лечебного и диетического профилактического питания». Принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии № 34 от 15 июня 2012 г.

10. Технический регламент Таможенного союза 029/2011 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств». Утвержден решением Комиссии Таможенного союза № 58 от 20 июля 2012 г.

11. ГОСТ Р 53456-2022 Концентраты сывороточных белков сухие. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2022. 12 с.

12. Тепел А. Химия и физика молока / А. Тепел. Пер. с нем. под ред. канд. техн. наук, доц. С.А. Фильчаковой. СПб. : Профессия, 2012. 832 с., табл., ил.

13. Гурский И.А., Творогова А.А. Влияние концентратов и микропартикулятов сывороточных белков на физико-химические показатели кисломолочного мороженого // Ползуновский вестник. 2024. № 1, С. 50–56. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.007. EDN: <https://elibrary.ru/RPZCMV>.

14. Characterization of flavonoid-protein interactions using fluorescence spectroscopy: Binding of pelargonidin to dairy proteins / Arroyo-Maya, Campos-Terán, Hernández-Arana, McClements / *Food Chem.* 2016, V. 6, p. 105.

15. Novokshanova A. [et al.]. The development of food module of high biological value enriched with phycocyanin // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing. 2023. T. 2777. № 1

16. Novokshanova A., Bilyalova A., Aksenov I. Spectrometric study of the interaction of phycocyanins with egg proteins // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2023. T. 463. C. 01021.

Информация об авторах

А. Л. Новокшанова – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «ФИЦ питания и биотехнологии».

Information about the authors

A.L. Novokshanova - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science «Federal Research Center of Nutrition and Biotechnology».



Научная статья

4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)

УДК664.8.03

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.017

EDN: KHTTzs

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ТОМАТОВ И КАБАЧКОВ ЛИПИДНЫМ ПЛЁНКООБРАЗУЮЩИМ РАСТВОРОМ НА ПОТЕРЮ МАССЫ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРИ ХРАНЕНИИ

Татьяна Викторовна Першакова ¹, Григорий Анатольевич Купин ²,
Татьяна Викторовна Яковлева ³, Владимир Николаевич Алёшин ⁴

^{1, 2, 3, 4} «Краснодарский научно-исследовательский институт хранения и переработки сельскохозяйственной продукции» – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия», Краснодар, Россия

¹ 7999997@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8528-0966>

² griga_77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7780-3333>

³ Yakovleva_YY@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8411-8422>

⁴ alyoshinvn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2956-3857>

Аннотация. Весьма важной составной частью рациона питания человека являются овощи. Продлить срок их хранения можно с помощью специальных покрытий, создающих вокруг сырья модифицированную атмосферу. Объектами исследования являлись томаты Адаптор F1 и кабачки Профит F1. В работе была изучена динамика потери их массы и изменение химического состава при хранении в течение двух недель без охлаждения в результате обработки плёнкообразующим составом на основе твёрдых моно- и диглицеридов жирных кислот. Проведённая обработка не имела негативных последствий для внешнего вида томатов, а кабачки лучше сохранили зелёный цвет за время хранения. При этом наблюдалось определённое повышение лёгкости объектов исследования: плоды с защитным липидным покрытием отличались более низкой убылью массы. Так, в зависимости от срока хранения (1 или 2 недели) потери обработанных томатов были на 0,80–1,54 % ниже, чем у контрольных образцов (без обработки), потери обработанных кабачков – на 0,46–0,65 % ниже. Отмечено, что обработанные плоды лучше сохраняли содержание некоторых биологически активных веществ: в томатах полифенольных веществ и витамина С через 2 недели хранения было больше, чем в контроле на 15,8 и 0,8 мг/100 г соответственно; в кабачках содержание витамина С было выше на 0,4 мг/100 г. Установлено, что через 5 суток после обработки томатов плёнкообразующим раствором, содержащим изопропиловый спирт, содержание последнего в плодах остаётся существенным – 369,92 мг/кг. Изучение динамики процесса окисления глицеридов защитного покрытия показало, что через 4 недели хранения на воздухе без доступа света при температуре 20...22 °C перекисное число возросло на 17,8 %, но осталось в допустимых пределах. Данные, полученные в ходе проведения исследования, могут быть использованы при разработке новых способов хранения овощей с использованием биоразлагаемых защитных покрытий.

Ключевые слова: томаты, кабачки, модифицированная атмосфера, биоразлагаемые покрытия, плёнкообразующий раствор, липиды, хранение, потеря массы, химический состав.

Для цитирования: Першакова Т. В., Купин Г. А., Яковлева Т. В., Алёшин В. Н. Влияние обработки томатов и кабачков липидным плёнкообразующим раствором на потерю массы и химический состав при хранении // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 112–120. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.017. EDN: <https://elibrary.ru/KHTTzs>.

Original article

EFFECT OF TREATING TOMATOES AND COURGETTES WITH A LIPID FILM-FORMING SOLUTION ON WEIGHT LOSS AND CHEMICAL COMPOSITION DURING STORAGE

Tatiana V. Pershakova ¹, Grigoriy A. Kupin ², Tatiana V. Yakovleva ³,
Vladimir N. Aleshin ⁴

^{1, 2, 3, 4} «Krasnodar Research Institute of Agricultural Products Storage and Processing» - branch of FSBSI «North-Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viniculture, Winemaking», Krasnodar, Russia

¹ 7999997@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8528-0966>

² griga_77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7780-3333>

³ Yakovleva_YY@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8411-8422>

⁴ alyoshinvn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2956-3857>

© Першакова Т. В., Купин Г. А., Яковлева Т. В., Алёшин В. Н., 2025

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ТОМАТОВ И КАБАЧКОВ ЛИПИДНЫМ ПЛЁНКООБРАЗУЮЩИМ РАСТВОРОМ НА ПОТЕРЮ МАССЫ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРИ ХРАНЕНИИ

Abstract. Vegetables are a very important part of the human diet. Their shelf life can be extended by using special coatings that create a modified atmosphere around the raw materials. The objects of the study were tomatoes of the hybrid Adapter F1 and courgettes of the hybrid Profit F1. The work studied the dynamics of their weight loss and the change in chemical composition during storage for two weeks without refrigeration as a result of treatment with a film-forming composition based on solid mono- and diglycerides of fatty acids. It was found that the treatment had no negative consequences for the appearance of tomatoes, and courgettes retained their green color better during storage. Meanwhile, a certain increase in keeping quality of the objects of research was observed: vegetables with a protective lipid coating had a lower weight loss. Thus, depending on the storage period (1 or 2 weeks), the losses of treated tomatoes were 0.80-1.54% lower than those of control samples (without treatment), the losses of treated courgettes were 0.46-0.65% lower. It was also noted that the treated fruits better retained the content of some biologically active substances: in tomatoes there were more polyphenolic substances and vitamin C after 2 weeks of storage than in the control by 15.8 and 0.8 mg/100g, respectively; in zucchini the vitamin C content was higher by 0.4 mg/100g. It was also found that 5 days after treating tomatoes with a film-forming solution containing isopropyl alcohol, the content of the latter in the fruit remains significant - 369.92 mg/kg. A study of the dynamics of the oxidation process of glycerides of the protective coating showed that after 4 weeks of storage in air without access to light at a temperature of 20...22 °C, the peroxide number increased by 17.8%, but remained within acceptable limits. The data obtained during the study can be used to develop new methods of storing vegetables using biodegradable protective coatings.

Keywords: tomatoes, courgettes, modified atmosphere, bio-destructible coatings, film-forming solution, lipids, storage, weight loss, chemical composition.

For citation: Pershakova, T.V., Kupin, G.A., Yakovleva, T.V. & Aleshin, V.N. (2025). Effect of treating tomatoes and courgettes with a lipid film-forming solution on weight loss and chemical composition during storage. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 112-120. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.017. EDN: <https://elibrary.ru/KHTTZS>.

ВВЕДЕНИЕ

Весьма важной составной частью рациона питания человека являются овощи. Статистические данные ФАО свидетельствуют, что производство овощей в мире со временем увеличивается: если в 2002 году сборы основных овощных культур составляли 727,82 млн. т, то в 2022 году – уже 1173,07 млн. т, то есть за 20 лет производство возросло на 61,18 %. Сборы отдельных культур при этом изменились неодинаково, но преимущественно также демонстрировали существенный рост. Так, например, сборы томатов увеличились со 115,96 млн. т в 2002 году до 186,11 млн. т в 2022 (рост на 60,49 %), а сборы тыквы всех видов (включая кабачки) – на 19,60 %: с 19,07 до 22,81 млн. т [1].

Увеличение производства овощей в мире является естественным следствием увеличения численности и уровня жизни населения, которое начинает в большей степени проявлять интерес к идеям здорового питания [2]. Однако овощи как сырьё отличаются чувствительностью к условиям окружающей среды и сравнительно небольшим сроком хранения. Из-за этого, а также в результате неаккуратного обращения, неправильного упаковывания и хранения, значительная часть собранного урожая приходит в негодность и не используется: потери в постоборочный период могут достигать 20–65 % [3, 4].

С целью сокращения постоборочных потерь может применяться ряд приёмов, основными из которых являются охлаждение, регулирование и модификация атмосферы. Эти приёмы позволяют понизить активность биохимических процессов в растительном сырье, скорость его дозревания и, таким образом, продлить срок хранения. Однако для понижения температуры и регулирования атмосферы в хранилище необходимо использовать специальное оборудование, которое может отсутствовать на этапах транспортировки и реализации. К тому же не все виды растительного сырья могут выдерживать значительное охлаждение (до 0–3 °C). Например, кабач-

ки рекомендуется хранить при температуре от 8 до 10 °C, поскольку более низкие температуры приводят к возникновению физиологических расстройств и ухудшению качества [5].

Более доступным способом сохранения качества фруктов и овощей является хранение в условиях модифицированной атмосферы. При этом растительное сырьё помещают в упаковку различных типов, сконструированную таким образом, что в результате дыхания сырья изменяется газовый состав окружающего его воздуха. Этот способ хранения в том или ином виде используется уже давно, и его реализация на практике может выглядеть по-разному. Например, в Древней Греции фрукты и овощи хранили в закрытых глиняных контейнерах, а в средневековом Китае на плоды цитрусовых стали наносить покрытия на основе воска [6, 7].

В последние десятилетия основным способом создания модифицированной атмосферы является использование специальной пластиковой упаковки с микроперфорированными стенками. Такая упаковка служит частично проницаемым барьером для паров воды и различных газов, поэтому после размещения в ней растительного сырья происходит увеличение концентрации CO₂ и снижение O₂, относительная влажность воздуха повышается. Всё это приводит к снижению интенсивности дыхания и других биохимических процессов, связанных с дозреванием и старением фруктов и овощей, в результате чего дольше сохраняется их качество, сокращается потеря массы, подавляется развитие вызывающих порчу микроорганизмов. К сожалению, зачастую материалы, из которых изготавливается подобная упаковка, используются небиоразлагаемые, что является существенным недостатком, поскольку расширяющееся применение таких материалов может нанести серьёзный вред окружающей среде [8].

Сократить количество образующегося пластикового мусора можно, если вместо долговечных синтетических полимеров использовать для изготовления упаковочных материалов вещества ме-

нее стойкие, натурального происхождения. При этом традиционная упаковка может быть заменена на специальные защитные покрытия, наносимые непосредственно на поверхность фруктов и овощей с помощью плёнкообразующих растворов или эмульсий. Такие покрытия представляют собой тонкий слой каких-то веществ, которые, с одной стороны, обладают барьерными свойствами для газов и паров воды, с другой стороны, имеют нейтральные цвет и запах и не ухудшают качество обработанного сырья. Если покрытия изготовлены из веществ естественного происхождения, таких как полисахариды, липиды или белки, то они будут биоразлагаемыми, безопасными для окружающей среды. А в случае использования компонентов пищевого качества могут даже быть съедобными (не требующими тщательного смывания или удаления кожуры). Помимо основных компонентов в состав покрытий могут входить различные добавки, придающие им дополнительные свойства (например, антимикробные вещества повышают устойчивость к порче, а витамины, минеральные элементы или антиоксиданты – пищевую ценность) [9–11].

По этой причине всё больше исследователей в мире уделяют внимание в последние годы именно этому перспективному направлению – изучению эффективности новых составов покрытий для растительного сырья. Например, в работе [12] была изучена эффективность полисахаридного покрытия на основе хитозана и пуллулана с добавлением экстракта из кожуры граната при хранении томатов при 23 и 4 °C. Было установлено, что разработанное покрытие улучшало качество объектов хранения, в том числе сокращало потерю массы. В итоге срок хранения томатов удалось продлить на 9 дней. В работе [13] для создания покрытия использовали рыбный желатин с добавлением масла асай в качестве антиоксиданта и антимикробного компонента. Разработанное покрытие позволило снизить потерю массы томатов на 8 % и лучше сохранить твёрдость плодов, замедлив их созревание. А в работе [14] для защиты томатов было создано съедобное покрытие, основным компонентом которого являлся пектин, полученный из какао веллы. Обработанные томаты лучше сохраняли физико-химические показатели качества при хранении и имели наименьшие уровни микробиальной обсемённости.

В работе [15] была изучена возможность повысить качество кабачков типа цукини при помощи различных полисахаридных съедобных покрытий во время холодильного хранения. Как основу для покрытий использовали карбоксиметилцеллюлозу, хитозан, декстрин или крахмал. Наиболее эффективным оказался декстрин с добавлением глицерина в качестве пластификатора. Было установлено, что декстриновые покрытия сокращают потерю массы, повреждения от низкой температуры и окислительный стресс в цукини при хранении. В последующих экспериментах изучали также добавление в состав покрытия оливкового масла и олеуореина, что позволило дополнительно повысить устойчивость к переохлаждению.

В работе [16] было изучено влияние покры-

тий на основе пчелиного воска, масла из семян ши и крахмала из маниока на физико-химические показатели томатов при хранении при 20 °C в течение 20 дней. Было установлено, что пчелиный воск в наибольшей степени способствовал сохранению органолептических показателей, замедлял созревание и снижал потерю массы.

Впрочем, для того чтобы покрытия для свежего растительного сырья в будущем начали широко применяться, необходимо принятие этой технологии со стороны потребителей. Ряд исследователей занимаются изучением этого вопроса. Например, в работе [17] было установлено, что негативное отношение некоторых потребителей к покрытиям является следствием неосведомлённости о составе покрытий и их назначении. И проведение образовательной информационной кампании позволяет значительно повысить принятие данной технологии.

Таким образом, изучение эффективности покрытий различных типов и составов при хранении различных видов свежего растительного сырья является актуальным.

Целью работы являлось изучение динамики потери массы томатов гибрида Адаптор F1 и кабачков гибрида Профит F1, а также их химического состава при хранении в течение двух недель без охлаждения в результате обработки плёнкообразующим составом на основе твёрдых моно- и диглицеридов жирных кислот.

МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись томаты гибрида Адаптор F1 (красная степень зрелости) и кабачки гибрида Профит F1, приобретённые на рынке города Краснодар. Использовали здоровые экземпляры без микробиологической порчи, томаты не имели механических повреждений, на кабачках присутствовали мелкие механические повреждения.

Плёнкообразующий состав для обработки растительного сырья состоял из твёрдых моно- и диглицеридов жирных кислот (пищевая добавка Е471) в концентрации 0,05 %, растворённых при нагревании в 35 %-ном изопропиловом спирте.

Обработку объектов исследования проводили следующим образом:

- образец 1 (рабочий раствор – как указано выше);
- образец 2 (35 %-ный раствор изопропилового спирта);
- образец 3 (дистиллированная вода) – только для томатов;
- контроль (без обработки).

Во время обработки овощи полностью погружали в рабочий раствор на 3–4 секунды (расход рабочего раствора – 4,5...5,5 г на 1 кг сырья) при температуре 25±3 °C, после чего давали им высохнуть на воздухе.

Последующее хранение осуществляли в провоцирующих условиях – без охлаждения («на полке»). При этом температура воздуха составляла 27±2 °C, а относительная влажность воздуха – 30±3 %. Для определения динамики потери массы объекты исследования периодически взвешивали.

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ТОМАТОВ И КАБАЧКОВ ЛИПИДНЫМ ПЛЁНКООБРАЗУЮЩИМ РАСТВОРОМ НА ПОТЕРЮ МАССЫ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРИ ХРАНЕНИИ

Также определяли следующие показатели: массовая доля титруемых кислот – по ГОСТ ISO 750-2013, общих сахаров – фотоколориметрическим методом по ГОСТ 8756.13-87, витамина С – титриметрическим методом по ГОСТ 24556-89, ликопина – спектрофотометрическим методом [18], фенольных веществ – колометрическим методом с использованием реактива Фолина-Дениса [19], каротина – по ГОСТ ISO 6558-2-2019 (метод А).

Также было изучено остаточное содержание изопропилового спирта в томатах с использованием газового хроматографа Кристаллюкс-4000М. С этой целью томаты были обработаны плёнкообразующим раствором, как указано выше, после чего хранились без охлаждения в течение 5 суток. Затем проба от четырёх плодов массой 10 г была растёрта со 100 мл дистиллированной воды и подвергнута перегонке. Полученные 80 мл раствора были использованы для анализа. При этом были изучены три группы объектов:

- образец 4 (с нанесённым защитным покрытием);
- образец 5 (с удалённым защитным покрытием – томаты вымыты с мылом в проточной воде);
- контроль (без обработки).

Чтобы изучить, как развивается окислительная порча глицеридов покрытия, определяли перекисное число в соответствии с ГОСТ Р 51487-99 (с применением хлороформа). При этом 10 г глицеридов были растворены при нагревании в водно-спиртовом растворе и после осаждения в выпарной чашке измельчены и высушены, хранение осуществляли в тонком слое на воздухе без доступа света в течение 4 недель при температуре 20...22 °C.

Повторность проведения исследований – трёхкратная. Для обработки полученных данных применяли программы Microsoft Excel и Statistica с использованием однофакторного дисперсионного анализа (= 95 %).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1) Влияние обработки томатов плёнкообразующим составом на потерю массы и химический состав при хранении.

При нанесении на поверхность растительного сырья защитных покрытий необходимо учитывать, как это сказывается на внешнем виде: через 1 день обработанные и необработанные томаты выглядели практически одинаково (поверхность была сухой и чистой), заметные отличия отсутствовали.

Что касается микробиологической порчи, то во время хранения поражения томатов микробиологической порчей отмечено не было. На некоторых экземплярах наблюдалось потемнение в районе места прикрепления плодоножки, но дальнейшего развития этот процесс не получал, внутреннее поражение также отсутствовало.

Объекты исследования, подвергнутые различным вариантам обработки, а также контроль (без обработки) не имели принципиальных отличий во внешнем виде по окончании хранения. Но была отмечена существенная разница между экземплярами томатов внутри этих групп, что хорошо видно в степени сморщивания поверхности. Наиболее вероятно, что это связано с неодинако-

вой степенью зрелости отдельных плодов: менее зрелые обладают большей лёгкостью и начинают активно сморщиваться позже. Хотя при закладке на хранение все томаты выглядели одинаково (равномерная светло-красная окраска), то есть речь идёт о такой разнице в степени зрелости, которую нельзя зафиксировать визуально (без использования специальных технических средств).

На рисунке 1 представлены данные о потере массы томатами во время хранения в зависимости от вида обработки.

Из приведённых данных следует, что наименьшая убыль массы наблюдалась у томатов, обработанных плёнкообразующим раствором («Образец 1»): их средняя убыль массы в день за 2 недели хранения составила 0,75 %, в то время как для экземпляров «Образец 2» этот показатель составил 1,02 %, а «Образец 3» – 0,91 %. Экземпляры без обработки (контроль) теряли массу со скоростью 0,86 % в сутки.

Таким образом, как в процессе, так и по окончании хранения томаты «Образец 1» имели убыль массы ниже, чем контрольная группа, что свидетельствует об эффективности действия применённого плёнкообразующего раствора. При этом обработка одним лишь водно-спиртовым раствором, напротив, привела к интенсификации процесса потери массы («Образец 2»). Этот факт подтверждает, что компонентом плёнкообразующего раствора, позитивно влияющим на лёгкость томатов, являются именно липиды (моно- и диглицериды жирных кислот).

Также следует заметить, что наблюдаемая эффективность действия защитного липидного покрытия непостоянна и со временем увеличивается. На рисунке 7 представлена разница в убытках массы объектов исследования между вариантом обработки «Образец 1» и контролем. Видно, что через 1 неделю хранения эта разница составляет 0,8 %. Но через 2 недели – уже 1,54 %. Можно предположить, что если бы хранение продолжалось и далее, то эффективность действия защитного покрытия также бы возросла.

На рисунке 2 представлены данные об изменении химического состава томатов при хранении в зависимости от варианта обработки.

Из полученных данных следует, что в результате хранения в томатах происходит снижение содержания полифенольных веществ и витамина С. При этом в «Образце 1» эти показатели через 2 недели хранения были выше, чем в контроле на 15,8 и 0,8 мг/100 г соответственно. Содержание общих сахаров и ликопина в томатах при хранении увеличилось, что, видимо, связано с процессами послеуборочного дозревания и старения. Разница между вариантами обработки при этом была выражена не ярко.

Для растворения моно- и диглицеридов жирных кислот использовали водно-спиртовой раствор, содержащий изопропиловый спирт. Он испаряется при высыхании, но какая-то его часть могла оставаться под покрытием или проникнуть в плоды. По этой причине представляло интерес изучить содержание изопропилового спирта в объектах исследования (таблица 1).

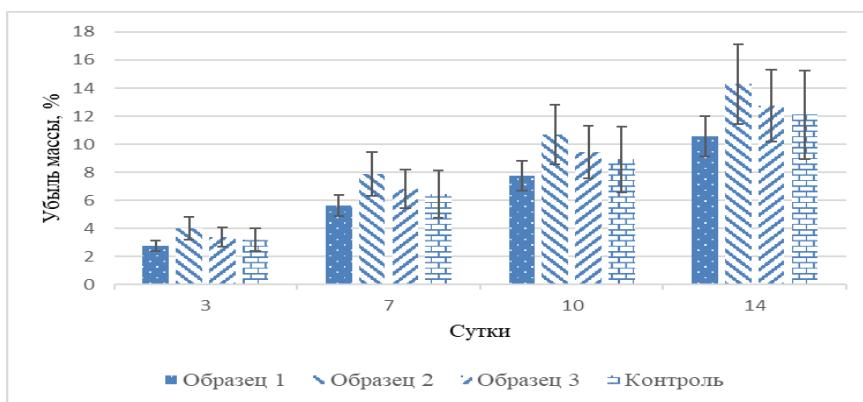


Рисунок 1 – Убыль массы томатов / Figure 1 – Decrease in tomato mass

Таблица 1 – Наличие изопропилового спирта в томатах через 5 суток хранения

Table 1 – The presence of isopropyl alcohol in tomatoes after 5 days of storage

Концентрация	Образец 4	Образец 5	Контроль
мг/кг	369,92	231,76	28,08

Было установлено, что содержание изопропилового спирта в томатах после обработки плёнкообразующим раствором через 5 суток хранения остаётся существенным. Но необходимо заметить, что применение именно изопропилового спирта для растворения глицеридов не является обязательным. Могут быть использованы и другие, менее токсичные растворители, например, этанол (пусть и в более высокой концентрации), но это – тема для дальнейших исследований.

2) Влияние обработки кабачков плёнкообразующим составом на потерю массы и химический состав при хранении.

Обработка практически не оказала влияния на внешний вид плодов: через 1 день разница была незначительна и сводилась к тому, что обработанные экземпляры выглядели несколько более блестящими.

Несмотря на то, что были использованы плоды с мелкими механическими повреждениями, в ходе проведения исследования поражения кабачков микробиологической порчей отмечено не было.

На рисунках 3–5 показаны объекты исследования через 2 недели хранения.

Из приведённых фотографий видно, что объекты, обработанные плёнкообразующим раствором («Образец 1»), лучше сохранили зелёный цвет, чем «Образец 2» и контроль.

На рисунке 6 представлены данные о потере массы кабачками при хранении в зависимости от вида обработки.

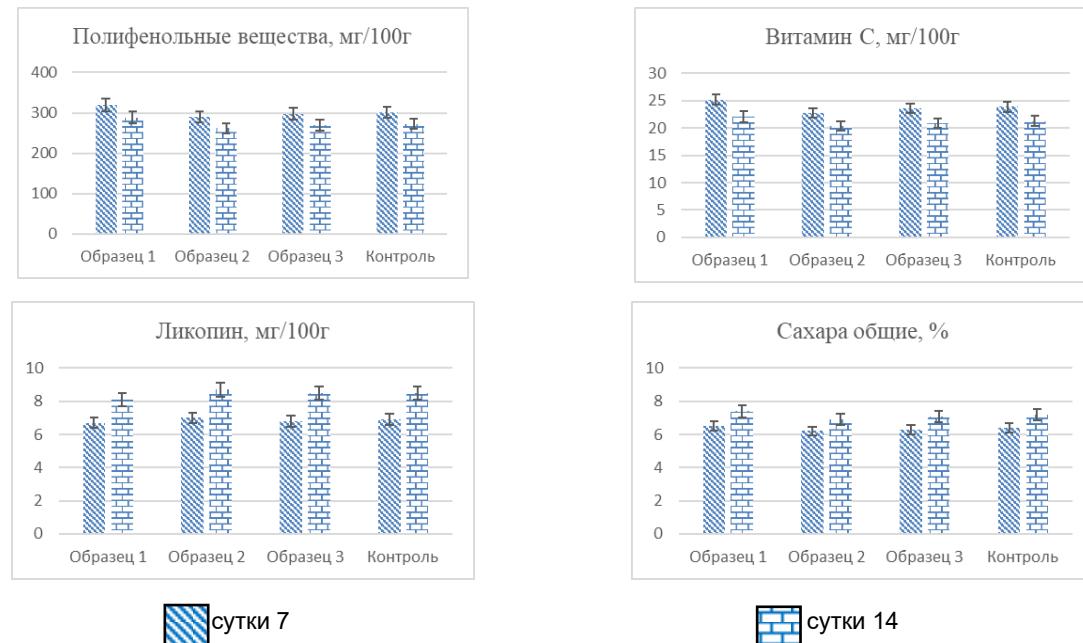


Рисунок 2 – Изменение химического состава томатов при хранении

Figure 2 – Changes in the chemical composition of tomatoes during storage

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ТОМАТОВ И КАБАЧКОВ ЛИПИДНЫМ ПЛЁНКООБРАЗУЮЩИМ РАСТВОРОМ НА ПОТЕРЮ МАССЫ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРИ ХРАНЕНИИ

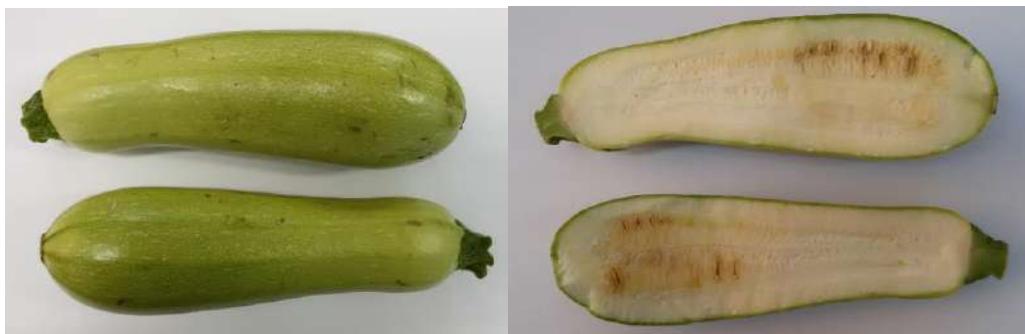


Рисунок 3 – Кабачки «Образец 1» через 2 недели хранения

Figure 3 – Zucchini "Sample 1" after 2 weeks of storage



Рисунок 4 – Кабачки «Образец 2» через 2 недели хранения

Figure 4 – Zucchini "Sample 2" after 2 weeks of storage

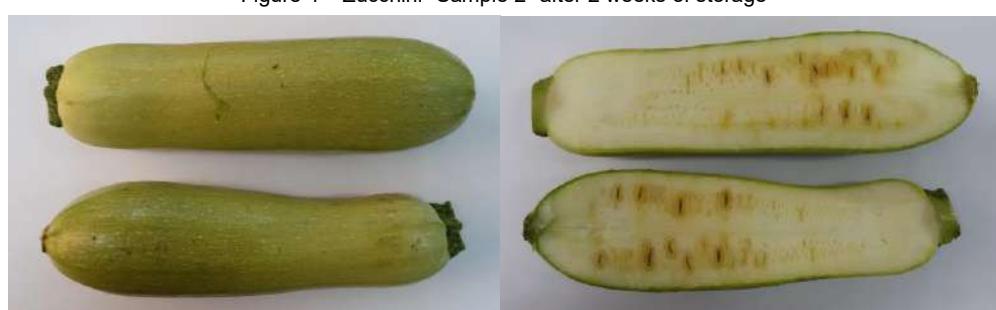


Рисунок 5 – Кабачки «Контроль» через 2 недели хранения

Figure 5 – Zucchini "Control" after 2 weeks of storage

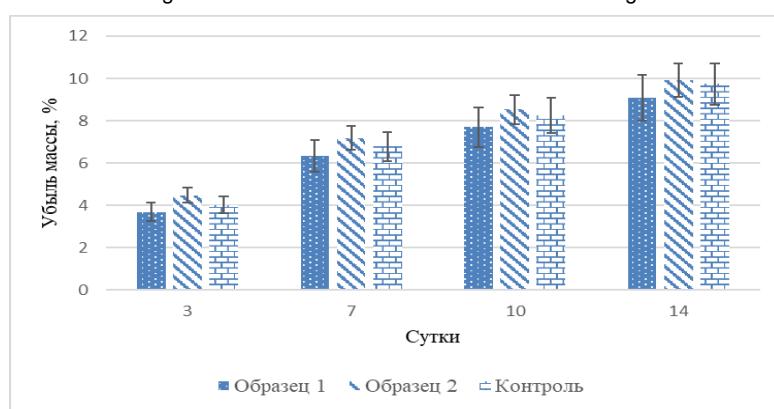


Рисунок 6 – Убыль массы кабачков / Figure 6 – Decrease in the mass of zucchini

Из полученных данных следует, что кабачки, обработанные плёнкообразующим раствором («Образец 1»), имели самую низкую убыль массы: в среднем за 2 недели хранения она составила 0,65 % в день; в то время как экземпляры «Образец 2» и «Контроль» теряли 0,71 и 0,70 % соответственно.

Как и в случае с томатами, защитное липидное покрытие позитивно сказывалось на лёгкости кабачков в течение всего периода хранения, и эффективность его действия со временем возрастала, хотя и менее активно, чем у томатов: через 1 неделю хранения экземпляры «Образец 1» имели убыль массы на

0,46 % ниже, чем «Контроль», через 2 недели – на 0,65 % ниже (рисунок 7).

На рисунке 8 представлены данные об изменении химического состава кабачков при хранении в зависимости от варианта обработки.

Установлено, что в результате хранения без охлаждения в кабачках происходит существенное снижение содержания витамина С, при этом экземпляры «Образец 1» превосходили по данному показателю экземпляры «Образец 2» и «Контроль» на 0,8 и 0,4 мг/100 г соответственно. Содержание общих сахаров и титруемая кислотность также несколько снизились, но менее значительно и без выраженной разницы между вариантами обработки.

Следует заметить, что идеей, на которой основывается создание технологий обработки растительного сырья с помощью различных покрытий (особенно липидных), является копирование природного защитного механизма фруктов и овощей – образования на их поверхности воскового налёта [20].

Восковой налёт защищает фрукты и овощи от неблагоприятных внешних воздействий, и логично предположить, что усилить эту природную защиту можно за счёт дополнительного нанесения некоторых веществ (в том числе липидов) на поверхность объектов хранения.

Результаты, схожие с полученными в этом исследовании, были продемонстрированы, например, в работе [16], в которой было установлено, что образцы томатов с покрытием из пчелиного воска потеряли около 9 %

массы через 10 дней хранения при 20 °C и около 19 % через 15 дней, в то время как томаты без обработки теряли до 50 % массы за 10 дней. Другие овощные культуры также демонстрируют повышение лёгкости под влиянием защитных покрытий, порой даже более значительное. Так, в работе [21] было установлено, что липидное покрытие, содержащее в качестве основного компонента нейтральные глицериды, эффективно замедляло потерю массы огурцов (8 дней при 20 °C) – сокращение составило от 54 до 68 %.

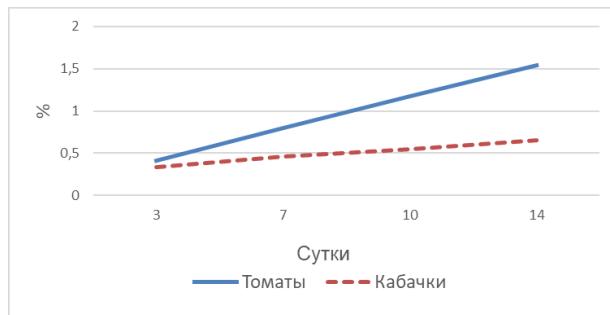


Рисунок 7 – Разница в убытке массы объектов исследования между вариантом обработки «Образец 1» и контролем

Figure 7 – The difference in weight loss of the study objects between the "Sample 1" treatment option and the control

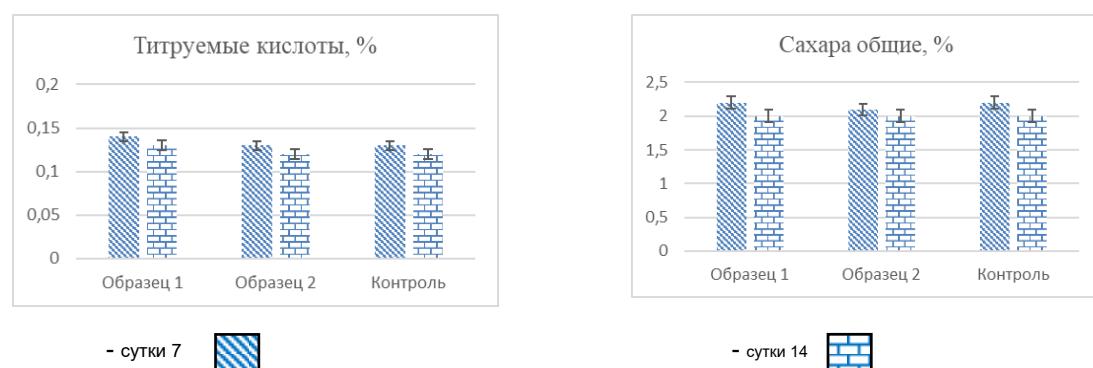
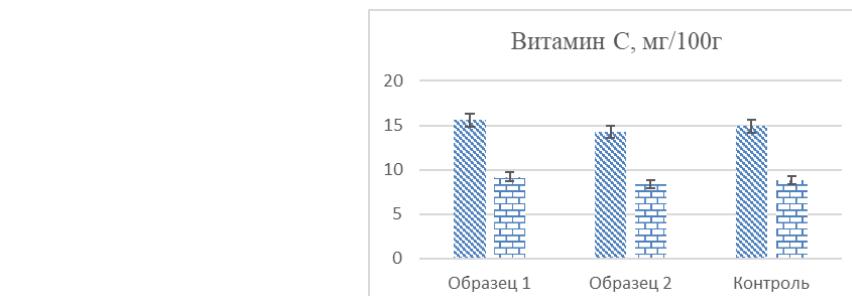


Рисунок 8 – Изменение химического состава кабачков при хранении

Figure 8 – Changes in the chemical composition of squash during storage

3) Окислительная порча глицеридов покрытия.

Жиры подвержены окислительной порче; по этой причине перекисное число – мера количества активного кислорода, химически связанного в 1 кг жира – это контролируемый показатель: согласно ТР ТС 024/2011, в растительных маслах, животных жирах и продуктах их переработки допускается не более 10,0 мэкв активного кислорода/кг (то есть не более 5,0 ммоль/кг). В связи с этим представляло интерес

изучить динамику процесса окисления липидов применяемого защитного покрытия (табл. 2).

Было подтверждено, что глицериды покрытия окисляются со временем: через 4 недели хранения на воздухе без доступа света при температуре 20...22 °C перекисное число возросло на 17,8 %. Тем не менее, итоговое значение этого показателя осталось в допустимых пределах.

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ТОМАТОВ И КАБАЧКОВ ЛИПИДНЫМ ПЛЁНКООБРАЗУЮЩИМ РАСТВОРОМ НА ПОТЕРЮ МАССЫ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРИ ХРАНЕНИИ

Таблица 2 – Развитие окислительной порчи глицеридов защитного покрытия

Table 2 – Development of oxidative spoilage of protective coating glycerides

Перекисное число	Исходное сырье	Глицериды покрытия через 4 недели
ммоль активного кислорода на 1 кг жира	0,90±0,02	1,06±0,03

ВЫВОДЫ

Таким образом, в представленной работе была изучена динамика потери массы и изменение химического состава томатов гибрида Адаптор F1 и кабачков гибрида Профит F1 при хранении в течение двух недель без охлаждения в результате обработки плёнкообразующим составом на основе твёрдых моно- и диглицеридов жирных кислот.

Было установлено, что проведённая обработка не имела негативных последствий для внешнего вида томатов, а кабачки лучше сохранили зелёный цвет за время хранения. При этом наблюдалось определённое повышение лёгкости объектов исследования: плоды с защитным липидным покрытием отличались более низкой убылью массы. Так, в зависимости от срока хранения (1 или 2 недели) потери обработанных томатов были на 0,80–1,54 % ниже, чем у контрольных образцов (без обработки), потери обработанных кабачков – на 0,46–0,65 % ниже. Также было отмечено, что обработанные плоды лучше сохраняли содержание некоторых биологически активных веществ при хранении: в томатах содержание полифенольных веществ и витамина С через 2 недели хранения было выше, чем в контроле на 15,8 и 0,8 мг/100 г соответственно; в кабачках содержание витамина С было выше на 0,4 мг/100 г.

Также было установлено, что через 5 суток после обработки томатов плёнкообразующим раствором, содержащим изопропиловый спирт, содержание последнего в плодах остаётся существенным – 369,92 мг/кг.

Изучение динамики процесса окисления глицеридов защитного покрытия показало, что через 4 недели хранения на воздухе без доступа света при температуре 20...22 °C перекисное число возросло на 17,8 %, но осталось в допустимых пределах.

Данные, полученные в ходе проведения исследования, могут быть использованы при разработке новых способов хранения овощей с использованием биоразлагаемых защитных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. FAOSTAT : официальный сайт. URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (дата обращения 01.02.2024).
2. Разработка рецептур плодово-овощных соусов, обогащенных пряно-ароматическими ингредиентами / Шелковская Н.К., Дейслинг Д.И., Михайлова О.Ю. // Ползуновский вестник. 2021. № 3. С. 35–41. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.005.
3. Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review / Bilal Hassan [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2018. V. 109. pp. 1095–1107. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097.
4. Enhancing the functional and physicochemical properties of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit through polysaccharides edible dipping technique coating under various storage conditions / Ebenezer Asiamah [et al.] // Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre. 2023. V. 30. 100373. DOI: 10.1016/j.bcdf.2023.100373.
5. Повышение устойчивости кабачков, патиссонов и тыквы при хранении : методические рекомендации / Купин Г.А. [и др.]. Краснодар: Издательский Дом – Юг. 2022. 66 с. ISBN: 978-5-98272-142-6.
6. Recent advance in edible coating and its effect on fresh/fresh-cut fruits quality / Bernard Maringgal [et al.] // Trends in Food Science & Technology. 2020. V. 96. pp. 253–267. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.024.
7. Recent Trends in Edible Packaging for Food Applications – Perspective for the Future / Nishant Kumar[et al.] // Food Engineering Reviews. 2023. V. 15. pp. 718–747. DOI: 10.1007/s12393-023-09358-y.
8. Edible coatings and films for shelf-life extension of fruit and vegetables / Shristy Chettri, Neha Sharma, Ashish M. Mohite // Biomaterials Advances. 2023. V. 154. 213632. DOI: 10.1016/j.bioadv.2023.213632.
9. Application of chitosan and other biopolymers based edible coatings containing essential oils as green and innovative strategy for preservation of perishable food products: A review / Anand Kumar Chaudhari [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2023. V. 253. 127688. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.127688.
10. Hydroxypropyl methylcellulose-beeswax edible coatings formulated with antifungal food additives to reduce alternaria black spot and maintain postharvest quality of cold-stored cherry tomatoes / C. Fagundes [et al.] // Scientia Horticulturae. 2015. V. 193. pp. 249–257. DOI: 10.1016/j.scientia.2015.07.027.
11. Oregano (*Lippia graveolens*) essential oil added within pectin edible coatings prevents fungal decay and increases the antioxidant capacity of treated tomatoes / Isela Rodriguez-Garcia [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2016. V. 96. Issue 11. pp. 3772-3778. DOI: 10.1002/jsfa.7568.
12. Improved shelf life and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) by using chitosan-pullulan composite edible coating enriched with pomegranate peel extract / Kumar N. [et al.] // ACS Food Sci Technol. 2021. 1:500–510. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.0c00076.
13. A new edible coating of fish gelatin incorporated into açaí oil to increase the post-harvest shelf life of tomatoes / Ana Caroline Pereira da Silva [et al.] // Food Chemistry. 2024. V. 438. 138047. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.138047.
14. Impact of pectin edible coating extracted from cacao shell powder on postharvest quality attributes of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit during storage / Rawisada Pholsin [et al.] // Food Control. 2024. V. 155. 110023. DOI: 10.1016/j.foodcont.2023.110023.
15. Application of polysaccharide-based edible coatings to improve the quality of zucchini fruit during postharvest cold storage / Castro-Cegri A. [et al.] // Scientia Horticulturae. V. 314. 2023. 111941. DOI: 10.1016/j.scientia.2023.111941.
16. Influence of shea butter, bee wax and cassava starch coatings on enzyme inactivation, antioxidant properties, phenolic compounds and quality retention of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruits / Richard Osae [et al.] // Applied Food Research. 2022. V. 2. Issue 1. 100041. DOI: 10.1016/j.afres.2022.100041.
17. Consumer acceptance of edible coatings on apples: The role of food technology neophobia and information about purpose / Tamara Bucher [et al.] // Food Quality and Preference. 2023. V. 112. 105024. DOI: 10.1016/j.foodqual.2023.105024.
18. Методы биохимического исследования растений. Определение содержания ликопинов спектрофотометрическим методом / Ермаков А.И., Арасимович В.В., Смирнова М.И. : Колос, 1972. 157 с.
19. Метод определения суммарного содержания фенольных соединений в растительных экстрактах с реагентом Фолина-Дениса и реагентом Фолина-Чокальтеу: модификация и сравнение / Николаева Т.Н., Лапшин П.В., Загоскина Н.В. // Химия растительного сырья. 2021. № 2. С. 291–299. DOI: 10.14258/jcprm.2021028250.
20. The role of cuticle in fruit shelf-life / Rafael Fernández-Muñoz, Antonio Heredia, Eva Domínguez // Current Opinion in Biotechnology. 2022. V. 78. 102802. DOI: 10.1016/j.copbio.2022.102802.

21. Investigation on the potential of applying bio-based edible coatings for horticultural products exemplified with cucumbers / Rux G. [et al.] // Current Research in Food Science. 2023. V. 6. 100407. DOI: 10.1016/J.CRFS.2022.100407.

Информация об авторах

Т. В. Першакова – *доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела хранения и комплексной переработки сельскохозяйственного сырья КНИИХП – филиала ФГБНУ СКФНЦСВВ;*

Г. А. Купин – *кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела хранения и комплексной переработки сельскохозяйственного сырья КНИИХП – филиала ФГБНУ СКФНЦСВВ.*

Т. В. Яковлева – *кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела хранения и комплексной переработки сельскохозяйственного сырья КНИИХП – филиала ФГБНУ СКФНЦСВВ.*

В. Н. Алёшин – *кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела хранения и комплексной переработки сельскохозяйственного сырья КНИИХП – филиала ФГБНУ СКФНЦСВВ.*

REFERENCES

1. FAOSTAT : official website. URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.
2. Shelkovskaya, N.K., Deisling, D.I., Mikhailova, O.Yu. (2021). Development of fruit and vegetable sauce recipes enriched with spicy-aromatic ingredients. *Polzunovskij vestnik*, (3), 35-41. (In Russ.). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.03.005.
3. Hassan, B. [et al.]. (2018). Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, (109), 1095-1107. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097.
4. Asiamah, E. [et al.]. (2023). Enhancing the functional and physicochemical properties of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit through polysaccharides edible dipping technique coating under various storage conditions. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, (30), 100373. DOI: 10.1016/j.bcdf.2023.100373.
5. Kupin, G.A. [et al.]. *Increasing the stability of courgettes, squash and pumpkin during storage: guidelines*. Krasnodar: Izdatel'skiy Dom - Yug, 2022. 66 p. (In Russ.). ISBN: 978-5-98272-142-6.
6. Maringgal, B. [et al.]. (2020). Recent advance in edible coating and its effect on fresh/fresh-cut fruits quality. *Trends in Food Science & Technology*, (96), 253-267. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.024.
7. Kumar, N. [et al.]. (2023). Recent Trends in Edible Packaging for Food Applications - Perspective for the Future. *Food Engineering Reviews*, (15), 718-747. DOI: 10.1007/s12393-023-09358-y.
8. Chettri, S., Sharma, N., Mohite, A.M. (2023). Edible coatings and films for shelf-life extension of fruit and vegetables. *Biomaterials Advances*, (154), 213632. DOI: 10.1016/j.bioadv.2023.213632.
9. Chaudhari, A.K. [et al.]. (2023). Application of chitosan and other biopolymers based edible coatings containing essential oils as green and innovative strategy for preservation of perishable food products: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, (253), 127688. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.127688.
10. Fagundes, C. [et al.]. (2015). Hydroxypropyl methylcellulose-beeswax edible coatings formulated with antifungal food additives to reduce *Alternaria* black spot and maintain postharvest quality of cold-stored cherry tomatoes. *Scientia Horticulturae*, (193), 249-257. DOI: 10.1016/j.scientia.2015.07.027.
11. Rodriguez-Garcia, I. [et al.]. (2016). Oregano (*Lippia graveolens*) essential oil added within pectin edible coatings prevents fungal decay and increases the antioxidant capacity of treated tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, (96, issue 11), 3772-3778. DOI: 10.1002/jsfa.7568.
12. Kumar, N. [et al.]. (2021). Improved shelf life and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) by using chitosan-pullulan composite edible coating enriched with pomegranate peel extract. *ACS Food Sci Technol*, (1), 500-510. DOI: 10.1021/acsfoodsctech.0c00076.
13. da Silva, A.C.P. [et al.]. (2024). A new edible coating of fish gelatin incorporated into açaí oil to increase the post-harvest shelf life of tomatoes. *Food Chemistry*, (438), 138047. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.138047.
14. Pholsin, R. [et al.]. (2024). Impact of pectin edible coating extracted from cacao shell powder on postharvest quality attributes of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit during storage. *Food Control*, (155), 110023. DOI: 10.1016/j.foodcont.2023.110023.
15. Castro-Cegri, A. [et al.]. (2023). Application of polysaccharide-based edible coatings to improve the quality of zucchini fruit during postharvest cold storage. *Scientia Horticulturae*, (314), 111941. DOI: 10.1016/j.scientia.2023.111941.
16. Osae, R. [et al.]. (2022). Influence of shea butter, bee wax and cassava starch coatings on enzyme inactivation, antioxidant properties, phenolic compounds and quality retention of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruits. *Applied Food Research*, (2, issue 1), 100041. DOI: 10.1016/j.afres.2022.100041.
17. Bucher, T. [et al.]. (2023). Consumer acceptance of edible coatings on apples: The role of food technology neophobia and information about purpose. *Food Quality and Preference*, (112), 105024. DOI: 10.1016/j.foodqual.2023.105024.
18. Ermakov, A.I., Arasimovich, V.V., Smirnova, M.I. (1972). *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rastenij. Opredelenie soderzhanija likopinov spektrofotometricheskim metodom*. L. : Kolos. 157 p. (In Russ.).
19. Nikolaeva, T.N., Lapshin, P.V., Zagorsina, N.V. (2021). Method for determining the total content of phenolic compounds in plant extracts with Folin-Denis reagent and Folin-Chocalteu reagent: modification and comparison. *Khimija Rastitel'nogo Syrja*, (2), 291-299. (In Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021028250.
20. Fernández-Muñoz, R., Heredia, A., Domínguez, E. (2022). The role of cuticle in fruit shelf-life. *Current Opinion in Biotechnology*, (78), 102802. DOI: 10.1016/j.copbio.2022.102802.
21. Rux, G. [et al.]. (2023). Investigation on the potential of applying bio-based edible coatings for horticultural products exemplified with cucumbers. *Current Research in Food Science*, (6), 100407. DOI: 10.1016/J.CRFS.2022.100407.

Information about the authors

T.V. Pershakova - *Doctor of Technical Sciences, docent, leading researcher, Department of storage and complex processing of agricultural raw materials, KRIAPSP - branch of FSBSI NCF SCHVW.*

G.A. Kupin - *Candidate of Technical Sciences, senior researcher, Department of storage and complex processing of agricultural raw materials, KRIAPSP - branch of FSBSI NCF SCHVW;*

T.V. Yakovleva - *Candidate of Technical Sciences, docent, senior researcher, Department of storage and complex processing of agri-cultural raw materials, KRIAPSP - branch of FSBSI NCF SCHVW.*

V.N. Aleshin - *Candidate of Technical Sciences, senior researcher, Department of storage and complex processing of agricultural raw materials, KRIAPSP - branch of FSBSI NCF SCHVW.*

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

Статья поступила в редакцию 23 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 23 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья

4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)

УДК 637.3

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.018

EDN: KVQFDF

БЕТУЛИН – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИНГРЕДИЕНТ ДЛЯ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ольга Николаевна Мусина ¹, Дарья Андреевна Усатюк ²,
Нина Ивановна Бондаренко ³

¹ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Россия,

^{2,3} ФГБНУ «Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий», г. Барнаул, Россия,

¹ musinaolga@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>

² d_usatyuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7852-1680>

³ bni-22@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9045-6834>

Аннотация. При хранении молока жировая фаза первой претерпевает нежелательные изменения в результате разрушения мембран жировых шариков. Предложено использовать бетулин для замедления этого явления. Бетулин получают из бересты березы, это сырье богато тритерпеноевыми соединениями, которые являются важнейшим классом биологически активных веществ. Изучено влияние бетулина на состояние жира в негомогенизированном цельном молоке: в контроле жировые шарики крупные, неправильной округлой формы, отмечено наличие крупных капель жира, в образцах молока с бетулином преобладают жировые шарики одного размера, с утолщенными стенками, правильной округлой формы. Установлено положительное влияние бетулина на состояние молочного жира: бетулин позволяет получать в молочной смеси правильные жировые шарики с прочной оболочкой без необходимости гомогенизации молока, что способствует лучшей сохранности молочного жира и защите молока от порчи. Исследована динамика активной и титруемой кислотности образцов негомогенизированного молока в процессе их хранения в течение 20 суток при температуре 4 °C. Установлено, что бетулин оказывает достоверное положительное влияние на хранимоспособность образцов. В образцах с бетулином на протяжении всего срока хранения титруемая кислотность ниже, а активная кислотность выше, чем в контроле. Увеличение содержание бетулина в образцах молока имеет при хранении отрицательную корреляцию с их титруемой кислотностью и положительную корреляцию с активной кислотностью. В контрольном образце молока признаки порчи отмечены по истечении 10-ти суток хранения, а в образцах с бетулином – к 20 суткам хранения. Данные по кислотности коррелируют с данными по органолептическим показателям образцов. Бетулин может быть рекомендован для комбинирования с молоком и молочными продуктами, в качестве компонента, который обогащает продукт биологически активными веществами, играет роль эмульгатора и позволяет увеличить срок годности продукции. Бетулин в виде 10-го водного раствора можно вносить в охлажденное молоко, а сухой бетулин рекомендовано вносить при температуре выше 40 °C.

Ключевые слова: молоко, бетулин, тритерпеноевые соединения, жировые шарики, микроструктура, хранимоспособность, активная кислотность, титруемая кислотность.

Для цитирования: Мусина О. Н., Усатюк Д. А., Бондаренко Н. И. Бетулин – перспективный ингредиент для молочной промышленности // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 121–126. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.018. EDN: <https://elibrary.ru/KVQFDF>.

Original article

BETULIN IS A PROMISING INGREDIENT FOR DAIRY INDUSTRY

Olga N. Musina ¹, Daria A. Usatyuk ², Nina I. Bondarenko ³

¹ Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia,

^{2,3} Federal Altai Scientific Center of Agrobiotechnologies, Barnaul, Russia,

¹ musinaolga@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>

² d_usatyuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7852-1680>

³ bni-22@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9045-6834>

Abstract. During milk storage, the fat phase undergoes undesirable changes due to the destruction of the membranes of fat globules, leading to a deterioration in its quality. To slow down this process, it is proposed to use betulin, which is extracted from birch bark. Betulin contains triterpene compounds, a class of biologically active substances that have been shown to have a positive effect on the state of milk fat. In a study, the effect of betulin on fat in inhomogeneous whole milk was investigated. In the con-

© Мусина О. Н., Усатюк Д. А., Бондаренко Н. И., 2025

trol samples, fat globules were large and irregularly rounded. Large fat droplets were also present. In contrast, milk samples treated with betulin contained fat globules that were smaller, with thicker walls and a more regular, rounded shape. The results of the study indicate that betulin has a positive effect on milk fat, allowing for the production of uniform fat globules with strong shells in the milk mix without the need for homogenization. This helps to preserve milk fat better and protect it from spoilage. The study aimed to investigate the dynamics of active and titrated acidity in inhomogeneous milk samples during storage for 20 days at 4 °C. Betulin was found to have a significant positive impact on the shelf life of samples, as samples with betulin had lower recommended acidity and higher active acidity than the control throughout the entire storage period. An increase in betulin content was negatively correlated with titrated acidity but positively correlated with active acidity. Signs of spoilage in the control sample were observed after 10 days, while samples with betulin remained fresh until 20 days. The findings on acidity are consistent with the organoleptic characteristics of the samples. Betulin can be recommended as a combination with milk and dairy products. It serves as a biologically active substance, emulsifier, and helps to extend the shelf life of the products. Betulin, in the form of a 10% aqueous solution, can be added to chilled milk. Dry betulin, on the other hand, is best applied at temperatures above 40°C.

Keywords: milk, milk fat, betulin, triterpene-containing raw materials, combined product, microstructure, experimental samples, storage ability, active acidity.

Forcitation: Musina, O.N., Usatiuk, D.A. & Bondarenko, N.I. (2025). Betulin is a promising ingredient for the dairy industry. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 121-126. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.018. EDN: <https://elibrary.ru/KVQFDF>.

ВВЕДЕНИЕ

Молоко и молочные продукты являются важнейшими продуктами питания, которые употребляют ежедневно, и входят в состав рационов всех категорий населения.

Молоко – многокомпонентная система, в состав которой входят белки, липиды, углеводы и другие компоненты. Самыми крупными и нестойкими в хранении являются липиды молока в виде жировых шариков, наполненных жидким молочным жиром. Мембрана жировых шариков неустойчива к механическим и температурным воздействиям при хранении молока. При длительном и неправильном хранении молока первым претерпевает нежелательные изменения жидкий жир молока в результате разрушения мембран жировых шариков. Жидкий жир подвергается липолизу и окислению.

В отраслевых организациях постоянно ведутся исследования по совершенствованию молочных продуктов, одним из давно и активно используемых направлений является комбинирование сырья, в том числе с растительными ингредиентами [1].

В рамках выполнения научно-исследовательской работы № 0534-2021-0010 «Повышение эффективности переработки молока, создания технологий новых сыров и другой безопасной и качественной ферментированной продукции на основе современных достижений техники, технологии, биохимии и микробиологии» авторским коллективом исследована перспектива создания обогащенных молочных продуктов с повышенной хранимостью за счет комбинирования молочной основы с тритерпенсодержащим сырьем. Сотрудниками лаборатории научно-прикладных и технологических разработок «Сибирского НИИ сыроделия» ФАНЦА в качестве перспективного растительного тритерпенсодержащего ингредиента выбран «Бетулин» по ТУ 10.89.15-003-32227225-2024. Бетулин получают из бересты березы, это сырье богато тритерпеновыми соединениями, которые являются важнейшим классом биологически активных веществ. Бетулин может сыграть роль антиокислителя и эмульгатора, что важно для замедления порчи жиров при хранении молока.

Бетулин является распространенным природным тритерпеном. Обычно его выделяют из бересковой бересты [2]. Береста (внешний слой коры) является рекордсменом среди растительного сырья по содержанию биологически активных тритерпеновых соединений. В составе тритерпенов бересты преобладает бетулин, содержание которого составляет 30–

40 %. Из видов, растущих в России, максимальное содержание бетулина наблюдается в коре берёзы пушистой (*Betula pubescens*) – до 44 %. Бетулин стал объектом тщательного исследования медиков, биологов, фармацевтов почти в 40 странах мира. Интерес к этому веществу в наши дни возрос, поскольку взамен устаревающим и неточным оценкам приходят современные методы физико-химических и фармакологических исследований [3, 4].

Бетулин – это белый (иногда с кремоватым оттенком), не имеющий запаха растворимый в жирах тритерпеновый двухатомный спирт ряда лупана ($C_{30}H_{50}O_2$, бетуленол), который является хорошим эмульгатором и обладает антиоксидантными, антимикробными, противогрибковыми и дезинфицирующими свойствами. Таким образом, бетулин и его производные, например, бетулиновая кислота, проявляют высокую биологическую активность [5], и на их основе разрабатываются новые препараты. Бетулин и бетулиновая кислота представляют интерес для медицины в качестве основы для разработки новых противовирусных агентов. Повышенный интерес к тритерпенам объясняется их широким спектром биологической активности и широкой распространённостью в растительном мире: бетулин обнаружен в хурме, коре орешника, календуле, солодке, почечном чае и во многих других растениях [6]. Установлено, что экстракт бересты не обладает общетоксическим действием, неиммунотоксичен, немутагенен, не обладает репродуктивной токсичностью и аллергезирующими свойствами [7]. Проведенными исследованиями также доказана высокая биологическая активность экстракта [8, 9]. Антиоксидантная активность экстракта бересты связана не только с непосредственным связыванием им активных форм кислорода, но и с регулирующим влиянием на ферменты антиоксидантной защиты самого организма (каталазу, глутатионредуктазу, глутатионпероксидазу). Подобный механизм антиоксидантного действия более эффективен и безопасен.

Бетулин широко используется в фармакологии и фармацевтике, востребован в косметологии, перспективно его использование в пищевой промышленности, поскольку он обогащает продукт биологически активными веществами, обладает ярко выраженным консервирующими свойством и увеличивает стойкость продуктов к окислению, что позволяет увеличить срок их хранения. Также бетулин используется в ветеринарии и в кормовых добавках.

Высокая температура плавления бетулина (240–

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

260 °C), стабильная формула, инертные свойства молекулы, обеспечивают длительные сроки хранения без изменения свойств. Бетулин растворим в органических растворителях, обладает эмульгирующими и структурообразующими свойствами, образует масложировую эмульсию. Такие технологические свойства обуславливают привлекательность бетулина для производителя [10].

Возможность применения бетулина для консервирования молока и молочных продуктов определяется тем, что молоко и молочные продукты являются жировыми эмульсиями, в которых растворяется бетулин, при этом при растворении бетулин образует структуры, аналогичные структурам входящих в состав молока аминокислот, и подобно аминокислотам обладает стабилизирующими свойствами [3].

В настоящее время бетулин включен в список биологически активных добавок к пище, рекомендованных для оптимизации питания и улучшения здоровья населения, уровень потребления которой составляет от 40 до 80 мг/сутки [11–13].

МЕТОДЫ

Все исследования проводились на коровьем молоке, соответствующем требованиям ГОСТ 31449-2013 «Молоко коровье сырое. Технические условия».

В качестве тритерпенсодержащего сырья использован экстракт бересты бересклета «Бетулин» в соответствии с ТУ 10.89.15-003-32227225-2024 от ООО «Сады Алтая Агро». Согласно техническим условиям, «Бетулин» представляет собой комплекс продуктов природного происхождения, преимущественно бетулина и лупинола, а также иных биологически активных веществ, выделенных из бересты бересклета (*Betula*) методом экстракции органическим растворителем с последующей очисткой и сушкой. При производстве экстракта бересты не производится химическая модификация его компонентов. Экстракт бересты предназначен для использования в пищевой промышленности (в качестве сырьевого компонента при производстве биологически активной добавки к пище и обогащения пищевых продуктов), косметической промышленности, ветеринарии, производстве кормов, средствах защиты растений.

Активная кислотность измерялась поверенным pH-метром марки «Testo 206» с погрешностью $\pm 0,2$ pH, номер в Госреестре средств измерений РФ ФГИС АРШИН 30759-05 (компания «Testo», Германия).

Органолептические и физико-химические показатели молока определялись по стандартным методикам. Органолептические показатели оценивались в соответствии с ГОСТ 28283-2015 «Молоко коровье. Метод органолептической оценки вкуса и запаха».

Оценка структуры бетулина и молока проводилась при помощи цифрового микроскопа марки Bresser LCD 50x-2000x (Германия), в котором вместо окуляра используется цифровая камера 5 Мпикс с максимальным разрешением 3264x2448 пикс. Кратность окуляра с монитором составляет 10x. Все исследования проводились с максимальным увеличением (10x), что соответствует увеличению в 100 раз, при этом 1 миллиметр образца соответствовал 100 миллиметрам на ЖК-дисплее.

Статистическая обработка данных проведена с помощью Microsoft Excel (Microsoft Corporation, США). Для количественных переменных результаты представлены в виде среднего арифметического с указанием среднеквадратического отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По литературным данным, бетулин хорошо растворяется в жировых эмульсиях [14]. В связи с этим актуальной является оценка влияния бетулина на молоко, его структуру, и, главным образом, на вид и состояние молочного жира.

Бетулин использован как в виде водного 10%-го раствора, так и в сухом виде. В соответствии с данными патента о способе консервирования молока и молочных продуктов [14] бетулин вводят в молоко или подлежащий консервированию продукт в количестве от $0,8 \cdot 10^{-3}$ г до $3,5 \cdot 10^{-3}$ г на 1 г жировой составляющей молока или молочного продукта. В представленной работе изучена дозировка бетулина, предложенная патентом [14]. Исследуемое молоко-сырье имело следующие физико-химические показатели: массовая доля жира (МДЖ) – 4,37%; массовая доля белка (МДБ) – 3,1%; сухой обезжиренный молочный остаток (СОМО) – 8,48%; плотность – $28,26 \text{ г/см}^3$; активная кислотность – 6,70 ед. pH; титруемая кислотность – 17°Т. В расчетах использована МДЖ 4,37%, что соответствует 4,37 г жира в 100 мл исследуемого молока.

Исследуемое молоко было очищено и пастеризовано при температуре 74–75 °C в течение 20–25 с и охлаждено до температуры хранения 4–6 °C. Кроме того, часть молока была подвергнута гомогенизации. Расчетное количество бетулина в виде раствора и в сухом виде было внесено перед пастеризацией при постоянном помешивании. Бетулин в пересчете на сухое вещество введен в молоко (гомогенизированное и негомогенизированное) в количестве от $0,8 \cdot 10^{-3}$ г до $3,3 \cdot 10^{-3}$ г с шагом $0,5 \cdot 10^{-3}$ г. Исследуемые дозировки бетулина приведены в таблице 1. Объем каждого образца составлял 100 мл.

Таблица 1 – Экспериментальные образцы пастеризованного цельного молока с бетулином

Table 1 – Experimental samples of pasteurized whole milk with betulin

Образец	Количество бетулина в %	Количество бетулина в г на 1 г жира	Количество бетулина в г на 4,37 г жира	Количество 10%-го раствора бетулина, мл
Контроль	0	0	0	0
1	0,003	0,0008	0,003	0,03
2	0,006	0,0013	0,006	0,06
3	0,008	0,0018	0,008	0,08
4	0,010	0,0023	0,010	0,10
5	0,012	0,0028	0,012	0,12
6	0,014	0,0033	0,014	0,14

Структура 10%-го раствора бетулина под микроскопом приведена на рисунке 1. Визуальное представление о микроструктуре растительного компонента необходимо для возможности его обнаружения в комбинированном продукте (молоко с бетулином).

Как видно из рисунка 1, частицы бетулина представляют собой небольшие крупинки разной величины, формы и прозрачности.

На рисунках 2 и 3 представлена типичная микроструктура экспериментальных образцов пастеризованного цельного гомогенизированного и негомогенизированного молока с бетулином и без него. Микроскопирование образцов осуществлялось после их высушивания на предметном стекле.

Анализ микрофотографий (рис. 2, 3), показывает значительную разницу структуры гомогенизированных и негомогенизированных образцов. Именно в образцах, не прошедших процесс гомогенизации, возможно наиболее полно изучить влияние вносимой растительной добавки на структуру компонентов молока, а именно молочного жира.

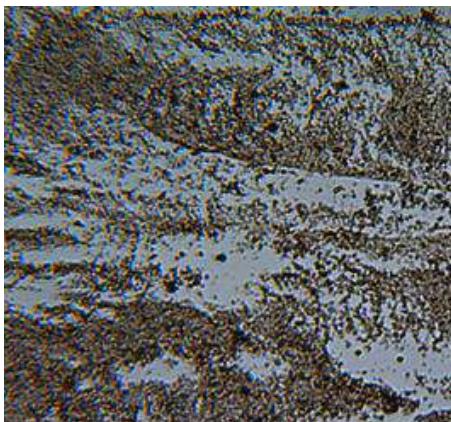
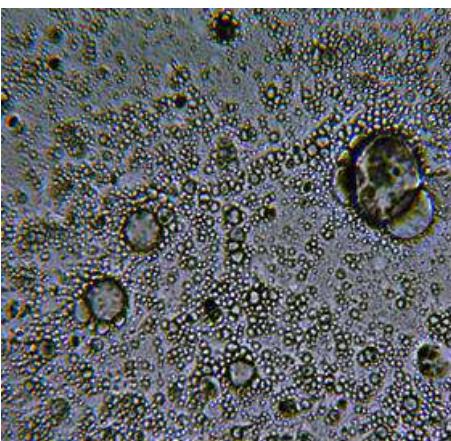
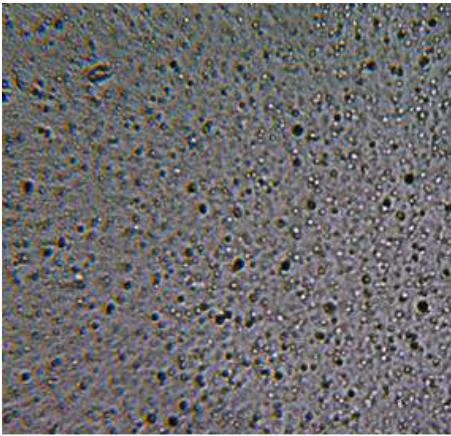


Рисунок 1 – Микроструктура раствора бетулина
Figure 1 – Microstructure of betulin solution



негомогенизированное молоко

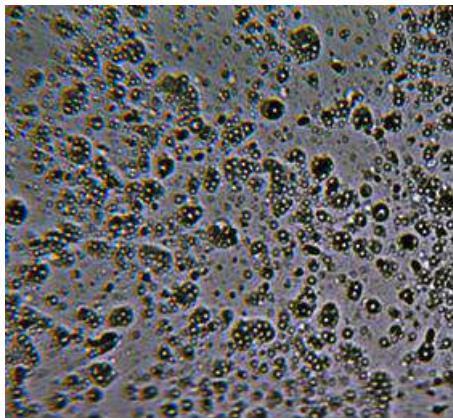


гомогенизированное молоко

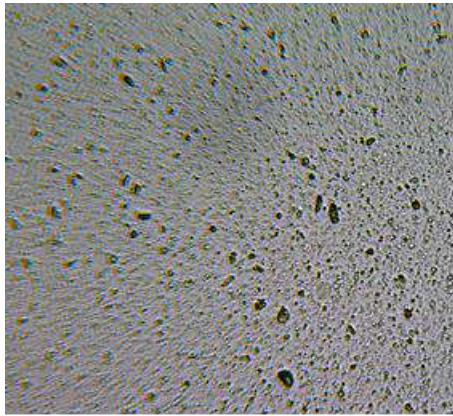
Рисунок 2 – Микроструктура образцов пастеризованного цельного молока без бетулина
Figure 2 – Microstructure of pasteurized whole milk samples without betulin

При изучении структуры негомогенизированных образцов (рис. 2, 3) выявлено значительное влияние бетулина на физическое состояние молочного жира. В контрольном образце без добавления бетулина жировые шарики в основном крупные неправильной округлой формы, а также отмечено наличие крупных капель жира. В образце молока с бетулином основная масса жировых шариков одного размера с утолщенными стенками правильной округлой формы без

крупных жировых капель. Данные по микроскопированию структуры цельного молока с бетулином и без него позволяют сделать вывод о положительном влиянии бетулина на физическое состояние молочного жира, позволяя получать в продукте правильные жировые шарики без осуществления процесса гомогенизации с хорошей прочной оболочкой, что способствует лучшей сохранности жидкого молочного жира и защите его от порчи во время хранения.



негомогенизированное молоко



гомогенизированное молоко

Рисунок 3 – Микроструктура образцов пастеризованного цельного молока с бетулином (0,0018 г бетулина на 1 г жира молока)
Figure 3 – Microstructure of pasteurized whole milk samples with betulin (0.0018 g of betulin per 1 g of milk fat)

Бетулин в виде 10-го водного раствора и в сухом виде одинаково хорошо распределялся в массе продукта. Однако при дальнейшем хранении отмечено незначительное осаждение частиц растительного компонента на дне упаковки, как при использовании водного раствора бетулина, так и при использовании его в сухом виде. Необходимо отметить, что при легком встряхивании упаковки частицы бетулина вновь возвращались в основную массу продукта. Физико-химические показатели продукта как с раствором бетулина, так и с сухим бетулином после его внесения в продукт были одинаковы. Отличием является температура внесения растительной добавки – раствор бетулина возможно вносить в холодное молоко (распределяется хорошо), а сухой бетулин вносить предпочтительно при температуре выше температуры плавления молочного жира, а именно при температуре выше 40 °C, что необходимо для лучшей смачиваемости сухих частиц растительной добавки расплавленным молочным жиром и вовлечением их в структуру продукта.

БЕТУЛИН – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИНГРЕДИЕНТ ДЛЯ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Образцы из негомогенизированного молока были заложены на хранение при температуре 4 °С для изучения их хранимоспособности. В соответствии с ГОСТ 31450-2013 «Молоко питьевое. Технические условия» срок годности питьевого пастеризованного молока с момента окончания технологического процесса устанавливает изготовитель с учетом требований нормативных правовых актов в области безопасности пищевой продукции. В среднем пастеризованное молоко может

Таблица 2 – Активная кислотность экспериментальных образцов пастеризованного негомогенизированного цельного молока с бетулином и контроля в процессе хранения

Table 2 – Active acidity of experimental samples of pasteurized, non-homogenized whole milk with betulin and control sample during storage

Образец	Активная кислотность, ед. pH				
	1-ые сутки	5-ые сутки	10-ые сутки	15-ые сутки	20-ые сутки
Контроль	6,63±0,03	6,65±0,05	6,71±0,02	6,56±0,04	6,49±0,05
1	6,64±0,02	6,71±0,04	6,73±0,05	6,62±0,02	6,55±0,02
2	6,64±0,03	6,73±0,03	6,74±0,04	6,70±0,02	6,58±0,03
3	6,65±0,05	6,75±0,03	6,75±0,05	6,70±0,05	6,61±0,04
4	6,66±0,02	6,75±0,02	6,76±0,07	6,72±0,03	6,62±0,05
5	6,69±0,03	6,80±0,03	6,78±0,02	6,73±0,05	6,63±0,02
6	6,70±0,02	6,83±0,04	6,78±0,05	6,75±0,04	6,66±0,02

Таблица 3 – Титруемая кислотность экспериментальных образцов пастеризованного негомогенизированного цельного молока с бетулином и контроля в процессе хранения

Table 3 – Titrated acidity of experimental samples of pasteurized, non-homogenized whole milk with betulin and control sample during storage

Образец	Титруемая кислотность, °Т				
	1-ые сутки	5-ые сутки	10-ые сутки	15-ые сутки	20-ые сутки
Контроль	21,0±0,9	20,0±0,7	21,5±0,5	23,5±0,7	27,5±0,8
1	21,0±0,4	19,5±0,7	19,5±0,9	21,0±0,3	24,5±0,7
2	20,5±0,5	19,5±0,6	19,0±0,4	20,0±0,8	24,0±0,8
3	20,5±0,7	18,0±0,5	18,5±0,4	20,0±0,8	24,0±0,4
4	20,5±0,5	18,0±0,8	18,5±0,4	20,0±0,5	23,0±0,8
5	19,0±0,4	18,0±0,8	18,0±0,7	19,0±0,5	23,0±0,4
6	19,0±0,6	17,0±0,9	18,0±0,8	19,0±0,7	23,0±0,5

Анализ полученных данных (табл. 2, 3) подтвердил гипотезу о том, что растительная добавка бетулин оказывает достоверное положительное влияние на динамику кислотности экспериментальных образцов в процессе хранения. Динамика изменения кислотности контрольного образца отлична от динамики изменения кислотности образцов с различной дозировкой бетулина. Титруемая кислотность (табл. 3) в образцах с бетулином на протяжении всего хранения меньше, чем в контроле. Причем, чем больше содержание бетулина в образцах по отношению к массовой доле жира молока, тем меньше титруемая кислотность.

На рисунке 4 приведен график зависимости активной кислотности от количества бетулина в образце (номера образцов на рисунке соответствуют номерам образцов таблиц 1, 2 и 3). Приведенный ниже график (рис. 4) наглядно демонстрирует динамику изменения активной кислотности экспериментальных образцов в течение хранения.

Данные графика, представленного на рисунке 4, позволяют сделать вывод о положительном влиянии бетулина на динамику активной кислотности образцов молока во время хранения. Образцы с бетулином характеризуются большим значением активной кислотности по сравнению с контрольным образцом.

После внесения бетулина отмечена тенденция к незначительному повышению pH, что положительно оказывается на дальнейшей хранимоспособности об-

храняться от 5 до 10 суток. Хранимоспособность экспериментальных образцов оценивали по изменению активной и титруемой кислотности, а также контролируя органолептические показатели.

Изучена динамика активной и титруемой кислотности контрольного образца и экспериментальных образцов в течение 20 суток хранения (табл. 2, 3). Активная кислотность вносимого раствора бетулина составляла 7,57 ед. pH.

Table 2 – Active acidity of experimental samples of pasteurized, non-homogenized whole milk with betulin and control sample during storage

Образец	Активная кислотность, ед. pH				
	1-ые сутки	5-ые сутки	10-ые сутки	15-ые сутки	20-ые сутки
Контроль	6,63±0,03	6,65±0,05	6,71±0,02	6,56±0,04	6,49±0,05
1	6,64±0,02	6,71±0,04	6,73±0,05	6,62±0,02	6,55±0,02
2	6,64±0,03	6,73±0,03	6,74±0,04	6,70±0,02	6,58±0,03
3	6,65±0,05	6,75±0,03	6,75±0,05	6,70±0,05	6,61±0,04
4	6,66±0,02	6,75±0,02	6,76±0,07	6,72±0,03	6,62±0,05
5	6,69±0,03	6,80±0,03	6,78±0,02	6,73±0,05	6,63±0,02
6	6,70±0,02	6,83±0,04	6,78±0,05	6,75±0,04	6,66±0,02

разцов. И чем больше доза бетулина в образце, тем выше pH. В контрольном образце по истечении 10 суток хранения активная кислотность резко падала, что свидетельствовало о порче образца. Активная кислотность образцов с бетулином по истечении 15 суток находилась на требуемом уровне, и только по достижении 20 суток появлялись признаки порчи.

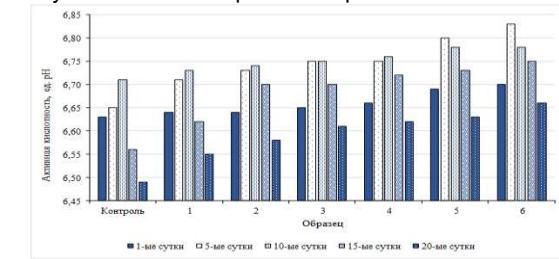


Рисунок 4 – График зависимости активной кислотности экспериментальных образцов пастеризованного негомогенизированного молока с бетулином и без него

Figure 4 – Graph of the dependence of the active acidity of experimental samples of pasteurized non-homogenized milk with and without betulin

Данные по кислотности коррелируют с данными по органолептическим показателям. Контрольный образец по истечении 10 суток хранения характеризовался легкой кислинкой и едва определяемой горечью, что свидетельствует об окончании его срока годности. Образцы с бетулином на протяжении 15 суток хранения отличались чистым молочным вкусом и запахом с легким послевкусием растительного компонента, и только на 20 сутки хранения была отмечена в образцах кислинка без горечи, а консистенция характеризовалась незначительным белковым осадком, что позволяло судить о начале процесса порчи продукта.

Таким образом, экспериментально установлено, что использование бетулина позволяет увеличить хранимоспособность пастеризованного негомогенизированного молока. Благодаря способности бетулина связываться с жировыми шариками молока, бетулин возможно использовать в качестве эмульгатора в молочных продуктах различной жирности. Кроме того, бетулин способствует улучшению органолептических свойств молока, придавая ему легкий привкус и запах бересты, который отлично сочетается с молочным вкусом и запахом.

Принимая во внимание полученные данные, бетулин может быть рекомендован как перспективный растительный компонент для комбинирования с молоком и молочными продуктами.

ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждена перспективность комбинирования тритерпенсодержащего сырья бетулина с цельным негомогенизированным молоком.

Изучено влияние бетулина на состояние жира в цельном негомогенизированном молоке: в контрольном образце жировые шарики крупные, неправильной округлой формы, отмечено наличие крупных капель жира, в образцах молока с бетулином преобладают жировые шарики одного размера, с утолщенными стенками, правильной округлой формы, крупные жировые капли отсутствуют. Установлено положительное влияние бетулина на состояние молочного жира: бетулин позволяет получить в молочной смеси правильные жировые шарики с прочной оболочкой без необходимости гомогенизации молока, что способствует лучшей сохранности молочного жира и защите молока от порчи при хранении.

Исследована динамика активной и титруемой кислотности образцов негомогенизированного молока (контроль и с бетулином) в процессе их хранения в течение 20 суток при температуре 4 °C. Установлено, что бетулин оказывает достоверное положительное влияние на хранимоспособность образцов. Титруемая кислотность в образцах с бетулином на протяжении всего срока хранения меньше, чем в контроле. Активная кислотность в образцах с бетулином на протяжении всего срока хранения больше, чем в контроле. Увеличение содержания бетулина в образцах молока имеет при хранении отрицательную корреляцию с их титруемой кислотностью и положительную корреляцию с их активной кислотностью. В контрольном образце молока признаки порчи отмечены по истечении 10 суток хранения, а в образцах с бетулином – только к 20 суткам хранения. Данные по кислотности коррелируют с данными по органолептическим показателям образцов. Таким образом, подтверждено, что использование бетулина позволяет увеличить хранимоспособность цельного пастеризованного негомогенизированного молока.

Бетулин может быть рекомендован для комбинирования с молоком и молочными продуктами, в качестве компонента, который играет роль эмульгатора и позволяет увеличить срок годности продукции. Бетулин в виде 10-го водного раствора можно вносить в охлажденное молоко, а сухой бетулин рекомендовано вносить при температуре выше температуры плавления молочного жира (выше 40 °C).

Полученные данные открывают перспективы дальнейшему расширению ассортимента функциональных молочных продуктов с бетулином как источником биологически активных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мусина О.Н. Современное состояние биотехнологии комбинированных молочных продуктов (обзор). 1. Предпосылки и принципы создания комбинированных молочных продуктов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2008. № 3. С. 59–63.
2. Глициризиновая кислота / Г.А. Толстиков [и др.] // Биоорганическая химия. 1997. Т. 23. № 9. С. 691–709.
3. Белякова А.Ю., Погребняк А.В., Погребняк Л.В. Физико-химические и биологические свойства компонентов внешней коры бересы // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2 (часть 2). С. 492.
4. Ботаника. Энциклопедия «Все растения мира»: пер. с англ. / Под ред. Д. Григорьева [и др.]. М. : КоЛеманн, 2006. 1020 с.
5. Бетулин и его производные. URL: https://knowledge.allbest.ru/chemistry/2c0a65625b2ad68a4d53a89421216c37_0.html. (дата обращения 10.04.2025).
6. Pasich J., Pojda M. Naturaline i polsyntetyczne tenczydy. Cz. VII. Prosty sposob otrzamywania betuliny // Farmac pol. 1974. Vol. 30. № 8. Р. 771–772.
7. Преснова Г.А., Тюрина Н.А. Новая натуральная добавка – бетулинсодержащий экстракт бересты // Переработка молока. 2010. № 6. С. 10–11.
8. Похило Н.Д., Уварова Н.И. Изопреноиды различных видов рода *Betula* // Химия природных соединений. 1988. № 3. С. 325–341.
9. Изучение состава и антиоксидантных свойств гексанового и этанольного экстрактов бересты / С.А. Кузнецова [и др.] // Вестник Красноярского государственного университета. Естественные науки. 2005. № 2. С. 113–118.
10. Бетулин. Полезные свойства и применение бетулина. URL : <https://birchworld.ru/betulin-poleznye-svojstva-i-priemene-betulina> (дата обращения 10.04.2025).
11. Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю). URL : <https://docs.cntd.ru/document/902249109> (дата обращения 10.04.2025).
12. Рекомендуемые уровни потребления пищевых и биологически активных веществ : Методические рекомендации. М. : Федеральный центр гостанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 46 с.
13. Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к товарам, подлежащих санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю). URL : <http://www.tsouz.ru/db/techregulation/sanmeri/Documents/PishevayaCennost-1.pdf>. (дата обращения 10.04.2025).
14. Патент РФ № 2308837 А23С 3/08. Способ консервирования молока и молочных продуктов / Ткаченко Ю.А., Клабукова И.Н., Кислицын А.Н., Трофимов А.Н. ; опубл. 27.10.2007.

Информация об авторах

О. Н. Мусина – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий продуктов питания, гл. науч. сотр. ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Д. А. Усатюк – науч. сотр. лаб. научно-прикладных технологических разработок «Сибирского НИИ сыроделия» ФГБНУ ФАНЦА.

Н. И. Бондаренко – зав. лаб. научно-прикладных и технологических разработок «Сибирского НИИ сыроделия» ФГБНУ ФАНЦА.

Information about the authors

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

D.A. Usatiuk - research scientist, lab. of scientific and applied technological developments of the "Siberian Research Institute of Cheese-Making", FASCA.

N.I. Bondarenko - Head of the lab. of scientific and applied technological developments of the "Siberian Research Institute of Cheese-Making", FASCA.

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

Статья поступила в редакцию 23 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 23 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.76
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.019

EDN: IKWTZD

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОБРАБОТКИ ЗЕРНА НА СТОЙКОСТЬ СОРГОВОЙ МУКИ ПРИ ХРАНЕНИИ

Людмила Витальевна Анисимова ¹, Екатерина Сергеевна Серебренникова ²

¹ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный центр оценки безопасности и качества продукции агропромышленного комплекса». Алтайский филиал, Барнаул, Россия

¹ anislv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7900-2935>

² silver.775594@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0651-3512>

Аннотация. Оценено влияние способа обработки зерна сорго перед измельчением на стойкость сорговой муки при хранении путем определения кислотного числа жира (КЧЖ) муки, а также ее микробиологической обсемененности. Исследованы четыре разновидности муки, различающиеся по характеру обработки зерна перед измельчением: мука из зерна сорго, прошедшего гидротермическую обработку (ГТО) с увлажнением под вакуумом, отволаживанием и сушкой при оптимальных режимах, а также операцию шелушения-шлифования (V); мука из зерна сорго, прошедшего ГТО с пропариванием и сушкой при оптимальных режимах и операцию шелушения-шлифования (P); мука из зерна сорго, не подвергавшегося ГТО, но прошедшего операцию шелушения-шлифования (WH) и цельнозерновая мука из сорго (WG).

Образцы муки хранили в термостатах в условиях постоянной относительной влажности воздуха ($65,0 \pm 0,1 \%$) при температуре $20,0 \pm 0,5$ °C и $40,0 \pm 1,0$ °C. Повышенную температуру использовали при реализации метода «ускоренного старения» с целью интенсификации микробиологических и биохимических процессов, протекающих в муке. Муку размещали на хранение в двух видах упаковки: текстильных (хлопковых) мешках и полимерных (полиэтиленовых) пакетах с замком zip-lock.

Определение кислотного числа жира муки, а также количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) осуществляли по действующей нормативной документации. По результатам исследований были определены сроки годности муки из зерна сорго, не подвергнутого ГТО (WH), а также муки, из зерна сорго, прошедшего ГТО с увлажнением под вакуумом V. Для муки из зерна сорго P ввиду малого изменения КЧЖ установлен срок хранения по рассчитанному коэффициенту соответствия по методике «ускоренного старения».

Ключевые слова: сорго, сорговая мука, гидротермическая обработка, пропаривание зерна, хранение муки, кислотное число жира, КМАФАнМ, срок годности, срок хранения.

Для цитирования: Анисимова Л. В., Серебренникова Е. С. Влияние способа обработки зерна на стойкость сорговой муки при хранении // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 127–131. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.019. EDN: <https://elibrary.ru/IKWTZD>.

Original article

EFFECT OF GRAIN PROCESSING METHOD ON DURABILITY OF SORGHUM FLOUR DURING STORAGE

Ludmila V. Anisimova ¹, Ekaterina S. Serebrenikova ²

¹ Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

² Federal State Budgetary Institution "Federal Center for Assessment of safety and quality of products of the agro-industrial complex". Altai Branch, Barnaul, Russia

¹ anislv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7900-2935>

² silver.775594@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0651-3512>

Abstract. The effect of the method of processing sorghum grain before grinding on the durability of sorghum flour during storage was assessed by assessing the acid number of fat, as well as its microbiological contamination. Four types of flour were studied, differing in the nature of grain processing before grinding: flour from sorghum grain that has undergone hydrothermal treatment (HTT) with vacuum humidification, resting and drying under optimal conditions, as well as hulling and polishing (V); flour from sorghum grain that has undergone HTT with steaming and drying under optimal conditions and the hulling and polishing operation (P); flour from sorghum grain that has not been subjected to HTT, but has undergone the hulling and polishing operation (WH) and whole grain flour from sorghum (WG). Flour sam-

bles were stored in thermostats at constant relative humidity ($65.0 \pm 0.1\%$) at temperatures of $20.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ and $40.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$. The elevated temperature was used in the implementation of the "accelerated aging" method in order to intensify the microbiological and biochemical processes occurring in the flour. Flour was stored in two types of packaging: textile (cotton) bags and polymer (polyethylene) bags with a zip-lock. The determination of the acid number of fat, as well as the number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms (KMAFAnM) was carried out according to the current regulatory documentation. According to the research results, the shelf life of flour from sorghum grain that has not been subjected to HTT (WH), as well as flour from sorghum grain that has undergone HTT with humidification under vacuum V were determined. For flour from sorghum grain, due to the small change in acid number of fat, the storage life was set according to the calculated coefficient of conformity according to the "accelerated aging" method.

Keywords: sorghum, sorghum flour, hydrothermal treatment, grain steaming, flour storage, acid number of fat, KMAFAnM, shelf life, storage life.

For citation: Anisimova, L.V. & Serebrenikova, E.S. (2025). Effect of grain processing method on durability of sorghum flour during storage. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 127-131. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.019. EDN: <https://elibrary.ru/IKWTZD>.

ВВЕДЕНИЕ

Сорго зерновое, на данный момент, является одной из перспективных культур для возделывания в Алтайском крае ввиду наличия засушливых районов, а также большой распространенности засоленных и солончаковых почв на территории юго-запада края [1]. Другой причиной заинтересованности фермерских хозяйств данной культурой является повышение среднегодовых температур в крае за последние 30 лет [2].

Сорго – засухоустойчивая культура, она способна сохранять высокую урожайность при недостатке влаги, а также не требовательна к почвам [3, 4, 5].

Зерно сорго содержит около 80 % крахмала, 13–15 % белка, 8 % жира, около 2 % золы и золообразующих веществ, кроме того, сорго является источником каротина и содержит витамины, такие как тиамин, ниацин, рибофлавин, что делает его перспективным пищевым источником [6, 7, 8, 9, 10].

В засушливых странах сорго имеет большое значение в питании населения. Из него получают традиционные блюда, макаронные изделия, крупы, напитки [11, 12]. Главными производителями сорго являются Судан, Нигерия, Нигер, Индия и США [13].

Производство сорго в качестве пищевой культуры в Алтайском крае возможно, а продукты переработки сорго позволяют расширить ассортимент зерновой продукции, в том числе в качестве добавок при выпечке хлеба и хлебобулочных изделий.

Производство новых продуктов питания, а также сырья для их производства сопровождается рядом исследований, направленных на изучение их стойкости при хранении, а также возможности ее увеличения с помощью технологических приемов, что позволяет создавать запасы получаемой продукции и, как следствие, повышать эффективность производства.

Целью данной работы явилось изучение стойкости муки из зерна сорго, полученной разными способами, при хранении, а также определение сроков ее годности.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ

Сорговую муку получали из зерна сорго сорта Орловское путем измельчения ядра и зерна сорго на лабораторной мельнице молоткового типа с последующим отбором муки проходом металлотканого сита № 08.

Исследовали четыре разновидности муки, различающиеся по характеру обработки зерна перед измельчением: муку из зерна сорго, прошедшего гидротермическую обработку (ГТО) с увлажнением под

вакуумом, отволаживанием и сушкой, а также операцию шелушения-шлифования (V); муку из зерна сорго, прошедшего ГТО с пропариванием и сушкой и операцию шелушения-шлифования (P); муку из зерна сорго, не подвергавшегося ГТО, но прошедшего операцию шелушения-шлифования (WH) и цельнозерновую муку сорго (WG).

Полученную муку хранили в двух видах упаковки: текстильных хлопковых мешках и полимерных (полиэтиленовых) пакетах с замком zip-lock. Муку помещали в термостаты при постоянных значениях температуры и относительной влажности воздуха. Температуру хранения поддерживали на уровнях 20.0 ± 0.5 и $40.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$. Повышенную температуру использовали при реализации метода «ускоренного старения» [14, 15, 16] с целью интенсификации микробиологических и биохимических процессов, протекающих в муке. Относительная влажность воздуха составляла $65.0 \pm 0.1\%$.

При изучении стойкости муки из голозерного красного сорго при хранении руководствовались показателями кислотного числа жира (КЧЖ), а также количеством мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ), определяемыми по стандартным методикам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кислотное число жира является одним из основных показателей свежести муки, показывающее количество накопленных свободных жирных кислот в течение хранения. Накапливающиеся жирные кислоты являются следствием гидролиза жиров и способны окисляться далее до образования перекисей и гидроперекисей, влияющих на потребительские свойства муки.

На рисунках 1–3 представлены зависимости кислотного числа жира разновидностей сорговой муки от длительности хранения при температурах $20.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ и $40.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$.

Из данных, представленных на рисунках, следует, что КЧЖ растет для всех образцов в процессе хранения, при этом образцы муки P имеют наименьшие значения КЧЖ. Наибольшие значения кислотного числа жира для всех образцов муки достигаются на 168 сутки хранения, в условиях повышенной температуры ($40.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$) при хранении в текстильных хлопковых мешках. Так, для муки P наибольшее значение данного показателя равно 54,4 мг КОН на 1 г жира, для муки V наибольшее значение КЧЖ равно 99,7 мг КОН на 1 г жира. Из всех исследованных образцов муки из голозерного красного сорго наибольшее значение КЧЖ, составившее 142,7 мг КОН на 1 г жира, имеет мука WH.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОБРАБОТКИ ЗЕРНА НА СТОЙКОСТЬ СОРГОВОЙ МУКИ ПРИ ХРАНЕНИИ

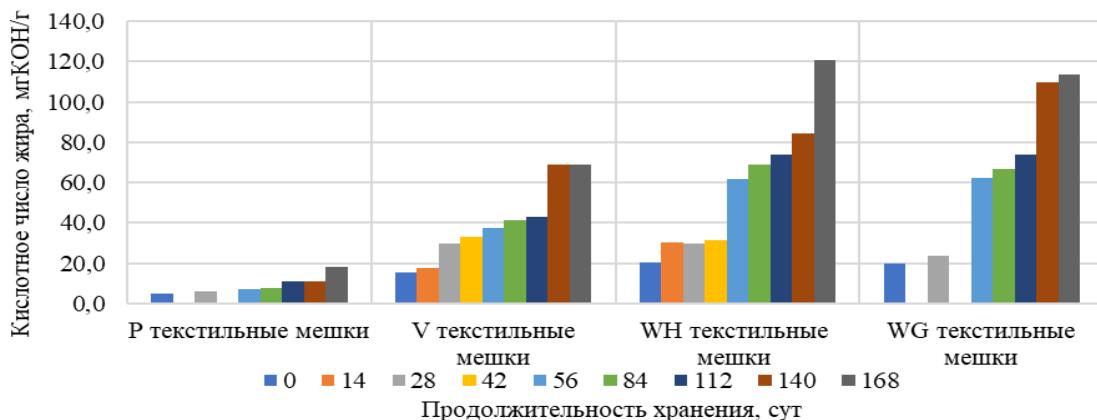


Рисунок 1 – Влияние продолжительности хранения при температуре $20,0 \pm 0,5$ °C в текстильных хлопковых мешках на кислотное число жира муки из голозерного красного сорго, полученной разными способами

Figure 1 – The effect of the storage duration at a temperature of 20.0 ± 0.5 °C in textile cotton bags on the acid number of fat from naked red sorghum flour obtained by various methods

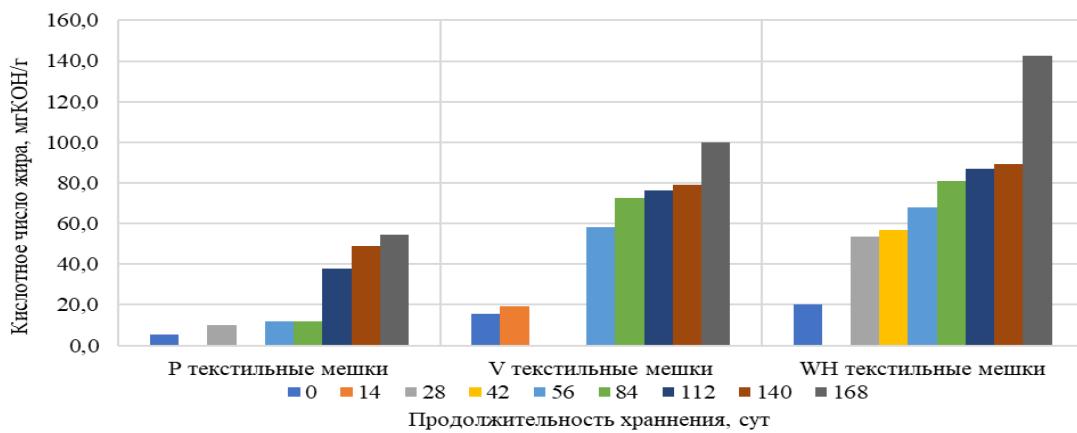


Рисунок 2 – Влияние продолжительности хранения при температуре $40,0 \pm 1,0$ °C в текстильных хлопковых мешках на кислотное число жира муки из голозерного красного сорго, полученной разными способами

Figure 2 – The effect of the storage duration at a temperature of 40.0 ± 1.0 °C in textile cotton bags on the acid number of fat from naked red sorghum flour obtained by various methods

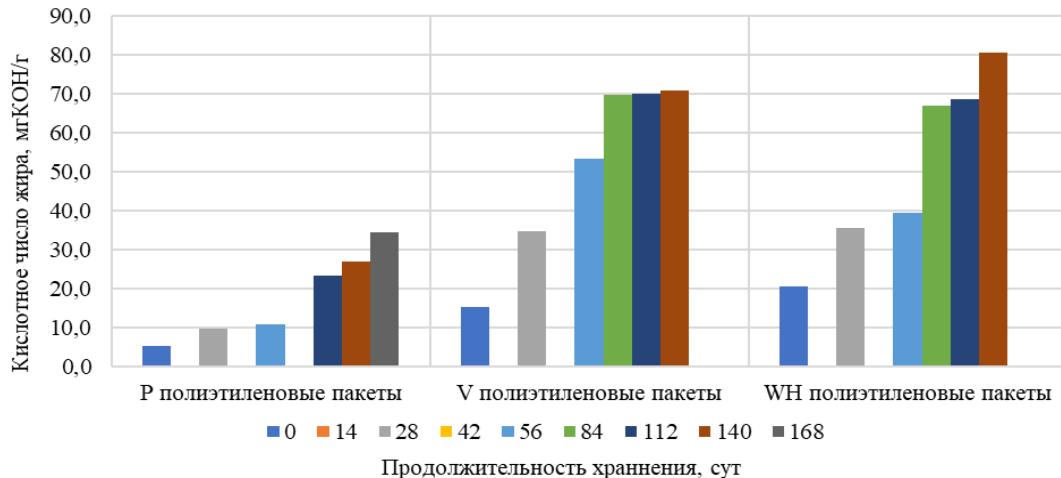


Рисунок 3 – Влияние продолжительности хранения при температуре $40,0 \pm 1,0$ °C в полимерных (полиэтиленовых) пакетах на кислотное число жира муки из голозерного красного сорго, полученной разными способами

Figure 3 – The effect of the storage duration at a temperature of 40.0 ± 1.0 °C in plastic (polyethylene) bags on the acid number of fat from naked red sorghum flour obtained by various methods

Кроме того, из представленных данных следует, что наибольшее значение КЧЖ цельнозерновой муки из голозерного красного сорго равное 113,4 мг КОН на 1 г жира достигается при хранении в условиях температуры $20,0\pm0,5$ °C в текстильных хлопковых мешках в течение 168 суток и оно ниже, чем КЧЖ образца муки *WH*, хранившейся при тех же условиях. При этом мука *WG* имеет большие значения КЧЖ при меньшей длительности хранения. Это говорит о том, что в муке *WG* содержится большее количество антиокислителей, попавших в муку вместе с зародышем и оболочками, которые проявляют свое действие.

Образцы муки, хранившиеся в полимерных пакетах, демонстрируют меньшие значения КЧЖ, чем образцы, хранившиеся в хлопковых мешках, что говорит о положительном воздействии данного вида упаковки на сохранность муки из голозерного красного сорго. При хранении муки *V*, а также муки *WH*, были установлены сроки годности. Для муки *P*, ввиду малого изменения КЧЖ в процессе хранения по методике «ускоренного старения» был установлен срок хранения по коэффициенту, определенному для муки из зерна голозерного красного сорго, прошедшего ГТО с увлажнением под вакуумом.

При установлении срока годности за предел взяли норму, указанную в ГОСТ 26574 для пшеничной муки, равную 80 мг КОН на 1 г жира, при установлении срока хранения – 50 мг КОН на 1 г жира.

На 140 сутки мука из красного голозерного сорго, не прошедшего ГТО, достигла значения КЧЖ, равного 84,4 мг КОН на 1 г жира при ее хранении в условиях температуры $20,0\pm0,5$ °C в хлопковых мешках. Однако это значение превышает норму, установленную

ГОСТ 26574, поэтому для расчета была взята предыдущая точка, соответствующая значению данного показателя 73,7 мг КОН на 1 г жира при хранении в течение 112 суток. При этом образцы муки *WH*, хранившиеся при температуре $40,0\pm1,0$ °C, достигли такого уровня на 56 сутки хранения. Таким образом, коэффициент соответствия по методике «ускоренного старения» *K* = 2.

Мука из зерна голозерного красного сорго, прошедшего ГТО с увлажнением под вакуумом, хранившаяся в условиях температуры $20,0\pm0,5$ °C в хлопковых мешках, достигла максимального уровня кислотного числа жира, равного 68,9 мг КОН на 1 г жира на 168 сутки хранения. При этом образцы, хранившиеся в условиях температуры $40,0\pm1,0$ °C в хлопковых мешках, достигли такого уровня кислотного числа жира на 84 сутки. Таким образом, коэффициент соответствия также равен 2.

Мука из голозерного красного зерна сорго *P*, хранившаяся в хлопковых мешках, на 140 сутки достигает значения КЧЖ, равного 49,1 мг КОН на 1 г жира при условиях температуры $40,0\pm1,0$ °C. Таким образом, с применением коэффициента соответствия, равного 2, срок хранения такой муки равен 280 суткам при температуре $20,0\pm0,5$ °C.

На рисунке 4 представлено изменение микробиологических показателей исследуемых образцов сорговой муки в процессе хранения при температуре $20\pm0,5$ °C, которые также играют важную роль при оценке стойкости муки при хранении.

Определяли количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, а также количество плесневых грибов.

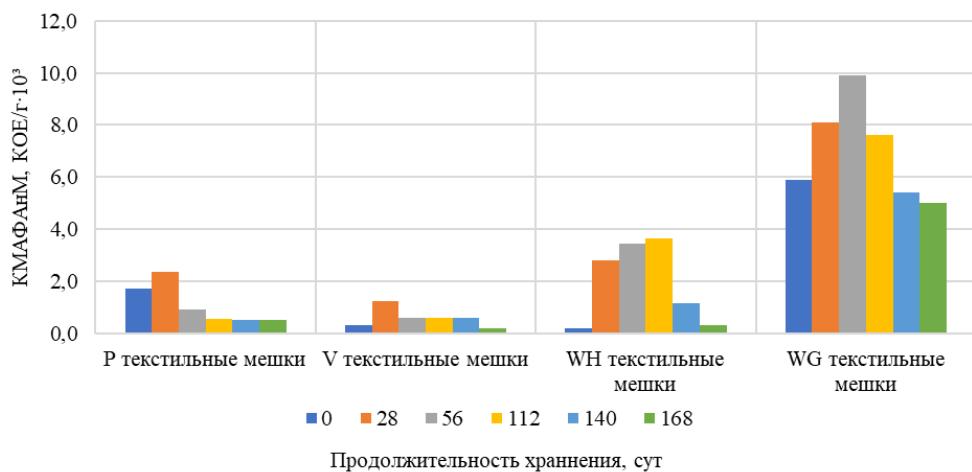


Рисунок 4 – Влияние способа получения муки из голозерного красного сорго на изменение КМАФАнМ в процессе хранения

Figure 4 – The effect of the method of producing flour from naked red sorghum on the change in the number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms during storage

Из представленных данных следует, что микробиологическая обсемененность цельнозерновой муки из голозерного красного сорго *WG*, а также муки из зерна сорго *WH* выше, чем муки из зерна сорго, прошедшего ГТО. Это свидетельствует о частичной стерилизации сорго во время гидротермической обработки зерна, используемого для получения двух других образцов муки.

Наибольшее значение КМАФАнМ, равное $9,9\cdot10^3$ КОЕ/г, было получено при хранении сорговой муки из целого зерна голозерного красного сорго *WG*

на 56 сутки, для образцов муки *WH* наибольшее значение КМАФАнМ составило $3,7\cdot10^3$ КОЕ/г на 112 сутки хранения. Мука из пропаренного зерна сорго достигла максимального значения КМАФАнМ, равного $2,4\cdot10^3$ КОЕ/г на 28 сутки хранения, мука из зерна сорго, прошедшего ГТО с увлажнением под вакуумом, достигла максимального значения микробиологической обсемененности в размере $1,3\cdot10^3$ КОЕ/г на 28 сутки хранения. Увеличение количества микроорганизмов связано с экспоненциальным ростом бактериальной микрофлоры в процессе поглощения питательных

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОБРАБОТКИ ЗЕРНА НА СТОЙКОСТЬ СОРГОВОЙ МУКИ ПРИ ХРАНЕНИИ

веществ муки. Снижение количества колоний свидетельствует о повышении кислотности муки в процессе хранения, что вызывает их отмирание. Плесневые грибы ни в одном из образцов сорговой муки обнаружены не были.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

- гидротермическая обработка сорго позволяет повысить стойкость при хранении сорговой муки, при этом двойное тепловое воздействие в процессе ГТО (пропаривание, сушка) способно в лучшей степени стабилизировать процессы, протекающие в муке при хранении; в связи с этим данные образцы имели меньшее КЧЖ, а также были в меньшей степени обсеменены микроорганизмами;
- упаковка муки в полимерные пакеты, оснащенные застежкой, препятствующей попаданию внутрь пакета кислорода воздуха, позволяет дольше сохранить свежесть муки;
- операция шелушения-шлифования снижает обсемененность сорговой муки микроорганизмами, о чем свидетельствует показатель КМАФАнМ, определяемый в процессе хранения.

По результатам проведенных исследований можно рекомендовать сроки годности сорговой муки $WH - 112$ суток; муки $V - 168$ суток, а также срок хранения муки $P - 280$ суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. 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.
2. Погода и климат // www. pogodaiklimat.ru. Электрон. текст. дан. Режим доступа: http://www.pogodaiklimat.ru/history/44277_3.htm. Загл. с экрана.
3. Горпиниченко С.И. Результаты селекции суданской 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.
4. Метлина Г.В. Агрономическая 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.
5. Раева С.А. Производство зернового сорго в Ростовской области / С.А. Раева // Кукуруза и сорго. № 6. 2005. С. 12–14.
6. Ковтунов В.В. Основные направления использования сорго зернового / В.В. Ковтунов, С.И. Горпиниченко // Зерновое хозяйство России. 2011. № 6. С. 28–32.
7. Morya G.-C.K. Millets: The Indigenous Food Grains / G.-C.K. Morya, H.S. Mishra, S. Shakya, B. Raj, K.N. Yadav // International Journal of Advanced Ayurveda, Yoga, Unani, Siddha and Homeopathy. 2017. № 6(1). P. 447–452.
8. Rathore T. Review on finger millet: Processing and value addition. / T. Rathore, R. Singh, D.B. Kamble, A. Upadhyay, S. Thangalakshmi // The Pharma Innovation Journal. 2019. № 8(4). P. 283–291.
9. Шепель Н.А. Сорго – интенсивная культура / Н.А. Шепель. Симферополь : Таврия, 1989. 191 с.
10. Widowati S. Karakteristik Mutu Gizi Dan Diversifikasi Pangan Berbasis Sorgum (Sorghum vulgare) / S. Widowati // PANGAN. 2010. Vol. 19 (4). P. 373–382.
11. Dykes L. Sorghum and millet phenols and antioxidants / L. Dykes, L.W. Rooney // Journal of Cereal Science. 2006. № 44. P. 236–251.
12. Taylor J.R.N. Sorghum and millets: grain-quality characteristics and management of quality requirements / J.R.N. Taylor, K.G. Duodu // Cereal Grains. 2017. P. 317–351.
13. 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.
14. Анисимова Л.В. Стойкость при хранении ячменной муки, полученной разными способами / Л.В. Анисимова, А.А. Выборнов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2014. № 2–3. С. 41–44.
15. Солтан О.И.А. Разработка технологии овсянной муки с интенсивным увлажнением зерна и мучных композитных смесей на её основе: дис. ... канд. тех. наук : 05.18.01 / Солтан Осама Исмаэил Ахмед. Барнаул, 2020. 196 с.
16. Выборнов А.А. Разработка технологии ячменной муки с использованием интенсивного увлажнения зерна: дис. ... канд. тех. наук : 05.18.01 / Выборнов Андрей Александрович. Барнаул, 2016. 145 с.

Информация об авторах

Л. В. Анисимова – к.т.н., доцент, доцент кафедры ТХПЗ ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел.: 8-960-947-45-28, e-mail: anislv@mail.ru.

Е. С. Серебренникова – главный специалист испытательной лаборатории Алтайского филиала ФГБУ «ЦОК АПК», тел.: 8-963-570-59-80, e-mail: silver.775594@mail.ru.

Information about the authors

L.V. Anisimova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of THPZ of the Polzunov Altai State Technical University.

E.S. Serebrennikova - Chief specialist of the testing laboratory of the Federal State Budgetary Institution "Federal Center for Assessment of safety and quality of products of the agro-industrial complex".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 23 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.681.15
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.020

EDN: MFHXJO

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНОПЛЯНОЙ МУКИ НА ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САХАРНОГО ПЕЧЕНЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ ГУГГЕНХАЙМА-АНДЕРСОНА-ДЕ БУРА

Юлия Александровна Ускова ¹, Роман Хажсетович Кандроков ²

^{1,2} Российский биотехнологический университет «РОСБИОТЕХ», Москва, Россия

¹ juluskova@yandex.ru

² nart132007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2918>

Аннотация. Статья посвящена проблемам моделирования сорбции влаги в сахарном печенье, где традиционные модели Лэнгмюра и БЭТ признаются недостаточно точными. В качестве альтернативы авторы применяют модель Гуггенхайма-Андерсона-де Бура (ГАБ). Исследование направлено на изучение влияния добавления частично обезжиренной конопляной муки на реологию и гигроскопичность печенья. Для получения данных об изотермах сорбции использовался статический гравиметрический метод. Анализ модели ГАБ показал, что добавление 4 % конопляной муки увеличивает монослойную сорбцию влаги, усиливая гигроскопичность. Продукт демонстрирует тенденцию к поглощению влаги из окружающей среды, а не к её потере, характерной для черствения. По мнению авторов, наблюдаемый эффект, вероятно, обусловлен увеличением количества полярных связывающих центров или формированием более пористой структуры изделия под воздействием конопляной муки.

Ключевые слова: сахарное печенье, конопляная мука, изотерма сорбции, модель Гуггенхайма-Андерсона-де Бура.

Для цитирования: Ускова Ю. А., Кандроков Р. Х. Исследование влияния конопляной муки на гигроскопические свойства сахарного печенья с применением модели Гуггенхайма-Андерсона-де Бура // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 132–136. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.020. EDN: <https://elibrary.ru/MFHXJO>.

Original article

HYGROSCOPIC PROPERTIES OF SUGAR COOKIES WITH HEMP FLOUR: APPLICATION OF GUGGENHEIM-ANDERSON-DE BOER MODEL

Yulia A. Uskova ¹, Roman Kh. Kandrokov ²

^{1,2} Russian Biotechnological University (ROSBIO-TECH), Moscow, Russia

¹ juluskova@yandex.ru

² nart132007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2918>

Abstract. The article focuses on the challenges of modelling moisture sorption in sugar cookies, where traditional Langmuir and BET models are acknowledged to be insufficiently accurate. Alternatively, the authors employ the Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) model. The study investigates the effect of adding partially defatted hemp flour on the rheology and hygroscopicism of the cookies. A static gravimetric method was used to get sorption isotherm data. The GAB model revealed that the addition of 4 % hemp flour increases monolayer moisture sorption, which enhances hygroscopicity. The product tends to absorb moisture from the environment instead of losing it. Adding hemp flour to the product may result in an increase in the number of polar binding sites or the formation of a more porous structure in the product, according to the authors.

Keywords: sugar cookies, hemp flour, sorption isotherm, Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) model.

For citation: Uskova, Y.A., Kandrikov, R.Kh. (2025). Hygroscopic properties of sugar cookies with hemp flour: application of the Guggenheim-Anderson-de Boer model. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 132-136. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.020. EDN: <https://elibrary.ru/MFHXJO>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНОПЛЯНОЙ МУКИ НА ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САХАРНОГО ПЕЧЕНЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ ГУГГЕНХАЙМА-АНДЕРСОНА-ДЕ БУРА

ВВЕДЕНИЕ

Необходимый шаг к улучшению рациона населения и борьбе с микронутриентной недостаточностью – совершенствование рецептур распространенных продуктов питания. Высокая потребляемость мучных кондитерских изделий, таких как сахарное печенье, делает их модификацию особенно актуальной задачей. В связи с этим, многие исследования сейчас фокусируются на поисках различных способов обогащения этой продукции без ухудшения её вкусовых качеств и потребительских свойств [1].

Пищевые продукты – это сложные системы, состоящие из воды, углеводов, белков, жиров и минеральных веществ. Их структура многоуровневая: от взаимодействия отдельных молекул (влияющего на растворимость, вязкость и гелеобразование) до макроскопического уровня, определяющего форму, текстуру и внешний вид. Промежуточные уровни – надмолекулярный (например, образование белковых агрегатов и крахмальных гранул) и микроскопический (структура тканей) – также существенно влияют на свойства продукта [2, 3].

Понимание этой многоуровневой организации крайне важно для обеспечения стабильности и сохранности продуктов. Изменения на любом из уровней могут привести к порче. Чаще всего это связано с изменением влажности (убыль, прирост, перераспределение). Перемещение влаги, обусловленное разностью химических потенциалов, нарушает баланс пищевой системы. Активность воды (a_w) – показатель термодинамического потенциала воды, то есть доли свободной воды, участвующей в химических реакциях в качестве растворителя и реагента [4].

Содержание влаги (определенное, например, методом Карла Фишера) и активность воды связаны, но эта зависимость сложна и специфична для каждого продукта. Как правило, повышение активности воды ведет к увеличению содержания влаги, но эта зависимость нелинейна. Зависимость равновесного содержания влаги от активности воды при постоянной температуре описывают сорбционные изотермы. Сорбционные изотермы помогают оптимизировать обработку пищевых продуктов (сушку, смешивание, упаковку, концентрирование, дегидратацию) и прогнозировать их срок хранения [5, 6].

Форма изотермы зависит от характеристик продукта. Существует три основных типа изотерм сорбции (рис. 1). Наиболее распространенный – сигмоидный (тип II), типичный для продуктов со средним содержанием влаги. В таких материалах адсорбция не ограничивается образованием одного монослоя; она начинается при относительно низком давлении пара и продолжается с образованием нескольких слоев молекул. К сигмоидальным изотермам (тип II) относятся, например, кривые сорбции-десорбции водяного пара крахмалом. В этом случае вода образует многослойные структуры на поверхности, удерживаясь водородными связями. Хотя точный механизм влияния многослойной адсорбции на свойства гидроколлоидов неясен, известно, что тип II связан с полимолекулярной адсорбцией, бесконечно увеличивающейся по мере приближения к давлению насыщенного пара (как у непористых материалов [7].

Существует более ста уравнений, описывающих сорбцию паров воды и других низкомолекулярных жидкостей различными материалами. Выбор подходящей математической модели зависит от специфики исследуемого материала и условий сорбции. Наибо-

лее известные и часто применяемые модели – это модель Лэнгмюра и модель Брунауэра-Эмметта-Теллера (БЭТ). Однако эти модели имеют свои ограничения. Модель Лэнгмюра, например, предполагает образование только мономолекулярного слоя адсорбата, что не всегда соответствует действительности, особенно для пищевых продуктов с пористой структурой или высоким содержанием влаги. Модель БЭТ, хотя и учитывает многослойную адсорбцию, часто требует сложных расчетов и не всегда обеспечивает высокую точность предсказаний для сложных пищевых систем [8].

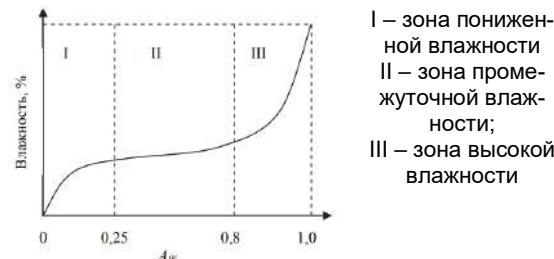


Рисунок 1 – Общий вид изотермы сорбции воды в пищевом продукте

Figure 1 – General representation of the water sorption isotherm in a food product

Модель Гуггенхайма-Андерсона-де Бура представляет собой усовершенствованный подход, особенно эффективный при описании многослойной адсорбции, часто встречающейся в пищевых продуктах. В отличие от модели БЭТ модель ГАБ более проста в применении и дает более точные результаты для определенного диапазона условий. Её преимущество заключается в способности учитывать накопление влаги не только на поверхности материала, но и внутри его пористой структуры. Это особенно важно для таких продуктов, как печенье, где повышенное содержание влаги в упаковке может привести к размягчению продукта, образованию плесени и, как следствие, уменьшению срока годности. Точное описание сорбционных изотерм с помощью модели ГАБ позволяет оптимизировать условия хранения и упаковки печенья и других подобных продуктов, минимизируя риски порчи и продлевая срок их хранения [9, 10, 11].

Целью исследования является сравнительный анализ гигроскопических свойств сахарного печенья из пшеничной муки и печенья с добавлением конопляной муки, описываемых моделью Гуггенхайма-Андерсона-де Бур (ГАБ).

МЕТОДЫ

Кондитерские изделия готовились по унифицированной рецептуре «Юбилейное». Для обеспечения оптимального формования теста в лабораторных условиях его влажность была установлена на уровне $16,5 \pm 0,5 \%$. Выпечка изделий проводилась при температуре 185°C в течение 10,5 минут. Образцы охлаждали до комнатной температуры и упаковывали в герметичные пакеты из полипропиленовой пленки 40 мкм толщиной. Хранение осуществлялось при температуре в лаборатории $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. На рисунке 2 показаны образцы сахарного печенья, где визуально видно, как меняется продукт при увеличении количества добавляемой конопляной муки.

Предыдущее исследование показало, что добавление конопляной муки в тесто для сахарного

печенья оказывает комплексное влияние на его реологические свойства. Оптимальным количеством для производства сахарного печенья является введение 4 % обезжиренной муки конопляной взамен муки пшеничной.



Рисунок 2 – Сахарное печенье с разными дозировками частично обезжиренной конопляной муки

Figure 2 – Sugar cookies containing different amounts of partially defatted hemp flour

Изотермы адсорбции и десорбции для образцов сахарного печенья с 0 % и 4 % конопляной муки были построены с использованием гравиметрического метода. Навески весом в 1 грамм помещали в эксикаторы, содержащие насыщенные растворы солей, которые применяются в качестве эталонов активности воды с известными и постоянными уровнями активности воды. Когда разница между весом образца составляла менее 1 мг/г твердых веществ в течение двух недель подряд, считалось, что образец достиг равновесия [12].

Для периодической проверки значений активности воды рабочих растворов использовался прибор Novasina Lab Master-Aw (Novasina, Швейцария). Содержание воды в образцах в равновесном состоянии определяли с помощью влагомера MA 50/1.X2.A (Radwag, Польша) и пересчитывали на сухое вещество.

Для описания сорбционных изотерм была применена модель Гуттенхайма-Андерсона-де Бура (ГАБ) [12]:

$$M = \frac{m_0 c_1 c_2 a_w}{(1 - c_2 a_w)(1 - c_2 a_w + c_1 c_2 a_w)}, \quad (1)$$

где M – равновесное содержание влаги (PCB, грамм воды на грамм сухого вещества);

m_0 – содержание влаги в мономолекулярном слое на поверхности материала, г/г;

c_1 – константа, связанная со свойствами мономолекулярной влаги;

c_2 – константа, связанная со свойствами полислоевой влаги;

a_w – активность воды.

Уравнение ГАБ было преобразовано в квадратное уравнение для вычисления констант c_1 и c_2 :

$$\frac{a_w}{M} = b_1 + b_2 a_w + b_3 a_w^2, \quad (2)$$

где эквиваленты выражены как: $b_1 = 1/m_0 c_1 c_2$; $b_2 = (1 - 2/c_1)/m_0$; $b_3 = (c_2/m_0)/(1/c_1 - 1)$.

Для поиска параметров этого квадратного уравнения используется метод линейной регрессии, который определяет параметры прямой линии, аппроксимирующей экспериментальные данные, на основе которых можно найти корни уравнения.

Температурная зависимость констант ГАБ была оценена с использованием следующих уравнений типа Аррениуса:

$$m_0(T) = m'_0 \cdot \exp(\Delta H' / RT); \quad (3)$$

$$c_1(T) = c'_1 \cdot \exp([H_L - H_m] / RT); \quad (4)$$

$$c_2(T) = c'_2 \cdot \exp([H_L - H_m] / RT), \quad (5)$$

где m'_0 , c'_1 , c'_2 – предэкспоненциальные множители;

$\Delta H'$ – энергетический фактор Аррениуса (кДж/моль);

H_L – теплота сорбции первого слоя (кДж/моль);

H_m – теплота сорбции полислоя (кДж/моль);
 H_L – теплота конденсации чистого водяного пара (кДж/моль).

Статистическую обработку данных проводили с использованием компьютерной программы Microsoft Excel 365 MSO (Version 2408). Число параллельных опытов в каждой точке $n = 3$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

«Изотерма сорбции» в данном исследовании представляет собой комбинацию двух процессов: десорбции, когда образец отдает воду, и адсорбции, когда образец поглощает воду. Какой из процессов будет преобладать, зависит от того, как активность воды в окружающей среде (созданной насыщенными солевыми растворами) соотносится с начальной активностью воды образца. На графиках (рис. 3, 4) представлены изотермы сорбции влаги для двух видов сахарного печенья: контрольного (из 100 % пшеничной муки) и с добавлением 4 % конопляной муки. Измерения проводились при 20 °C и 30 °C.

Для построения графиков использовали пять различных солей определенной концентрации: ацетат калия (CH_3COOK), карбонат калия (K_2CO_3), нитрат магния ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$), хлорид натрия (NaCl) и хлорид калия (KCl). Эти соли, имеющие различную способность связывать воду, позволяли получить широкий диапазон активности воды. Порядок увеличения PCB при разных a_w для каждой соли постоянен, что свидетельствует о постоянной сорбционной способности материалов в данном диапазоне активности воды.

Анализ полученных данных сорбции влаги в образцах сахарного печенья выявил четкую и повторяющуюся закономерность. Наблюдается прямо пропорциональная зависимость между активностью воды (a_w) и равновесным содержанием влаги (PCB): с увеличением a_w , PCB в образцах печенья, как контрольных, так и с добавлением конопляной муки, стабильно возрастает. Эта закономерность является типичной для гигроскопичных материалов, поскольку более высокая a_w указывает на большую доступность влаги в окружающей среде, что способствует ее поглощению материалом до достижения состояния равновесия.

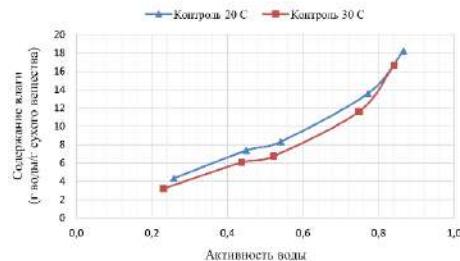


Рисунок 3 – Изотерма сорбции для продукта из 100 % муки пшеничной

Figure 3 – Sorption isotherm for 100 % wheat flour product

В то же время установлено, что температура оказывает обратное воздействие на PCB. При фиксированном значении a_w , равновесное содержание влаги в образцах снижается с повышением температуры от 20 °C до 30 °C. Этот эффект обусловлен увеличением кинетической энергии молекул воды при повышении температуры. При более высокой кинетической энергии молекулам воды становится труднее удерживаться на поверхности материала, а также внутри него посредством процессов адсорбции и абсорбции. В

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНОПЛЯНОЙ МУКИ НА ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САХАРНОГО ПЕЧЕНЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ ГУГГЕНХАЙМА-АНДЕРСОНА-ДЕ БУРА

результате материал способен сорбировать меньше влаги до достижения равновесного состояния.

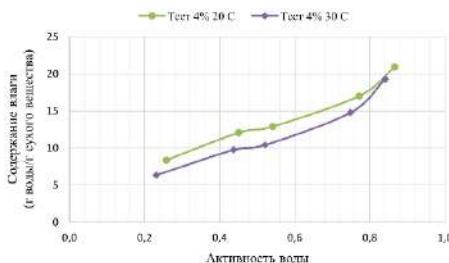


Рисунок 4 – Изотерма сорбции для продукта с добавлением 4 % муки конопляной

Figure 4 – Sorption isotherm for a product with the addition of 4 % hemp flour

Сравнительный анализ сорбционных свойств контрольного образца сахарного печенья (100 % пшеничной муки) и образца с добавлением 4 % конопляной муки показал, что последний, как правило, демонстрирует более высокое равновесное содержание влаги при всех исследованных значениях активности воды и обеих температурах (20 °C и 30 °C). Это позволяет предположить, что добавление конопляной муки увеличивает гигроскопичность сахарного печенья по сравнению с контрольным образцом, делая его более склонным к поглощению влаги из окружающей среды. Различия в значениях РСВ, полученные для разных образцов, могут быть обусловлены влиянием конопляной муки на структуру, пористость и химический состав печенья и потенциально – на взаимодействие с молекулами воды.

Таблица 1 – Параметры модели ГАБ, полученные для изотерм сорбции отдельных продуктов

Table 1 – GAB model parameters derived from the sorption isotherms for each product

Образец	Температура, °C	m_0 , кг/кг	c_1	c_2
Контроль из 100 % муки пшеничной	20	0,007	6,196	0,589
	30	0,005	5,798	0,632
Тестовый образец с добавлением 4 % частично обезжиренной конопляной муки	20	0,010	15,551	0,556
	30	0,007	15,553	0,662

Таблица 2 – Температурная зависимость параметров ГАБ

Table 2 – Influence of temperature on GAB parameters

Образец	$m_0(T)$		$c_1(T)$		$c_2(T)$	
	m'_0 (кг/кг)	$\Delta H'$ (кДж/моль)	c'_1	$H_1 - H_m$ (кДж/моль)	c'_2	$H_L - H_m$ (кДж/моль)
Контроль из 100 % муки пшеничной	$5,08 \cdot 10^{-6}$	17,56	0,82	4,9	5,09	- 5,25
Тестовый образец с добавлением 4 % частично обезжиренной конопляной муки	$7,56 \cdot 10^{-7}$	23,11	15,6	- 0,01	112,01	- 12,92

Как видно из таблицы 2, контрольный образец сахарного печенья имеет положительную энталпию сорбции (17,56 кДж/моль), что указывает на то, что сорбция влаги в монослое – это эндотермический процесс, требующий затраты энергии. У образца с добавлением конопляной муки $\Delta H'$ (23,11 кДж/моль) немного выше, чем у контрольного образца, что может свидетельствовать о том, что добавление конопляной муки немного увеличивает количество активных центров связывания. Отрицательное значение разницы энталпий указывает на более сложное взаимодействие с водой в первом слое.

Следовательно, добавление 4 % частично обезжиренной конопляной муки меняет сорбционные свойства продукта. Можно предположить, что конопляная мука меняет природу активных центров и уменьшает общее количество воды, которое может быть сорбировано.

Параметры модели ГАБ, полученные для изотерм сорбции сахарного печенья из контрольной 100 % муки пшеничной и с добавлением 4 % частично обезжиренной конопляной муки в пшеничную муку, представлены в таблице 1.

Анализ параметров модели ГАБ показал, что с повышением температуры с 20 °C до 30 °C величина m_0 (массовая доля влаги в монослое) снижается, что свидетельствует об уменьшении количества воды, необходимого для формирования мономолекулярного слоя на поверхности печенья. При этом добавление конопляной муки увеличивает значение m_0 при обеих температурах, что указывает на усиление гигроскопичности печенья, возможно, из-за увеличения доступности полярных связывающих центров или более пористой структуры, обеспечивающей большую площадь поверхности для связывания воды.

Значение c_1 (сила взаимодействия вода–поверхность) для контрольного образца уменьшается с повышением температуры. При более высокой температуре вода хуже притягивается к поверхности материала. Для тестового образца значение c_1 значительно выше и остается практически постоянным с увеличением температуры. На основании этих результатов выдвигается гипотеза о том, что введение конопляной муки в рецептуру мучных кондитерских изделий способно замедлить темпы черствения.

Температурная зависимость констант ГАБ представлена в таблице 2. Можно отметить, что образец с добавлением конопляной муки имеет более низкую гипотетическую монослойную сорбцию, так как параметр m'_0 на порядок меньше контрольного образца.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты показывают, что добавление конопляной муки влияет не только на реологические свойства теста для печенья, но и на его сорбционные характеристики, которые тесно связаны с содержанием влаги в готовом продукте. Повышенная плотность теста, вызванная добавлением конопляной муки, может изменить структуру пористости, что, в свою очередь, повлияет на доступность поверхности для адсорбции воды и, следовательно, на параметры модели ГАБ. Реологические изменения, вызванные добавлением конопляной муки, необходимо учитывать при оптимизации технологического процесса и прогнозировании срока хранения готового продукта.

Дальнейшие исследования, включающие примене-

ние модели ГАБ к сахарному печенью с разным содержанием конопляной муки, помогут установить количественную зависимость между реологическими свойствами теста и параметрами сорбции. В частности, изучение влияния дисперсности конопляной муки на влагоудерживающую способность может пролить свет на механизмы взаимодействия компонентов теста и соответственно, прогнозирование срока годности готового печенья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мистенева С.Ю., Солдатова Е.А., Савенкова Т.В. Разработка мучных кондитерских изделий с использованием нерафинированного растительного сырья // Пищевая промышленность. 2019. № 8. С. 66–71. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10129.
2. Базарнова Ю.Г. Теоретические основы методов исследования пищевых продуктов : учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. 136 с.
3. Васильева Н.Г. Основы химии полимеров : учеб. пособие. Минск : БГПУ, 2018. 169 с.
4. Срок годности пищевых продуктов: расчет и испытание / Под ред. Р. Стеле; пер. с англ. В. Широкова под общ. ред. Ю.Г. Базарновой. СПб. : Профессия, 2006. 480 с.
5. Цуканов М.Ф., Черноморец А.Б. Технологические аспекты показателя «Активность воды» и его роль в обеспечении качества продукции общественного питания // ТТПС. 2010. №11. С. 58–63.
6. Bashir O., Hussain S.Z., Ameer K., Amin T., Beenish, Ahmed, I.A.M., Aljobair M.O., Gani G., Mir S.A., Ayaz Q. & Nazir N. (2023). Influence of Anticaking Agents and Storage Conditions on Quality Characteristics of Spray Dried Apricot Powder: Shelf Life Prediction Studies Using Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) Model. *Foods*, 12(1), 171. doi: 10.3390/foods12010171.
7. Подорожная И.В., Ветохин С.С., Орсик М.В. Изотермы сорбции молочных композиций // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2015. № 4 (177). С. 256–261.
8. Адамова Л.В., Сафонов А.П. Сорбционный метод исследования пористой структуры наноматериалов и удельной поверхности наноразмерных систем : учеб. пособие. Екатеринбург : УрГУ, 2008. 62 с.
9. Kim S.S., Kim S.Y., Kim D.W., Shin S.G. & Chang K.S. (1999). Moisture Sorption Characteristics of Composite Foods Filled with Chocolate. *Journal of Food Science*, 64(2), 300–302. doi:10.1111/j.1365-2621.1999.tb15887.x.
10. Nayab A.K., Valík L., Ačai P. (2024). Sorption isotherm modelling of dried tomatoes. *Czech, J. of Food Science*, 42, 21–30. doi: 10.17221/109/2023-CJFS.
11. Ускова Ю.А., Кандров Р.Х. Применение метода симплексных решеток при моделировании рецептуры имбирного печенья // Вестник КрасГАУ. 2023. № 6 (195). doi: 10.36718/1819-4036-2023-6-193-202.
12. Resnik S.L., Favetto G., Chifre J. & Fontan C.F. (1984). A World Survey of Water Activity of Selected Saturated Salt Solutions used as Standards at 25 °C. *Journal of Food Science*, 49(2), 510–513. doi:10.1111/j.1365-2621.1984.tb12454.x.

Информация об авторах

Ю.А. Ускова – аспирант кафедры «Зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий» ФГБОУ ВО

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23 августа 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 23 Aug 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

«РОСБИОТЕХ».

Р.Х. Кандров – к.т.н., доцент кафедры «Зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ».

REFERENCES

1. Misteneva, S.Yu., Soldatova, E.A. & Savenkova, T.V. (2019). Development of flour confectionery products using unrefined plant raw materials. *Food Industry*, 8, 66–71. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10129.
2. Bazarnova, Yu.G. (2014). *Theoretical foundations of methods for food research: Textbook*. St. Petersburg: NRU ITMO; IHiBT. 136 p.
3. Vasilieva, N.G. (2018). *Fundamentals of polymer chemistry: Textbook*. Minsk: BSPU. 169 p.
4. Stehle, R. (Ed.). (2006). *Shelf life of food: Calculation and testing* (V. Shirokov, Trans.; Yu.G. Bazarnova, Gen. Ed.). St. Petersburg: Professiya. 480 p.
5. Tsukanov, M.F. & Chernomorets, A.B. (2010). Technological aspects of the “Water Activity” indicator and its role in ensuring the quality of public catering products. *TTPS*, 11, 58–63.
6. Bashir, O., Hussain, S.Z., Ameer, K., Amin, T., Beenish, Ahmed, I.A.M., Aljobair, M.O., Gani, G., Mir, S.A., Ayaz, Q. & Nazir, N. (2023). Influence of Anticaking Agents and Storage Conditions on Quality Characteristics of Spray Dried Apricot Powder: Shelf Life Prediction Studies Using Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) Model. *Foods*, 12(1), 171. doi: 10.3390/foods12010171.
7. Podorozhnyaya, I.V., Vetokhin, S.S. & Orsik, M.V. (2015). Sorption isotherms of milk compositions. *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technologies, Biotechnology, Geocology*, 4 (177), 256–261.
8. Adamova, L.V. & Safronov, A.P. (2008). Sorption method for studying the porous structure of nanomaterials and the specific surface area of nanosized systems: Textbook. Yekaterinburg: UrGU. 62 p.
9. Kim, S.S., Kim, S.Y., Kim, D.W., Shin, S.G. & Chang, K.S. (1999). Moisture Sorption Characteristics of Composite Foods Filled with Chocolate. *Journal of Food Science*, 64(2), 300–302. doi: 10.1111/j.1365-2621.1999.tb15887.x.
10. Nayab, A.K., Valík, L., Ačai, P. (2024). Sorption isotherm modelling of dried tomatoes. *Czech, J. of Food Science*, 42, 21–30. doi: 10.17221/109/2023-CJFS.
11. Uskova, Yu.A. & Kandrov, R.Kh. (2023). Application of the simplex lattice design in modeling the formulation of ginger cookies. *The Bulletin of KrasGAU*, 6 (195). doi: 10.36718/1819-4036-2023-6-193-202.
12. Resnik, S.L., Favetto, G., Chifre, J. & Fontan, C.F. (1984). A World Survey of Water Activity of Selected Saturated Salt Solutions used as Standards at 25 °C. *Journal of Food Science*, 49(2), 510–513. doi:10.1111/j.1365-2621.1984.tb12454.x.

Information about the authors

Ю.А. Ускова - Postgraduate student at the Department of Grain, Baking and Confectionery Technologies, Russian Biotechnological University (ROSBIO-TECH).

Р.Х. Кандров - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Grain, Baking and Confectionery Technologies, Russian Biotechnological University (ROSBIO-TECH).



Научная статья

4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)

УДК664.8.022

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.021

EDN: TEDYDJ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛЮЦЕРНЫ ИЗМЕНЧИВОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Наталья Гаврошевна Ли ¹, Елена Павловна Иванова ²,
Алексей Николаевич Емельянов ³, Татьяна Анатольевна Ершова ⁴,
Тамара Алексеевна Сенотрусова ⁵, Владимир Алексеевич Лях ⁶,
Тамара Викторовна Левчук ⁷, Юлия Ивановна Мелишкевич ⁸

^{1, 4, 5, 6, 7, 8} Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

¹ li.ng@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4643-2250>

² Сахалинский НИИ сельского хозяйства – филиал ФИЦ «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова» (ВИР), Южно-Сахалинск, Россия,

² kirena2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3428-4235>

³ ФГБНУ "ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, Уссурийск, Россия, fe.smc_rf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7112-7856>

⁴ ershova.ta@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3996-9105>

⁵ senotrusova.ta@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0580-3235>

⁶ lyakh.va@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6999-2210>

⁷ levchuk.tv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1320-1787>

⁸ melishkevich.iui@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7498-7061>

Аннотация. В статье описывается опыт переработки люцерны на пищевые волокна и аминокислотный концентрат. Цель исследования – рассмотреть возможность использования переработки люцерны изменчивой (сорт Деметра, Находка, Сарга) для получения пищевых волокон. Задачи исследования: определить выход растворимых и нерастворимых пищевых волокон из люцерны изменчивой; определить содержание аминокислот в соке люцерны изменчивой. Выделение пищевых волокон люцерны осуществляли следующим образом. Люцерну разделяли на цветок, стебли и листья. Из листьев были получены две составные части – сок и жом (зеленая масса). В последующем сок являлся источником растворимых пищевых волокон и аминокислот, жом и стебли служили источником выделения нерастворимых пищевых волокон. В результате проведения анализа содержания нерастворимых пищевых волокон, полученных при переработке жома и стеблей люцерны, установлено, что массовая доля нерастворимых пищевых волокон люцерны составляла в диапазоне от 25 до 30 %. Наибольший выход нерастворимых пищевых волокон отмечен для сорта Находка, наименьший – для сорта Деметра. В соке люцерны были обнаружены незаменимые аминокислоты: аргинин, валин, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, треонин и фенилаланин, что позволяет использовать его как дополнительный источник обогащения сухих белковых смесей.

Ключевые слова: люцерна изменчивая, пищевые волокна, сырая клетчатка, растворимые пищевые волокна, аминокислоты, специализированные пищевые продукты.

Благодарности: Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект №FZNS-2022-0012, тема проекта «Разработка отечественных технологий сухих смесей, обогащенных витаминными комплексами, омега жирными кислотами с пробиотической активностью для лечебного перорального питания, в т.ч. детей и больных стационаров, совместно с R&D центром и на базе высокотехнологичного предприятия ООО "Арника"».

Для цитирования: Использование люцерны изменчивой для получения компонентов специализированных пищевых продуктов / Н.Г. Ли [и др.]. // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 137–142. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.021. EDN: <https://elibrary.ru/TEDYDJ>.

Original article

USE OF ALFALFA TO OBTAIN COMPONENTS OF SPECIALTY FOOD PRODUCTS

Natalya G. Li ¹, Elena P. Ivanova ², Alexey N. Emelyanov ³, Tatyana A. Ershova ⁴,
Tamara A. Senotrusova ⁵, Vladimir A. Lyakh ⁶, Tamara V. Levchuk ⁷,
Yulia I. Melishkevich ⁸

^{1, 4, 5, 6, 7, 8} Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

¹ li.ng@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4643-2250>

© Ли Н. Г., Иванова Е. П., Емельянов А. Н., Ершова Т. А., Сенотрусова Т. А., Лях В. А., Левчук Т. В., Мелишкевич Ю. И., 2025

² Sakhalin Research Institute of Agriculture - branch of the Federal Research Center "All-Russian Institute of Plant Genetic Resources named after N.I. Vavilov" (VIR), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, kirena2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3428-4235>

³ Federal State Budgetary Institution "FSC of Agrobiotechnologies of the Far East named after A.K. Chaika, Ussuriysk, Russia, fe.smc_rf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7112-7856>

⁴ ershova.ta@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3996-9105>

⁵ senotrusova.ta@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0580-3235>

⁶ lyakh.va@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6999-2210>

⁷ levchuk.tv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1320-1787>

⁸ melishkevich.iui@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7498-7061>

Abstract. The article describes the experience of processing alfalfa into dietary fiber and amino acid concentrate. The purpose of the study is to consider the possibility of using the processing of variable alfalfa (variety Demetra, Nakhodka, Sarga) to obtain dietary fiber. Research objectives: to determine the yield of soluble and insoluble dietary fiber from alfalfa; determine the content of amino acids in the juice of alfalfa. Isolation of alfalfa dietary fiber was carried out as follows. Alfalfa was divided into flower, stems and leaves. Two components were obtained from the leaves - juice and pulp (green mass). Subsequently, the juice was a source of soluble dietary fiber and amino acids; the pulp and stems served as a source of insoluble dietary fiber. As a result of analyzing the content of insoluble dietary fiber obtained from the processing of alfalfa pulp and stems, it was established that the mass fraction of insoluble Alfalfa dietary fiber was in the range of 25 to 30%. The highest yield of insoluble dietary fiber was noted for the Nakhodka variety, the lowest for the Demetra variety. Essential amino acids were found in alfalfa juice: arginine, valine, isoleucine, leucine, lysine, methionine, threonine and phenylalanine, which makes it possible to use it as an additional source of enrichment for dry protein mixtures.

Keywords: alfalfa, dietary fiber, crude fiber, soluble dietary fiber, amino acids, specialty foods.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FZNS-2022-0012, project theme "Development of domestic technologies for dry mixtures enriched with vitamin complexes, omega fatty acids with probiotic activity for therapeutic oral nutrition, including children and hospital patients, together with the R&D center and on the basis of the high-tech enterprise Arnika LLC."

For citation: Li, N.G., Ivanova, E.P., Emelyanov, A.N., Ershova, T.A., Senotrusova, T.A., Lyakh, V.A., Levchuk, T.V. & Melishkevich, Yu.I. (2025). Use of alfalfa to obtain components of specialty food products. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 137-142. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.021. EDN: <https://elibrary.ru/TEDYDJ>.

ВВЕДЕНИЕ

В XXI веке стремительно развиваются инновационные биотехнологии, разрабатываются новые источники энергии, продукты питания [1]. Упор делается на функциональные продукты (детские, диетические, спортивные, для лиц с ослабленным здоровьем и т.д.).

Клетчатка имеет решающее значение для сбалансированного корма животных и пищи человека. Согласно современным подходам к определению качества корма, стандартный анализ корма в настоящее время должен включать нейтрально-детергентную (НДК) и кислотно-детергентную (КДК) клетчатки. Авторами был рассмотрен фракционный состав углеводов в образцах зеленой массы многолетней культуры (тимофеевки) и однолетней (овса), отобранных в 2019 году на опытном поле ФГБОУ ВО Приморская ГСХА. Анализ проведен в ООО Научно-испытательный центр «Черкизово» (г. Москва) на автоматическом анализаторе клетчатки АНКОМ А2000. Установлено, что сумма гемицеллюз и целлюлозы у многолетней культуры тимофеевки выше на 7 %, чем у однолетнего овса (69 % против 62 %). Растительная масса тимофеевки содержит 75,1 % НДК, на 6,6 % уступает фитомассе овса [2].

Однако наибольший интерес представляют исследования по использованию растительных пищевых волокон в составе пищевых продуктов. Использование пищевых волокон находит в последнее время широкое применение не только в специализированных продуктах питания [3], но и в пищевых продуктах общего назначения [4]. Выявлена положительная связь между общим количеством пищевых волокон на каждую килокалорию энергии, поступающую с пищевыми продуктами, составом микробиома кишечника [5].

Различные исследователи показали, что люцерна может быть перспективным источником расти-

тельного белка для применения в нутрицевтической, фармацевтической и функциональной пищевой промышленности. Люцерна богата ценными питательными веществами, включая незаменимые аминокислоты, минералы, витамины и пищевые волокна [6].

Кроме того, белки люцерны содержат сбалансированный аминокислотный состав и обладают желательными техно-функциональными свойствами, включая удерживающие жидкость, эмульгирующие, пенообразующие и желирующие свойства, которые могут использоваться в широком спектре пищевых рецептур [7].

В связи с этим, актуальными являются исследования, направленные на создание пищевых продуктов функционального и специализированного профиля, обладающих профилактическим, диетическим и лечебным спектром действия за счет обогащения их состава жизненно необходимыми компонентами пищи (минеральные вещества, витамины и др.), позволяющим улучшить рацион благодаря его коррекции по дефицитным макро- и микронутриентам.

Люцерна – уникальное растение, благотворно воздействующее на органы и системы организма человека. В древности арабы называли люцерну прародительницей всей пищи, «основой всех благ», для многих народов она была и едой, и лекарством (её называли травой лечухой). Биолог Фрэнк Бовуэр определил, что зеленые листья люцерны содержат восемь эссенциальных аминокислот, невоспроизводимых человеческим организмом, назвав люцерну «великой целительницей». Кроме высоких урожайных и кормовых достоинств, люцерна является источником получения мёда, энзимов, биотоплива, сырья для пищевой, лекарственной, косметической промышленностей и т.д.

Современными исследованиями доказано, что люцерна повышает иммунитет, обладает антиоксидантным и антиканцерогенным действием. Она содер-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛЮЦЕРНЫ ИЗМЕНЧИВОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

жит как минимум один белок с доказанной противоопухолевой активностью и пищевые волокна, такие как пектин, которые связывают и нейтрализуют канцерогены в кишечнике. Многолетними исследованиями с люцерной, проведенными Ивановой Е.П., показано, что люцерна может занять достойное место в АПК Дальнего Востока [8]. Люцерна даёт энергонасыщенные высокобелковые корма. По данным большого количества анализов в различных регионах страны, в люцерне содержится (на сухую массу): 12–27 % сырого протеина, 2–4 % жира, 21–46 % клетчатки, 32–54 % БЭВ, 6–16 % золы [9].

Многолетними исследованиями подтверждены существенные различия между сортами люцерны по показателям качества. Нами в вегетационном периоде 2023 года на травостоях второго года жизни были продолжены исследования по агрэкологическому испытанию современных сортов люцерны различного эколого-географического происхождения в условиях ФГБНУ «ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки». В лаборатории агрохимических анализов указанного учреждения проведены химические анализы растительных образцов люцерны, результаты которых показали варьирование показателей качества по сортам люцерны. Так, в среднем по двум укосам содержание сырого протеина по сортам варьировало от 15,0 до 19,4 %, а содержание сырой клетчатки – от 17,7 до 22,3 %. Все изучаемые сорта показали достаточно высокую обеспеченность кормовой единицы переваримым протеином, в целом высокую питательную ценность.

С целью получения растворимых и нерастворимых пищевых волокон как компонента смесей сухих белковых для энтерального питания была выбрана люцерна изменчивая 3 сортов: сорта Находка, Сарга, Деметра.

Цель исследования – рассмотреть возможность использования переработки люцерны изменчивой для получения пищевых волокон. Задачи исследования: определить выход растворимых и нерастворимых пищевых волокон из 3 сортов люцерны изменчивой; определить содержание аминокислот в соке люцерны изменчивой.

МЕТОДЫ

Вегетативная часть люцерны второго укоса массой по 0,5 кг каждого сорта, произведенного в конце июля, была передана с опытного участка селекционного севооборота лаборатории полевого и лугопастбищного кормопроизводства ФГБНУ «ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки».

Выделение пищевых волокон люцерны осуществляли следующим образом. Люцерну разделяли на цветок, стебли и листья. Из листьев были получены две составные части – сок и жом (зеленая масса). В последующем сок являлся источником растворимых пищевых волокон и аминокислот, жом и стебли служили источником выделения нерастворимых пищевых волокон.

Для получения растворимых пищевых волокон и аминокислот листья люцерны измельчали, после чего прессовали. После прессования получали сок и жом. Сок выделялся очень интенсивно; это была темно-зеленая густая жидкость, по консистенции схожая с молоком, имеющая запах и вкус свежей травы. Сок фильтровали и нагревали при температуре 45–50 °C. Сгустившуюся массу пропускали через центрифугу 2 раза, сушили на вакуумной сублимационной сушилке FD-1A-50 и полученный сухой остаток измельчали в однородный порошок на планетарной шаровой мельнице QM-2A. В итоге получили основной продукт (2–3 % исходного сырья) зеленого цвета.

Для получения нерастворимых пищевых волокон стебель и жом люцерны перед обработкой высушивали и измельчали, а для обработки используют водный раствор азотной кислоты концентрацией от 0,3 до 0,5 % в течение 60 минут при гидромодуле 7–10. Затем нагревают при температуре 95–100 °C. Полученный продукт сушат при температуре 55–60 °C и измельчают до порошкообразного состояния на ножевой мельнице. При выборе условий выделения пищевых волокон было установлено, что наиболее значимыми параметрами являются: концентрация кислоты, гидромодуль, время обработки.

Пищевые волокна, получаемые по заявлению способу, представляют собой порошки серо-зеленого цвета с размером частиц 0,25–0,5 мм (рисунок 1).



Рисунок 1 – Нерастворимые пищевые волокна люцерны, полученные из жома и стеблей люцерны

Figure 1 – Insoluble dietary fiber from alfalfa, obtained from alfalfa pulp and stalks

Аминокислотный состав определяли с помощью методики М-04-94-2021, которая предназначена для измерений массовой доли 21 аминокислоты: двадцати протеиногенных и гидроксипролина в пробах пищевой продукции методом капиллярного электрофореза (КЭ) с использованием системы КЭ «КАПЕЛЬ®» [11].

Массовую долю сырой клетчатки определяли по ГОСТ 31675-2012 [12]. Метод основан на последовательной обработке навески испытуемой пробы растворами кислоты и щелочи, озолении и количественным определении органического остатка весовым методом. Содержание сырой клетчатки выражают в виде массовой доли в процентах или в граммах на 1 кг сухого вещества.

Массовую долю влаги определяли по ГОСТ 33331-2015 [13]. Метод основан на удалении (испарении) воды из навески исследуемого образца и определении изменения его массы взвешиванием. Диапазон измерений массовой доли воды от 5,0 % до 96,0 %.

Определение растворимых и нерастворимых пищевых волокон проводили ферментативно-гравиметрическим методом по ГОСТ Р 54014-2010 [14]. Метод основан на ферментативном гидролизе крахмальных и некрахмальных соединений с помощью α-амилазы, протеазы и амилоглюкозидазы до моно-, ди-, олигосахаридов и пептидов. Пищевые волокна осаждают этиловым спиртом, высушивают и определяют гравиметрическим методом. Общую массовую долю пищевых волокон выражают в процентах или (г/100 г).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведения анализа содержания нерастворимых пищевых волокон, полученных при переработке жома и стеблей люцерны, установлено, что массовая доля нерастворимых пищевых волокон люцерны состав-

ляла в диапазоне от 25 до 30 % (таблица 1). Наибольший выход нерастворимых пищевых волокон отмечен для сорта Находка, наименьший – для сорта Деметра.

Высокая сорбционная способность пищевых волокон является одним из важнейших их свойств. Благодаря этому свойству пищевые волокна могут связывать на своей поверхности не только молекулы воды, моносахарида, аминокислоты, холестерин, жирные кислоты, макро- и микроэлементы, витамины,

Таблица 1 – Содержание нерастворимых пищевых волокон в жоме и стеблях люцерны изменчивой

Table 1 – Content of insoluble dietary fiber in pulp and stems of alfalfa

Показатель	Сорт Находка	Сорт Деметра	Сорт Сарга
Массовая доля сырой клетчатки, %	30,1±2,4	18,1±1,8	25,2±1,5
Массовая доля влаги, %	8,4±0,7	9,0±0,7	8,8±0,7
Массовая доля сырой клетчатки (в пер. на а.с.в), %	32,9±2,6	19,9±1,9	28,6±2,4

Установлено, что наибольший выход нерастворимых и растворимых пищевых волокон (ПВ) отмечен для люцерны сорта Находка (рисунок 2).

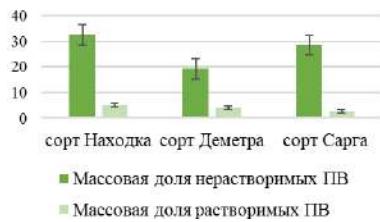


Рисунок 2 – Содержание нерастворимых и растворимых пищевых волокон, выделенных из люцерны

Figure 2 – Content of insoluble and soluble dietary fiber isolated from alfalfa

Ввиду того, что люцерна является источником растительного протеина, было проведено количественное определение аминокислотного состава сока, полученного в результате комплексной переработки люцерны изменчивой (сорт Деметра, Находка, Сарга). В соке люцерны были обнаружены такие незаменимые аминокислоты, как валин, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, треонин и фенилаланин (рисунок 3). Выявлено наличие незаменимой аминокислоты аргинин, которая является предшественником множества биологически активных молекул, таких как азотистый оксид (NO), пролин, креатин и др. Участвует в регуляции иммунной системы и сосудистого тонуса, синтезе протеинов, аммиака, мочевины.

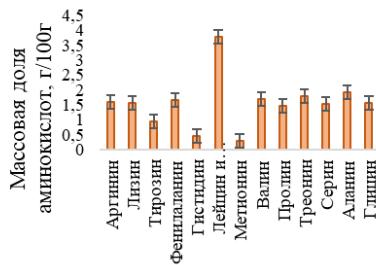


Рисунок 3 – Содержание аминокислот в соке люцерны

Figure 2 – Amino acid content in alfalfa juice

ОБСУЖДЕНИЕ

Растительные белки привлекают внимание виду роста экологических, этических и проблем безопасности, связанных с белками животного происхождения. Помимо этого, наиболее значимыми аллергенами

но и более крупные пищевые субстраты (белки).

Пищевые волокна также активно связывают пищеварительные ферменты, желчные кислоты, фармпрепараты, ксенобиотики, тяжелые металлы, токсические вещества, энтеротоксины бактерий, канцерогены и многие другие вещества. В литературных источниках отмечена высокая сорбционная способность нерастворимых пищевых волокон люцерны связывать желчные кислоты *in vitro*.

раннего возраста являются белки коровьего молока, которые входят в состав таких специализированных пищевых продуктов, как спортивное питание и детские сухие смеси. Замена животных белков растительными позволит решить эту проблему.

На сегодняшний день большинство растительных белков выделяют из пшеницы и соевых бобов, которые входят в группу большой восьмерки пищевых аллергенов.

Например, семена сои, согласно справочным данным, содержат приблизительно от 42,95 до 46,32 %, который включает несколько аминокислот (г/100 г белка), таких как аланин (3,59), аргинин (6,67), аспарагиновая кислота (10,2), цистин (1,46), глутаминовая кислота (17,45), глицин (3,6), гистидин (2,3), изолейцин (4,25), лейцин (6,78), лизин (5,33), метионин (1,13), фенилаланин (4,59), пролин (4,96), серин (4,59), треонин (3,14), триптофан (1,12), тирозин (3,22) и валин (4,1).

Различные фракции люцерны, включая сушеные листья, сушеные стебли, листовой сок, листовой жом, содержат разное количество белка. Сообщается, что содержание белка в сушеных листьях люцерны примерно в два раза больше, чем в сушеных стеблях люцерны [15]. Среди белков в листьях люцерны водорастворимые белки (альбумин) составляют основную фракцию (260 г/кг), в то время как солорастворимые белки (глобулин) составляют лишь незначительную фракцию (69 г/кг).

Растворимость является одним из важнейших свойств белков во многих пищевых продуктах, поскольку существенно влияет на их другие важные функциональные свойства, такие как связывание, эмульгирование, вспенивание и гелеобразование пищевой системы.

В исследовании авторов Lamsal и др. (2007) [16] сообщается, что температура термической денатурации белков люцерны составляет около 80 °С. Этот фактор важен, поскольку термическая денатурация белков влияет на их растворимость, загущение, гелеобразование, пенообразование и эмульгирующие свойства. В нашем исследовании для получения аминокислот сок люцерны фильтровали и нагревали при температуре 45–50 °С.

Для получения растворимых пищевых волокон и аминокислот сок, отделенный от жома, сушили способом вакуумной сублимационной сушки (лиофилизацию). Процесс сушки методом вакуумной сублимации осуществлялся с высокой скоростью в условиях минусовых температур (-50 °С) и низкого давления. Данные параметры обеспечивают максимальное сохранение аминокислот, что под-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛЮЦЕРНЫ ИЗМЕНЧИВОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

тврждено данными аминокислотного анализа, проведенного методом капиллярного электрофореза.

Содержание растворимых пищевых волокон, высокая доля водорастворимых белков, а также сбалансированный профиль аминокислот сока люцерны позволяют использовать его как дополнительный источник обогащения специализированных пищевых продуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время люцерну преимущественно используют в качестве кормовой добавки для сельскохозяйственных животных, и лишь незначительная роль ей отводится в секторе продуктов питания. Однако люцерна является перспективным источником высококачественных белков и аминокислот для использования в пищевых продуктах. Полученные результаты комплексной переработки люцерны изменчивой показали целесообразность использования данной культуры для получения растворимых и нерастворимых пищевых волокон, аминокислот с целью последующей фортификации специализированных и функциональных пищевых продуктов. В соке люцерны были обнаружены незаменимые аминокислоты: аргинин, валин, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, треонин и фенилаланин, что позволяет использовать его как дополнительный источник обогащения сухих белковых смесей. Люцерна является перспективным источником пищевых волокон. Массовая доля пищевых волокон люцерны составляла от 25 до 30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоренко О.Л. Биоконверсия вторичных продуктов агропромышленного комплекса : учебник. М. : ИНФРА-М, 2017. 296 с.
2. Иванова Е.П. Фракционный состав клетчатки в оценке качества современных кормов // Аграрный вестник Приморья. 2020. № 3 (19). С. 17–22.
3. Гаппарова К.М., Чехонина Ю.Г. Роль специализированных пищевых продуктов в диетотерапии ожирения // Вопросы диетологии. 2023. № 3. С. 50–54.
4. Королёв А.А., Корнева Л.Я., Коптяева И.С. Применение льна и люцерны в технологии пищевых концентратов // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2018. № 9 (9). С. 98–107.
5. Кобелькова И.В., Коростелева М.М. Влияние основных пищевых веществ на состав кишечного микробиома и оптимизацию адаптационного потенциала спортсмена // Наука и спорт: современные тенденции. 2022. Т. 10. № 2. С. 15–26.
6. Hadidi M., Hossienpour Y., Nooshkam M., Mahfouzi M., Gharagozlu M., Aliakbari F.S., McClement D.J. Green leaf proteins: a sustainable source of edible plant-based proteins // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. 64(29). Р. 10855–10872. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.222943>.
7. Kobbi S., Bougatef A., Le Flem G., Balti R., Michael C., Fertin B., Chaabouni S., Dhuilster P. & Nedjar N. Purification and Recovery of RuBisCO Protein from Alfalfa Green Juice: Antioxidative Properties of Generated Protein Hydrolysate. // Waste and Biomass Valorization. 2017. 8(2). Р. 493–504. DOI:10.1007/s12649-016-9589-y.
8. Иванова Е.П. Проблемы и перспективы возделывания люцерны на Дальнем Востоке // Кормопроизводство. 2021. № 7. С. 26–29.
9. Смирнов В.А. Люцерна // Биоклиматология бобовых и злаковых трав. Л. : Гидрометеоиздат, 1981. С. 18–36.
10. Сорта кормовых культур селекции ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агрэкологии имени В.Р. Вильямса» : монография / ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса». М. : ООО «Угрешская Типография», 2019. 92 с.
11. Методика М-04-94-2021 Определение аминокислот в пищевой продукции. (ФР.1.31.2022.43167). URL: https://www.lumex.ru/complete_solutions/22aru03_12_21.php. (дата обращения: 24.04.2024).
12. ГОСТ 31675-2012 Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации (Переиздание): введ. 2013-07-01. Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт» (дата обращения: 24.04.2024). <https://docs.cntd.ru/document/1200097397>.
13. ГОСТ 33331-2015 Водоросли, травы морские и продукция из них. Методы определения массовой доли воды, золы и посторонних примесей (с Поправкой): введ. 2017-01-01. Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт» (дата обращения: 24.04.2024). <https://docs.cntd.ru/document/1200123368>.
14. ГОСТ Р 54014-2010 Продукты пищевые функциональные. Определение растворимых и нерастворимых пищевых волокон ферментативно-гравиметрическим методом (Переиздание): введ. 2012-01-01. Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт» (дата обращения: 24.04.2024). <https://docs.cntd.ru/document/1200082847>.
15. Firdaus L., Dhuilster P., Amiot J., Gaudreau A., Lecouturier D., Kapel R., Lutin F., Vézina L-Ph., Bazinet L. Concentration and selective separation of bioactive peptides from an alfalfa white protein hydrolysate by electrodialysis with ultrafiltration membranes // Journal of Membrane Science. 329(1-2). 2009. Р. 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.12.012>.
16. Lamsa B.P., Koegel R.G. & Gunasekaran S. Some physicochemical and functional properties of alfalfa soluble leaf proteins // LWT - Food Science and Technology, 40(9). 2007. Р. 1520–1526. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.11.010>.

Информация об авторах

Н. Г. Ли – кандидат технических наук, доцент кафедры пищевой и клеточной инженерии Факультета агропищевых биотехнологий и пищевой инженерии, Передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем» ДВФУ.

Е. П. Иванова – кандидат с.-х. наук, доцент, старший научный сотрудник, Сахалинский НИИ сельского хозяйства – филиал ФИЦ «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова» (ВИР).

А. Н. Емельянов – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник по специальности 06.01.09 – «Растениеводство», директор ФГБНУ "ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки".

Т. А. Ершова – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой пищевой и клеточной инженерии Факультета агропищевых биотехнологий и пищевой инженерии, Передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем» ДВФУ.

Т. А. Сенотрусова – кандидат технических наук, доцент кафедры пищевой и клеточной инженерии Факультета агропищевых биотехнологий и пищевой инженерии, Передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем» ДВФУ.

В. А. Лях – кандидат технических наук, декан Факультета агропищевых биотехнологий и пищевой инженерии, Передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем» ДВФУ.

Т. В. Левчук – кандидат технических наук, доцент кафедры пищевой и клеточной инженерии Факультета агропищевых биотехнологий и пищевой инженерии, Передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем» ДВФУ.

Ю. И. Мелишкевич – младший научный сотрудник, аспирант кафедры пищевой и клеточной инженерии Факультета агропищевых биотехнологий и пищевой инженерии, Передовая инженерная школа «Институт биотехнологий, биоинженерии и пищевых систем» ДВФУ.

REFERENCES

1. Sidorenko, O.L. (2017). Biokonversija vtorichnyh produktov agropromyshlennogo kompleksa: Uchebnik. M. : INFRA-M. (In Russ.).
2. Ivanova, E.P. Frakcionnyj sostav kletchatki v otsenke kachestva sovremennoy kormov. *Agrarnyj vestnik Primor'ja*, 2020, (19), 17-22. (In Russ.).
3. Gapparova, K.M. & Chehonina, Ju.G. Rol' specializirovannyh pishhevyh produktov v dietoterapii ozhireniya. *Voprosy dietologii*, 2023, (3), 50-54. (In Russ.).
4. Koroljov, A.A., Korneva, L.Ja. & Koptjaeva, I.S. Primenenie l'na i l'jucerny v tehnologii pishhevyh koncentratov. *Innovacionnye tehnologii proizvodstva i hranenija material'nyh cennostej dlya gosudarstvennyh nuzhd*, 2018, (9), 98-107. (In Russ.).
5. Kobel'kova, I.V. & Korosteleva, M.M. Vlijanie osnovnyh pishhevyh veshhestv na sostav kishechnogo mikrobioma i optimizaciju adaptacionnogo potenciala sportsmena. *Nauka i sport: sovremennye tendencii*, 2022, (10), 15-26. (In Russ.).
6. Hadidi, M., Hossienpour, Y., Nooshkam, M., Mahfouzi, M., Gharagozlu, M., Aliakbari, F.S., McClement, D.J. Green leaf proteins: a sustainable source of edible plant-based proteins // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. 64(29). P. 10855-10872. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.222943>.
7. Kobbi, S., Bougatef, A., Le flem, G., Balti, R., Michael, C., Fertin, B., Chaabouni, S., Dhuister, P. & Nedjar, N. Purification and Recovery of RuBisCO Protein from Alfalfa Green Juice: Antioxidative Properties of Generated Protein Hydrolysate // *Waste and Bio-mass Valorization*. 2017. 8(2). P. 493-504. DOI:10.1007/s12649-016-9589-y.
8. Ivanova, E.P. Problemy i perspektivy vozdelyvaniya l'jucerny na Dal'nem Vostoke. *Kormoproizvodstvo*, 2021, (7), 26-29. (In Russ.).
9. Smirnov, V.A. Ljucerna. *Bioklimatologija bobovyh i zlakovyh trav*. L.: *Gidrometeoizdat*, 1981, 18-36. (In Russ.).
10. Sorta kormovyh kul'tur selekcii FGBNU «Federal'nyj nauchnyj centr kormoproivodstva i agroekologii imeni V.R. Vil'jamsa» : monografija / FNC «VIK im. V.R. Vil'jamsa». M. : OOO «Ugreshskaja Tipografija», 2019. 92 s. (In Russ.).
11. Metodika M-04-94-2021 Opredelenie aminokislot v pishhevoj produkci. (FR.1.31.2022.43167). Retrieved from URL : https://www.lumex.ru/complete_solutions/22aru03_12_21.php (data obrashhenija: 24.04.2024). (In Russ.).
12. GOST 31675-2012 Korma. Metody opredelenija soderzhanija syroj kletchatki s primeneniem promezhutochnoj fil'tracii (Pereizdanie): vved. 2013-07-01. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Tehjekspert» (data obrashhenija : 24.04.2024). Retrieved from <https://docs.cntd.ru/document/1200097397>. (In Russ.).
13. GOST 33331-2015 Vodorosli, travy morskie i produkcija iz nih. Metody opredelenija massovoj doli vody, zoly i postoronnih primej (s Popravkoj): vved. 2017-01-01. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Tehjekspert» (data obrashhenija: 24.04.2024). Retrieved from <https://docs.cntd.ru/document/1200123368>. (In Russ.).
14. GOST R 54014-2010 Produkty pishhevye funkcional'nye. Opredelenie rastvorimyh i nerastvorimyh pishhevyh volokon fermentativno-gravimetriceskim metodom (Pereizdanie): vved. 2012-01-01. Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Tehjekspert» (data obrashhenija: 24.04.2024). Retrieved from <https://docs.cntd.ru/document/1200082847>. (In Russ.).
15. Firdaus, L., Dhuister, P., Amiot, J., Gaudreau, A., Lecoutier, D., Kapel, R., Lutin, F., Vézina, L-Ph., Bazinet, L. Concentration and selective separation of bioactive peptides from an alfalfa white protein hydrolysate by electrodialysis with ultrafiltration membranes // *Journal of Membrane Science*. 329(1-2). 2009. P. 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.12.012>.
16. Lamsal, B.P., Koegel, R.G. & Gunasekaran, S. Some physicochemical and functional properties of alfalfa soluble leaf proteins // *LWT - Food Science and Technology*, 40(9). 2007. P. 1520-1526. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.11.010>.

Information about the authors

N.G. Li - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food and Cellular Engineering of the Faculty of Agro-Food Biotechnologies and Food Engineering, Advanced Engineering School "Institute of Biotechnology, Bioengineering and Food Systems" FEFU.

E.P. Ivanova - candidate of agricultural sciences Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Sakhalin Research Institute of Agriculture - branch of the Federal Research Center "All-Russian Institute of Plant Genetic Resources named after. N.I. Vavilov" (VIR).

A.N. Emelyanov - candidate of agricultural sciences Sciences, senior researcher, specialty 01/06/09 - "Crop Growing", Director of the Federal State Budgetary Institution "FSC of Agrobiotechnologies of the Far East named after A.K. Chaika.

T.A. Ershova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Food and Cellular Engineering of the Faculty of Agro-Food Biotechnologies and Food Engineering, Advanced Engineering School "Institute of Biotechnologies, Bioengineering and Food Systems" FEFU.

T.A. Senotrusova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food and Cellular Engineering of the Faculty of Agro-Food Biotechnologies and Food Engineering, Advanced Engineering School "Institute of Biotechnology, Bioengineering and Food Systems" FEFU.

V.A. Lyakh - Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Agro-Food Biotechnologies and Food Engineering, Advanced Engineering School "Institute of Biotechnology, Bioengineering and Food Systems" FEFU.

T.V. Levchuk - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food and Cellular Engineering, Faculty of Agro-Food Biotechnology and Food Engineering, Advanced Engineering School "Institute of Biotechnology, Bioengineering and Food Systems" FEFU.

Yu.I. Melishkevich - junior researcher, graduate student of the Department of Food and Cellular Engineering, Faculty of Agro-Food Biotechnologies and Food Engineering, Advanced Engineering School "Institute of Biotechnology, Bioengineering and Food Systems" FEFU.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06 мая 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принятая к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 06 May 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 544.032.65

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.022

 EDN: YLCJY

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 30ХГСА

Денис Сергеевич Клементьев¹, Игорь Васильевич Минаев²,
Александр Николаевич Чуканов³, Сергей Стефанович Гончаров⁴,
Сергей Николаевич Кутепов⁵

^{1, 3, 5} Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула, Россия

¹ denis.klementev.93@mail.ru

³ alexchukanov@yandex.ru

⁵ kutepovsn@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3866-5556>

⁴ Тульский государственный университет, Тула, Россия

⁴ gss160154@yandex.ru

² ООО Научно-производственное предприятие «Телар», Тула, Россия

² ivminaev1960@yandex.ru

Аннотация. В работе исследовали влияние режимов лазерного микроструктурирования волоконного лазера непрерывного действия (оснащенным гальваносканатором) на изменение структуры, фазового состава, содержание углерода и физико-механических свойств (микротвердости, остаточных напряжений) поверхностного слоя деталей, изготовленных из листовой горячекатаной среднелегированной стали марки 30ХГСА. Лазерному микроструктурированию подвергали поверхности непосредственно после газолазерной резки и последующего механического шлифования, которое проводили с целью удаления зоны газолазерного термического воздействия. При задании различных режимов лазерного микроструктурирования варьировали мощность лазерного излучения, скорость перемещения и «плотность заливки» (перекрытие соседних лазерных дорожек, в %) лазерного луча, частоту колебаний гальваносканатора, число проходов лазерного луча по осям *x* и *y*. Было установлено, что в результате лазерного микроструктурирования на поверхности формируется упрочненный белый слой, состоящий из бесструктурного мартенсита и имеющий повышенное содержание углерода порядка 0,60–0,81 %. Микротвердость данного слоя в 3,8–4,4 раза больше микротвердости матрицы основного металла. Увеличение содержания углерода связывали с реализацией эффекта термодиффузии. Выявлено, что на толщину белого слоя значительное влияние оказывают скорость перемещения лазерного луча и частота колебаний гальваносканатора. Оптимальное качество поверхности обеспечивается при скорости перемещения развертки лазерного излучения 250 мм/мин и частоте колебаний 50 Гц, что соответствует площади поглощения лазерного излучения обрабатываемой поверхности в единицу времени, не менее 150 мм²/сек. Показано, что при использовании в качестве финишной операции лазерного микроструктурирования вне зависимости от состояния обрабатываемой поверхности (после газолазерной резки, после механического шлифования) происходит формирование зоны лазерного воздействия, характеризуемой высокой микротвердостью, малой протяженностью и мартенситной структурой. Установлено, что лазерное микроструктурирование поверхности газолазерного реза приводит к формированию в ней сжимающих остаточных макронапряжений величиной до 1702 МПа.

Ключевые слова: сталь 30ХГСА, лазерное микроструктурирование, зона лазерного воздействия, белый слой, микротвердость, бесструктурный мартенсит, концентрация углерода, термодиффузия.

Благодарности: авторы выражают признательность коллегам за помощь.

Для цитирования: Влияние лазерного микроструктурирования на качество поверхностного слоя деталей из стали марки 30ХГСА / Д. С. Клементьев [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 143–151. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.022. EDN: <https://elibrary.ru/YLCJY>.

Original article

INFLUENCE OF LASER MICROSTRUCTURE ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF SURFACE LAYER OF PARTS MADE OF 30KhGSA STEEL

Denis S. Klementyev ¹, Igor V. Minaev ², Alexander N. Chukanov ³,
Sergey S. Goncharov ⁴, Sergey N. Kuteporov ⁵

^{1, 3, 5} Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy, Tula, Russia

¹ denis.klementev.93@mail.ru

³ alexchukanov@yandex.ru

⁵ kutepovsn@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3866-5556>

⁴ Tula State University, Tula, Russia

⁴ gss160154@yandex.ru

² LLC Scientific and production Enterprise «Telar», Tula, Russia

² ivminaev1960@yandex.ru

Abstract. The work investigated the effect of laser microstructuring modes of a continuous-acting fiber laser (equipped with a galvanoscanator) on changes in the structure, phase composition, carbon content and physico-mechanical properties (microhardness, residual stresses) of the surface layer of parts made of hot-rolled medium-alloy sheet steel grade 30KhGSA. The surfaces were subjected to laser microstructuring immediately after gas laser cutting and subsequent mechanical grinding, which was carried out in order to remove the zone of gas laser thermal exposure. When setting different modes of laser microstructuring, the power of laser radiation, the speed of movement and the "fill density" (overlap of neighboring laser paths, in %) of the laser beam, the oscillation frequency of the galvanoscanator, and the number of passes of the laser beam along the x and y axes varied. It was found that as a result of laser microstructuring, a hardened white layer is formed on the surface, consisting of it is made of structureless martensite and has an increased carbon content of about 0.60-0.81 %. The microhardness of this layer is 3.8-4.4 times greater than the microhardness of the base metal matrix. The increase in carbon content was associated with the realization of the thermodiffusion effect. It is revealed that the thickness of the white layer is significantly influenced by the speed of movement of the laser beam and the oscillation frequency of the galvanoscanator. The optimal quality of the surface layer is ensured at a laser scanning speed of 250 mm/min and an oscillation frequency of 50 Hz, which corresponds to the absorption area of the laser radiation of the treated surface per unit time of at least 150 mm²/sec. It is shown that when using laser microstructuring as a finishing operation, regardless of the condition of the treated surface (after gas laser cutting, after mechanical grinding), a laser impact zone is formed, characterized by: high microhardness; small length and martensitic structure. It has been established that laser microstructuring of the surface of a gas laser cut leads to the formation of compressive residual macro stresses in it up to 1702 MPa.

Keywords: 30KhGSA steel, laser microstructuring, laser exposure zone, white layer, microhardness, structureless martensite, carbon concentration, thermal diffusion.

Acknowledgements: the authors express gratitude to his / her colleagues for their help.

For citation: Klementev, D.S., Minaev, I.V., Chukanov, A.N., Goncharov, S.S. & Kuteporov, S.N. (2025). Influence of laser microstructure on structure and properties of surface layer of parts made of 30KhGSA steel. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 143-151. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.022. EDN: <https://elibrary.ru/YLCJY>.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Национальной технологической инициативе (НТИ), в России до 2035 г. выбран курс на создание, развитие и продвижение передовых технологий, обеспечивающих приоритетные позиции отечественных компаний на формируемых глобальных рынках [1]. Поэтому решение вопросов повышения надежности и долговечности ответственных изделий, работающих в экстремальных условиях при переменных контактных, ударных, статических нагрузках, требует применения современных высокопрочных материалов и конструкционных решений. Обеспечить необходимые параметры изделия можно путем изменений состояния поверхностного слоя стали.

В настоящее время большое внимание уделяется развитию технологий поверхностного упрочнения [2, 3], так как именно состояние поверхности во многом определяет уровень прочности и эксплуатационные свойства деталей машин, технологической оснастки и режущего инструмента. При этом достижение необходимых характеристик поверхностного слоя обеспечивается как за счет изменения его химического состава, так и за счет

изменения фазового и структурного состояний по сравнению с сердцевиной. Одной из быстроразвивающихся технологий поверхностного упрочнения, основанной на использовании высококонцентрированных потоков энергии, является лазерная термообработка, применяемая для упрочнения рабочего инструмента и деталей, таких как прокатные валки, ролики, штампы.

На режимах, не вызывающих разрушение материала, реализуются различные процессы лазерной обработки – поверхностная лазерная закалка, лазерный отпуск и отжиг, лазерная резка, нано- и микроструктурирование, нанесение покрытий и лазерное легирование. Однако, несмотря на имеющийся научный задел, указанные виды лазерных обработок нельзя отнести к универсальным технологическим процессам упрочнения металлических изделий. Это обусловлено, с одной стороны, сложностью и недостаточной изученностью структурных и фазовых превращений, происходящих в упрочняемых зонах различных материалов, а с другой стороны, необходимостью научно обоснованной оптимизации режимов облучения в зависимости от геометрии рабочей части

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 30ХГСА

инструмента, химического состава и предшествующей термообработки упрочняемого материала. Так, в частности, при лазерной обработке происходят те же фазовые и структурные превращения, которые имеют место и при обычных условиях нагрева, однако в связи со сверхбыстрым нагревом и сверхбыстрым охлаждением должны проявляться некие особенности. Без их рассмотрения невозможно напрямую применить представления, которые вытекают из диаграмм фазового равновесия [4].

Структурные и фазовые изменения в сталях при воздействии лазерного излучения определяются, с одной стороны, энергетическими параметрами излучения, с другой стороны, – характеристиками и свойствами обрабатываемого материала [5]. В связи с этим представляет интерес оценить влияние различных параметров процесса лазерной обработки на распределение микротвердости и фазовый состав зоны лазерного воздействия.

Цель настоящей работы – изучить влияния режимов лазерного микроструктурирования на изменение структуры, фазового состава, содержание углерода и физико-механических свойств поверхностного слоя деталей, изготовленных из листовой горячекатаной среднелегированной стали марки 30ХГСА.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования была выбрана листовая (толщиной 4 мм) горячекатаная конструкционная среднелегированная сталь марки 30ХГСА. Из данной стали методом газолазерной резки (ГЛР) были изготовлены специальные образцы (рис. 1) в виде квадратных пластин размером 35×35 мм.

ГЛР осуществляли с применением волоконного

Таблица 1 – Режимы лазерного микроструктурирования образцов

Table 1 – Modes of laser microstructuring of samples

Параметры лазерного микроструктурирования	Страна обработки			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Режим № 1				
Мощность, Вт	1400	1400	1200	1200
Частота колебаний гальваносканатора, Гц	200	200	50	50
«Плотность заливки» (перекрытие соседних лазерных дорожек, в %)	83	83	96	96
Ширина развертки, мм	50	50	50	50
Скорость перемещения лазерного луча, мм/мин	1000	1000	250	250
Число проходов по оси x, шт.	1	1	1	1
Режим № 2				
Мощность, Вт	1400	1400	1200	1200
Частота колебаний гальваносканатора, Гц	200	200	50	50
«Плотность заливки» (перекрытие соседних лазерных дорожек, в %)	83	83	96	96
Ширина развертки, мм	50	50	50	50
Скорость перемещения лазерного луча, мм/мин	1000	1000	250	250
Число проходов по оси x, шт.	1	1	1	1
Число проходов по оси y, шт.	1	1	1	1

Рабочие поверхности образцов (стороны №№ 1–4) после ЛМС были подвергнуты металлографическим исследованиям, механическим испытаниям (дюрометрия) с целью выявления изменений структуры, химического и фазового состава, остаточных напряжений, а также протяженности и физико-механических свойств (микротвердость) зоны лазерного воздействия (ЗЛВ).

Микроструктуру матрицы основного металла и ЗЛВ анализировали до и после травления водным раствором $\text{CuSO}_4 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ-1С» и сканирующем электронном микро-

лазера непрерывного действия, снабженного оптической головкой ЭИП1119 производства НТО «ИРЭ-Полюс» по следующему режиму: (мощность – 800 Вт; скорость – 1700 мм/мин; давление вспомогательного газа (кислород) – 1,0 атм; положение фокального пятна – (+4,0 мм); диаметр сопла – 1,0 мм).

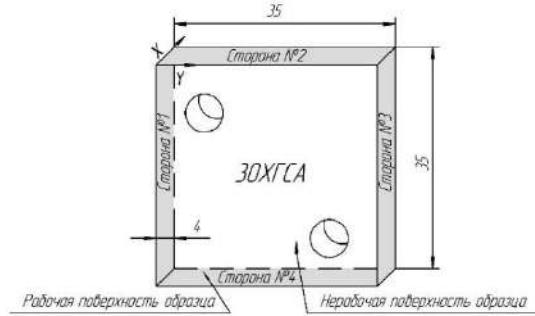


Рисунок 1 – Эскиз образца для исследования; заливкой указаны поверхности лазерного микроструктурирования

Figure 1 – Sketch of a sample for research; the filling indicates the surfaces of laser microstructuring

После ГЛР две поверхности (стороны: № 1 и № 4) исследуемых образцов были подвергнуты механической обработке (шлифованию) с целью удаления зоны лазерного воздействия (1 мм), формируемой в процессе газолазерной резки материала [6].

Далее по режимам, представленным в таблице 1, с использованием волоконного лазера непрерывного действия, оснащенного гальваносканатором, было выполнено лазерное микроструктурирование (ЛМС) поверхностей (сторон № 1–4).

Микротвердость по Виккерсу определяли в ЗЛВ скопе JEOL «JSM 6390» методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Перед микроструктурными исследованиями поверхность образцов шлифовали и полировали. Шлифование производили металлографической бумагой с крупным (№№ 60–70) и мелким зерном (№ 220–240). Смывали частицы абразива водой и подвергали полированию на круге супензиями из оксидов металла (Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , Al_2O_3). После достижения зеркального блеска поверхность шлифа промывали водой, спиртом и просушивали фильтровальной бумагой.

Микротвердость по Виккерсу определяли в ЗЛВ

в соответствии с ГОСТ 2999-75 с помощью твердометра KBW1-V при нагрузке 0,1 Н (10 г) и выдержке под нагрузкой в течение 15 с. За протяженность ЗЛВ (L) принимали расстояние от рабочей поверхности до слоя с постоянным значением микротвердости.

Спектральный анализ химического состава материала образцов выполнили методом атомно-эмиссионного спектрального анализа (ГОСТ Р 54153-2010 «Сталь. Метод атомно-эмиссионного спектраль-

Таблица 2 – Результаты спектрального анализа химического состава образца-эталона исследуемой стали
Table 2 – The results of the spectral analysis of the chemical composition of the reference sample of the steel under study

Массовая доля элементов, в %							
C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu
По данным атомно-эмиссионного анализа							
0.297	0.971	0.915	0.912	0.002	0.015	0.010	0.015
По данным ГОСТ 4543-2016							
0.28–0.34	0.90–1.20	0.80–1.10	0.80–1.10	Не более 0.025	Не более 0.025	Не более 0.30	Не более 0.3

Полуколичественный химический анализ рабочих поверхностей образцов (от лазерно-обработанной поверхности в центр образца) проводили на сканирующем электронном микроскопе JEOL «JSM 6390» с использованием рентгеновского спектрометра BRUKER «QUANTEXXQX1».

Прибор калибровали по линии Cu K α 8,040 кэВ в вакууме с ускоряющим напряжением 20 кВ. Измерения спектров проводили в направлении поперёк торцевых поверхностей образцов (режим BSE). Фиксировали общий участок плана и участок съёмки спектров при заданном увеличении. Для каждого образца измеряли: а) 2 спектра ЭДС на линии по точкам площадью 1,2 мкм каждая на расстоянии равном 10 мкм; б) 1 спектр точечно. С помощью ПО ESPRITCOMPACT анализировали результаты и фиксировали средний элементный состав в каждой размеченной точке.

Рентгеноструктурные исследования с целью определения содержания углерода, знака и величины остаточных напряжений первого рода (макронапряжений) проводили с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-4.0 в кобальтовом K α -излучении в режиме дискретной съёмки по точкам.

Съёмку дифрактограмм проводили на всех торцевых поверхностях/сторонах №№ 1–4 образцов (рис. 1) при полном перекрытии рентгеновским лучом указанных поверхностей.

Известно, что рентгеновские линии мартенсита расщепляются на дублеты. Это имеет место при содержании углерода в мартенсите более 0,8 %. Оценку содержания углерода в мартенсите в этом случае проводят по величине междудублетного расстояния. Его измеряют непосредственно на дифрактограмме. Далее, с помощью предварительно теоретически построенного графика зависимости междудублетного расстояния от содержания углерода определяют количество углерода в мартенсите исследуемого объекта. Однако в низко- и среднеуглеродистых сталях, с содержанием углерода менее 0,8 %, дублет не разрешается. Имеет место уширение дифракционных линий мартенсита. Определение содержания углерода в мартенсите в этом случае проводят по величине физического уширения [7, 8].

В данной работе определение концентрации углерода в стали 30ХГСА проводили по величине физического уширения [7]. При этом учитывали, что изменение количества растворенного в мартенсите углерода сопровождается изменением интегральной ширины линии дифрактограммы.

ного анализа) с помощью атомно-эмиссионного спектрального анализатора MCALI.

Результаты спектрального анализа представлены в таблице 2.

Сравнение полученных результатов показало, что образец (эталон) исследованной стали по химическому составу соответствует стали марки 30ХГСА в соответствии с ГОСТ 4543-2016 «Металлопродукция из конструкционной легированной стали».

Таблица 2 – Результаты спектрального анализа химического состава образца-эталона исследуемой стали

Table 2 – The results of the spectral analysis of the chemical composition of the reference sample of the steel under study

Предварительный анализ на основе единичных рефлексов показал наличие в образце фаз: α -Fe, FeO и Fe_3O_4 . Мартенситный дублет (110)-(101) не фиксировался.

Для определения содержания углерода предварительно строили тарировочный график зависимости $\Delta\theta=f(C)$ [9].

Для этого с помощью формулы (1) рассчитывали теоретические углы θ для линий тетрагональных дублетов мартенсита (101) и (110):

$$\sin^2\theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} (H^2 + K^2 + L^2 \frac{a^2}{c^2}), \quad (1)$$

где c и a – параметры решетки мартенсита; λ – длина волны, HKL – индексы интерференции, равные произведению соответствующих индексов плоскости (hkl) на порядок отражения n ($H = nh$, $K = nk$, $L = nl$). Для кобальтового излучения, использованного в данном исследовании, рассчитали теоретические углы θ для линий тетрагональных дублетов (110) и (101) при разных заданных содержаниях углерода (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 %C).

Параметры решетки мартенсита c и a в зависимости от содержания углерода рассчитывали по формулам 2 и 3 [7]:

$$c = 2,8664 + 0,118P; \quad (2)$$

$$a = 2,8664 - 0,015P, \quad (3)$$

где P – содержание углерода, %.

По рассчитанным углам θ определяли значения $\Delta\theta$ для линий (110) и (101) при разных содержаниях углерода и строили зависимость (4):

$$\Delta\theta = \theta_{\{110\}} - \theta_{\{101\}} = f(P). \quad (4)$$

С учетом поправок на легирующие элементы [8] параметры решетки мартенсита c и a в стали марки 30ХГСА рассчитывали в соответствии с выражениями (5) и (6):

$$c = 2,8664 - 0,001\text{Si} + 0,0005\text{Cr} + 0,0002\text{Mn} + 0,118P; \quad (5)$$

$$c = 2,8664 - 0,001\text{Si} + 0,0005\text{Cr} + 0,0002\text{Mn} - 0,015P; \quad (6)$$

В результате были рассчитаны теоретические углы θ для линий тетрагональных дублетов (110) и (101), при разных заданных содержаниях углерода (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 %C) и построен график (рис. 2).

Содержание углерода в исследуемой стали определяли с помощью расчетов физического уширения. Физическое уширение β определяли, как (7):

$$\beta = \sqrt{B'^2 - B^2}, \quad (7)$$

где B' и B – ширина кривой распределения интенсивности на половине высоты максимума (половиширина) исследуемого образца и эталона.

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 30ХГСА

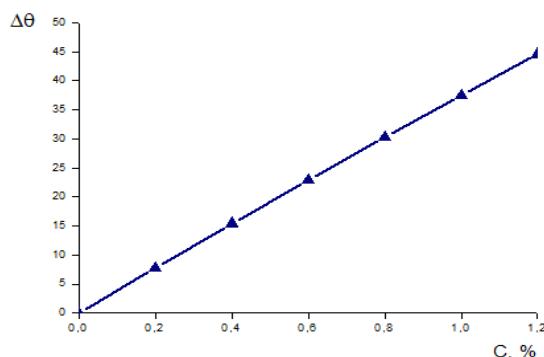


Рисунок 2 – График зависимости междублетного расстояния от содержания углерода в стали 30ХГСА

Figure 2 – Graph of the dependence of the inter-unit distance on the carbon content in steel 30KhGSA

За величины B' и B принимали ширину кривой распределения интенсивности на половине высоты максимума (половина ширины) исследуемого образца и эталона соответственно. За эталон принимался отожженный образец. За междублетное расстояние принимали величину физического уширения.

Помимо определения содержания углерода в мартенсите поверхностных слоев после ЛМС определяли величину остаточных макронапряжений в образцах методом $\sin^2\psi$ [10].

После съемки на дифрактометре величину остаточных напряжений рассчитывали по формуле (8):

$$\sigma = E \left| (1 + \mu) \sin^2\psi \times \sin\theta - \sin\theta \sin\theta_\psi \right| \sin\theta_\psi, \quad (8)$$

где μ – коэффициент Пуассона ($\mu=0,293$); E – модуль

упругости ($E=210000$ МПа).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием металлографического анализа установлено, что микроструктура ЗЛВ рабочих поверхностей после ЛМС состоит из двух слоев – нетравящегося (слаботравящегося) белого слоя и непосредственно примыкающей к нему зоны термического влияния (ЗТВ) [5, 11], представляющей собой зону закалки из твердой фазы и переходную зону (зона отпуска). Также следует отметить, что после проведения ЛМС, в два прохода (режим № 2, таблица 1), на сторонах, подвергнутых предварительному механическому шлифованию, ЗТВ отсутствовала (рис. 3, б).

Основной структурной составляющей как белого слоя, так и ЗТВ является мартенсит (рис. 3, а), причем для белого слоя характерно наличие высокотвердого, бесструктурного мартенсита (рис. 3, в). Структура основного металла представляет собой ферритно-перлитную смесь.

Из анализа результатов измерения микротвердости (таблица 3) видно, что высокие скорость перемещения лазерного луча и частота колебаний гальвансканатора (стороны № 1 и № 2) не обеспечивают получение высоких значений микротвердости. Это обусловлено тем фактом, что при таком режиме обработки белый слой имеет прерывистую структуру.

Анализ зависимости микротвердости на рабочих поверхностях образцов (стороны №№ 1–4) от числа проходов ЛМС по осям (x и y), показал отсутствие существенного влияния числа проходов на прирост показателей микротвердости. В целом, по сравнению с матрицей основного металла, микротвердость белого слоя увеличивается в 3,8…4,4 раза; ЗТВ – в 1,2…3,8 раза.

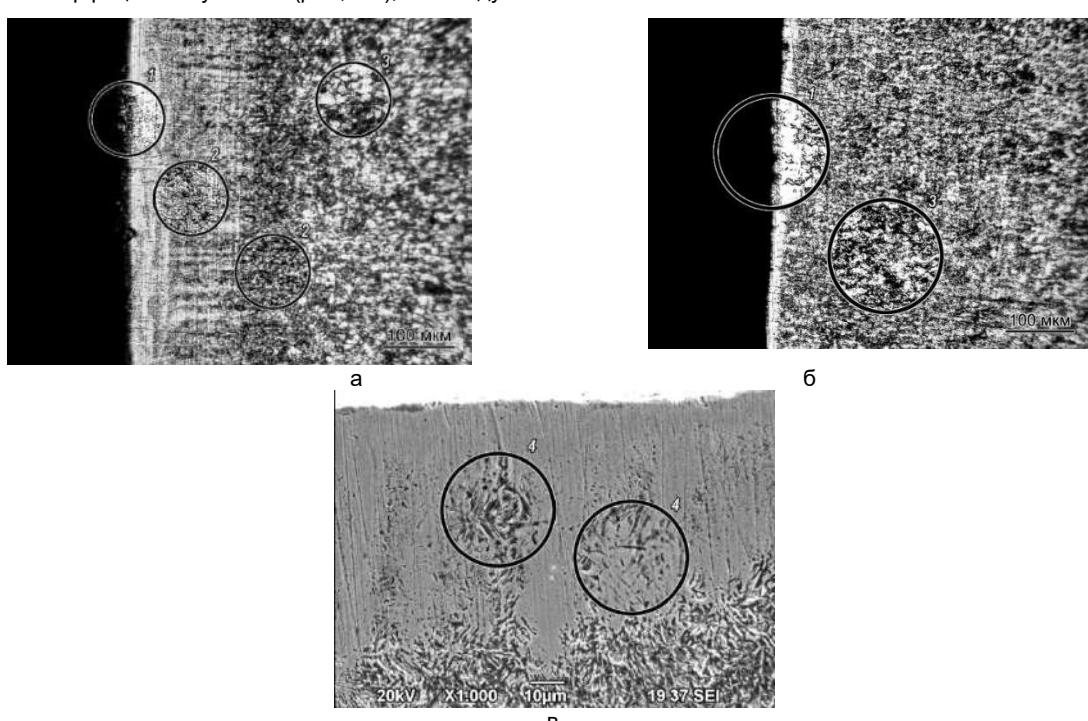


Рисунок 3 – Микроструктура ЗЛВ образца после лазерной резки и ЛМС (а, $\times 200$); после ЛМС предварительно отшлифованной поверхности (б, $\times 200$) и структура белого слоя (в, $\times 1000$): 1 – белый слой; 2 – ЗЛВ; 3 – матрица основного металла; 4 – бесструктурный мартенсит

Figure 3 – Microstructure of the laser exposure zone of the sample after laser cutting and laser microstructuring (a, $\times 200$); after laser microstructuring of the pre-sanded surface (b, $\times 200$) and the structure of the white layer (v, $\times 1000$): 1 – white layer; 2 – ZLV; 3 – matrix of base metal; 4 – structureless martensite

Таблица 3 – Микротвердость и протяженность зоны лазерного влияния
Table 3 – Microhardness and length of laser exposure zone

Наименование слоя	Микротвердость по Виккерсу ($HV_{0,1}$) по сторонам обработки				Протяженность ЗЛВ, мкм	
	Сторона обработки					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4		
Белый слой:						
образец № 1	–	–	602–680	651–670	10–50	
образец № 2	264–470	686	605–702	628–702	5–50	
ЗЛВ:						
образец № 1	186–593	194–420	202–576	198–605	70–170	
образец № 2	–	202–400	197–584	–	5–190	
Основной металл:						
образец № 1	140–160			–	–	
образец № 2	140–160			–	–	

Анализ протяженности ЗЛВ (таблица 3) позволил установить, что увеличение числа проходов по осям обработки не влияет на изменение как общей протяженности ЗЛВ, так и отдельных ее составляющих.

Для оценки влияния изменения содержания углерода на формирование упрочненного белого слоя методом полуколичественного химического анализа (рентгенофлуоресцентный) было проведено исследование (рис. 4) химического состава ЗЛВ (табл. 4).

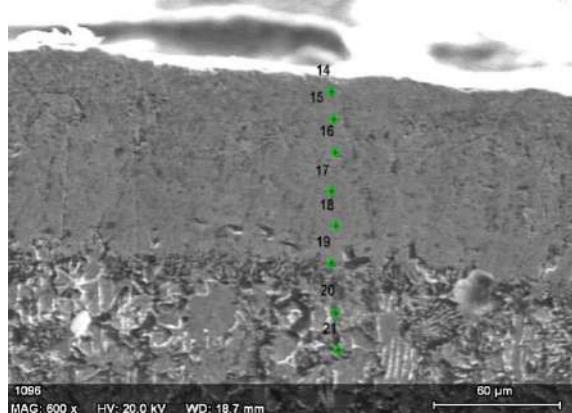


Рисунок 4 – Местоположение съемки спектров на образце

Figure 4 – Location of the spectra survey on the sample

Полученные результаты показали увеличение содержания углерода в диапазоне значений 1,41–4,32 %. Причем максимальные значения наблюдались именно в приповерхностном белом слое. Такая значительная концентрация углерода в поверхности

ном слое образцов, по-видимому, может быть следствием образования в нем карбидной фазы [12]. Полученные авторами результаты рентгеноструктурного (рассмотренные ниже), полуколичественного химического анализа вкупе с данными дюрометрического анализа подтверждают возможность образования в белом слое карбидной фазы, что подтверждает гипотезу, высказанную авторами [13] о перераспределении углерода в приповерхностных слоях при кратковременном лазерном воздействии в результате его диффузии из глубинных слоев к поверхностным.

Однако данные о концентрации углерода в поверхностных слоях, полученные с использованием полуколичественного химического анализа, нельзя считать достаточными для экспериментального подтверждения данной гипотезы. В этой связи дополнительно проводили рентгеноструктурный фазовый анализ ЗЛВ.

Дифрактограммы исследованных участков 30ХГСА после ЛМС, полученные в результате рентгеноструктурного анализа эталона (HGSA_ET) и рабочих поверхностей образца, представлены на рисунке 5, а результаты расчета представлены в таблице 5.

Из анализа представленных экспериментальных результатов видно, что по сравнению с образцом эталоном (0,3 % С) происходит увеличение содержания углерода до значений порядка 0,60–0,81 %, значительно превышающее (0,28–0,34 % С), по ГОСТ 4543-2016.

Таким образом, результаты обеих методик соответствуют друг другу, доказывая количественно (рентгеноструктурный анализ) и качественно (рентгенофлуоресцентный анализ) повышение концентрации атомов углерода в поверхности образцов стали 30ХГСА после ЛМС.

Таблица 4 – Полуколичественный химический анализ зоны лазерного воздействия

Table 4 – Semi-quantitative chemical analysis of the laser exposure zone

Спектр	Химический состав, масс. %				
	C	Si	Cr	Mn	Fe
14	4,32	0,88	0,86	4,48	89,46
15	3,96	0,98	0,96	5,12	88,98
16	3,51	1,12	1,26	5,02	89,09
17	3,73	1,22	1,02	4,36	89,68
18	3,42	1,22	0,85	4,58	89,93
19	2,75	0,79	0,7	4,72	90,77
20	1,38	0,95	1,07	4,69	91,91
21	1,41	0,69	1,91	5,04	90,95
ГОСТ 4543-2016	0,28–0,34	0,90–1,20	0,80–1,10	0,80–1,10	96,00

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 30ХГСА

Таблица 5 – Полуширина линии $(110)_{\alpha\text{-Fe}}$ и рассчитанные концентрации углерода в пересыщенном твердом растворе $\alpha\text{-Fe}$ на сторонах №№ 1–4

Table 5 – The half-width of the $(110)_{\alpha\text{-Fe}}$ line and the calculated carbon concentrations in a supersaturated $\alpha\text{-Fe}$ solid solution on sides 1–4

Маркировка плоскостей образца	Полуширина (FWHM), 20°	Полуширина, мкм	Физическое уширение	C, масс. %
HGSA ET	0,29 (эталон) - 0,145	8,7	–	–
HGSA1_2	0,37 - 0,185	11,1	6,893	0,18
HGSA2_3	0,86 - 0,43	25,8	24,28	0,66
HGSA3_5	0,80 - 0,4	24	22,36	0,60
HGSA4_7	1,10 - 0,55	33	31,83	0,81

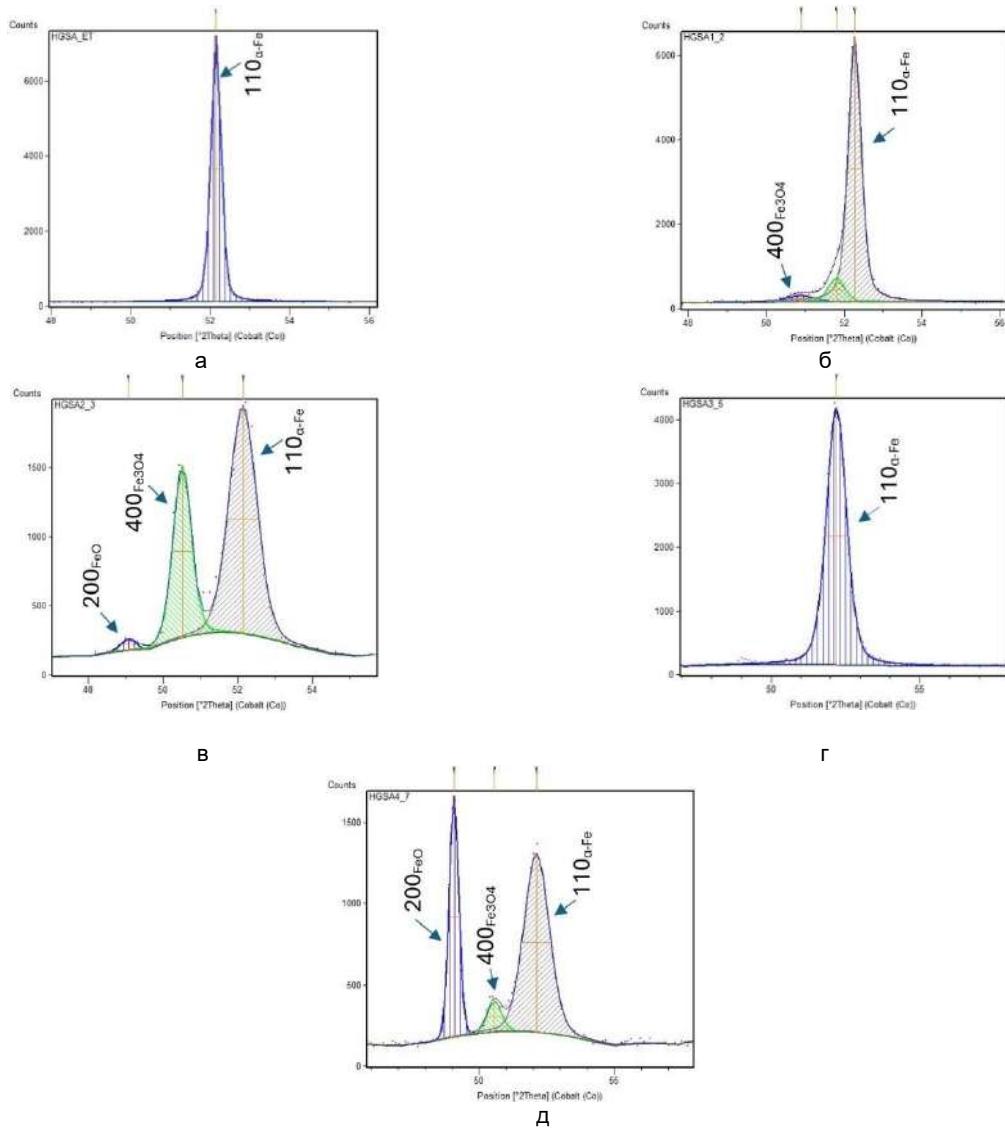


Рисунок 5 – Участки дифрактограмм эталона (а) и сторон 1 (б); 2 (в); 3 (г); 4 (д) исследуемого образца стали марки 30ХГСА после ЛМС

Figure 5 – Sections of the diffractograms of the standard (a) and sides 1 (b); 2 (v); 3 (g); 4 (d) of the 30KhGSA studied steel sample after laser microstructuring

Полученный результат связывали с реализацией термодиффузии (эффект, аналогичный эффекту Ш. Соре [14–17]) в форме, характерной для скоростного высокотемпературного лазерного воздействия.

Указанный эффект был выявлен для всех исследуемых поверхностей образца, подвергнутых

ЛМС. Кроме того, лазерное микроструктурирование привело к формированию высоких сжимающих остаточных макронапряжений величиной до 1702 МПа на стороне № 3 (рис. 1) исследуемого образца.

По мнению авторов работ [18–20], формирование остаточных сжимающих напряжений после ла-

зерной обработки может быть связано с увеличением достаточно насыщенного углеродом мартенсита в процессе охлаждения и отсутствием остаточного аустенита, с ростом содержания которого объемный эффект за счет мартенситного превращения снижается и, как следствие, на поверхности стали после лазерной обработки могут превалировать растягивающие напряжения.

ВЫВОДЫ

1. В ходе исследования микроструктуры зоны лазерного воздействия в образцах стали марки 30ХГСА с различным исходным состоянием поверхностного слоя показано, что вне зависимости от исходного состояния поверхности (после лазерной резки, после механического шлифования) конечная микроструктура, формируемая способом лазерного микроструктурирования, по мере удаления от поверхности обеднялась по содержанию углерода и изменялась от бесструктурного мартенсита до ферритно-перлитной.

2. Анализ распределения микротвердости от поверхности в глубь образцов после лазерного микроструктурирования выявил, что характер изменения микротвердости у всех образцов аналогичен: самые высокие значения определены около поверхности реза, затем постепенно микротвердость снижается до достижения уровня, характерного для исходного состояния.

3. С использованием методов рентгеноструктурного фазового и полуколичественного химического анализа выявлено увеличение содержания углерода в поверхностном слое образцов после лазерного микроструктурирования, значительно превышающее значения, установленные ГОСТ 4543-2016. Выявленный рост концентрации углерода связывали с реализацией термодиффузии (аналогичному эффекту Соре). Возможность его реализации обусловлена наличием жидкой и газовой фаз (пиролитические процессы, абляция), характерных для классического механизма Соре, имеющих место в ходе лазерного поверхностного воздействия. Подобный процесс возможен при кратковременном лазерном воздействии в ограниченном объеме ЗЛВ размером от 5 до 200 мкм.

4. С использованием рентгеноструктурного анализа установлено, что лазерное микроструктурирование поверхности после газолазерной резки приводит к формированию высоких сжимающих остаточных макронапряжений величиной до 1702 МПа. Полученный результат свидетельствует о положительном воздействии лазерной обработки на механические свойства поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов П.С. Влияние параметров постобработки на шероховатость поверхности изделий, получаемых методами аддитивных технологий // Вестник МГТУ "Станкин". 2019. № 1(48). С. 57–61.
2. Вегера И.И., Голубев В.С. Опыт применения современных методов поверхностного упрочнения на основе лазерной и ТВЧ обработки // В сб. : Современные методы и технологии создания и обработки материалов. В 2-х книгах. Кн. 2. Электротехнологии ; под ред. В.Г. Залесского. Минск, 2021. С. 44–58.
3. Методы поверхностного упрочнения деталей машин на примере коленчатого вала / М.Р. Фазулзянов, [и др.] // Современные наука и образование: достижения и перспективы развития: материалы III Национальной научно-практической конференции ; под ред. Е.П. Масюткина. Керчь, 2023. С. 100–111.
4. Табатчикова Т.И. Перекристаллизация и воз-можность реализации бездиффузионного $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения при сверхбыстром лазерном нагреве сталей // Физика металлов и металловедение, 2008. Т. 105. № 3. С. 294–318.
5. Лазерное и электроэррозионное упрочнение материалов / В.С. Коваленко [и др.]. М. : Наука, 1986. 276 с.
6. Влияние режимов лазерной обработки на изменение структуры и механических свойств поверхностного слоя деталей из стали марки 30ХГСА / И.В. Минаев [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия : Техника и технологии. 2023. Т. 13. № 1. С. 73–86. doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-73-86.
7. Миркин Л.И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. М. : Машиностроение, 1979. 134 с.
8. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.]. М. : Металлургия, 1982. 632 с.
9. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Растворгувев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М. : МИСИС, 2002. 360 с.
10. Новиков И.И., Строганов Г.Б., Новиков А.И. Металловедение, термообработка и рентгенография. М. : МИСИС, 1994. 480 с.
11. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
12. Основы лазерной и газоплазменной обработки сталей / Н.Н. Сергеев [и др.]. Тула : Изд-во ТулГУ, 2017. 337 с.
13. Газодинамика лазерной резки толстолистовых металлических пластин непрерывным CO₂-лазером / А.В. Зайцев [и др.] // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. Ч. 1. Специальный выпуск. С. 74–83.
14. Гроот С.Р. Термодинамика необратимых процессов. М. : ГИТТЛ, 1956. 277 с.
15. Макеенкова О.А. Исследование термодиффузии в разреженных трёхкомпонентных газовых средах при различных концентрациях и температурах : дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2015. 158 с.
16. Термодиффузия в металлах при импульсном неразрушающем лазерном воздействии / С.С. Ануфрик [и др.] // Известия НАН Беларуси. Серия Физико-математическая. 2014. № 2. С. 105–110.
17. Чудина О.В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева. Теория и технология. М. : МАДИ, 2003. 248 с.
18. Многопараметрическая оптимизация параметров лазерной резки стальных листов / А.Е. Гвоздев [и др.] // Материаловедение. 2015. № 2. С. 31–36.
19. Распределение остаточных напряжений на поверхности сталей, упрочненных непрерывным CO₂-лазером / А.Г. Григорьянц [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 9. С. 45–49.
20. Оценка влияния параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя деталей станков (обзор) / С.В. Петровченко [и др.] // Омский научный вестник. 2024. № 1(189). С. 56–65.

Информация об авторах

Д. С. Клементьев – старший преподаватель кафедры «Технология и сервис» Тульского государственного педагогического университета им. Л.Н. Толстого.

И. В. Минаев – кандидат технических наук, генеральный директор ООО НПП «Телар».

А. Н. Чуканов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры «Технология и сервис» Тульского государственного педагогического университета им. Л.Н. Толстого.

С. С. Гончаров – кандидат технических наук, до-
ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 30ХГСА

цент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Тульского государственного университета.

С. Н. Кутепов – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Технология и сервис» Тульского государственного педагогического университета им. Л.Н. Толстого.

REFERENCES

1. Belov, P.S. (2019). Influence of post-processing parameters on the surface roughness of products obtained by additive technologies. *Vestnik MGTU "Stankin"*. (1), 56-61. (In Russ.).
2. Vegera, I.I. & Golubev, V.S. (2021). Experience of application of modern methods of surface hardening based on laser and high-frequency processing. In the collection: *Modern methods and technologies for the creation and processing of materials. In 2 books. Book 2. Electrotechnologies*. V.G. Zalesskii (Ed.). Minsk: Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus.
3. Fazulzianov, M.R., Rusinov, V.D., Nugumanova, E.I. & SHivoev, R.S. (2023). Methods of surface hardening of machine parts using the example of a crankshaft. *Proceedings of the 3-rd National Scientific and Practical Conference: Modern Science and Education: achievements and development prospects*. Kerch: KMGU. (In Russ.).
4. Tabatchikova, T.I. (2008). Recrystallization and the possibility of implementing diffusion-free $\alpha \rightarrow \gamma$ transformations with ultrafast laser heating of steels. *Fizika metallov i metallovedenie*. (3), 294-318. (In Russ.).
5. Kovalenko, V.S., Verkhoturov, A.D., Golovko, L.F. & Podcherniaeva, I.A. (1986). Laser and electroerosion hardening of materials. Moscow : Nauka. (In Russ.).
6. Minaev, I.V. Kutepev, S.N. Klementev, D.S. & Ageev, E.V. (2023). The influence of laser processing modes on the change in the structure and mechanical properties of the surface layer of parts made of 30KhGSA steel. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. (1), 73-86. (In Russ.). doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-73-86.
7. Mirkin, L.I. (1979). X-ray structural control of engineering materials. Moscow: Mechanical engineering. (In Russ.).
8. Umansky, Ya.S., Skakov, Yu.A., Ivanov, A.N. & Rastorguev, L.N. (1982). Crystallography, radiography and electron microscopy. Moscow: Metallurgiya. (In Russ.).
9. Gorelik, S.S., Skakov, Iu.A. & Rastorguev, L.N. (2002). X-ray and electron-optical analysis. Moscow : MISIS. (In Russ.).
10. Novikov, I.I., Stroganov, G.B. & Novikov, A.I. (1994). Metallurgy, heat treatment and radiography Moscow : MISIS. (In Russ.).
11. Grigoriants, A.G. SHiganov, I.N. & Misiurov, A.I. (2006). Technological processes of laser processing. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana. (In Russ.).
12. Sergeev, N.N., Minaev, I.V., Tikhonova, I.V., Kutepev, S.N., Komarova, M.IU., Aliavdina, E.S., Gvozdev, A.E. & Kalinin, A.A. (2017). Fundamentals of laser and gas plasma processing of steels. Tula: Tulsu Publishing House.
13. Zaitsev, A.V., Kovalev, O.B. Orishich, A.M. Fomin, V.M. & SHuliatev, V.B. (2006). Gas dynamics of laser cutting of thick-sheet metal plates with a continuous CO₂-laser. *Vychislitel'nye tekhnologii. Special Issue*. Volume 11 Part 1. 74-83. (In Russ.).
14. Groot, S.R. (1956). Thermodynamics of irreversible processes. Moscow: GITTL. (In Russ.).
15. Makeenova, O.A. (2015). Investigation of thermodiffusion in rarefied three-component gas media at various concentrations and temperatures. Extended abstract of Candidate thesis. Moscow. (In Russ.).
16. Anufrik, S.S., Belash, V.Ch., Vasiliev, S.V., Ivanov, A.Yu. & Kopytsky, A.V. (2014). Thermodiffusion in metals under pulsed non-destructive laser action. News of the National Academy of Sciences of Belarus. The series is Physical and mathematical, (2), 105-110. (In Russ.).
17. Chudina, O.V. (2003). Combined methods of surface hardening of steels using laser heating. Theory and technology. Moscow: MADI. (In Russ.).
18. Gvozdev, A.E., Golyshev, I.V. Minaev, I.V., Sergeev, A.N., Sergeev, N.N., Tikhonova, I.V., KHonelidze, D.M. & Kolmakov, A.G. (2015). Multiparametric optimization of parameters of laser cutting of steel sheets. *Materialovedenie*, (2), 31-36. (In Russ.).
19. Grigoriants, A.G., Safonov, A.N., Maiorov, V.S., Baskov, A.F. & Ivashov, G.P. (1987). Distribution of residual stresses on the surface of steels hardened by a continuous CO₂-laser. *Materialovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, (9), 45-49. (In Russ.).
20. Petrochenko, S.V., Khao, T.S., IUI, S. & CHzhao, K. (2024). Assessment of the influence of the parameters of the laser quenching mode on the quality of the surface and surface layer of machine parts (overview). *Omskij nauchnyj vestnik*, (1), 56-65. (In Russ.).

Information about the authors

D.S. Klementev - Senior lecturer of the Department of "Technology and Service" of the Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy.

I.V. Minaev - Candidate of Technical Sciences, General Director of the LLC Scientific and Production Enterprise "Telar".

A.N. Chukanov - Doctor of Technical Sciences, leading researcher of the department of "Technology and service" of the Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy.

S.S. Goncharov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Mechanical Engineering and Materials Science» of the Tula State University.

S.N. Kutepev - Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of «Technology and Service» of the Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 18 сентября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 18 Sep 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 669

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.023

EDN: LZQJQD

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ НАСЫЩЕНИИ БОРОМ И НИКЕЛЕМ

Владимир Иванович Мосоров¹, Константин Сергеевич Коробков²,
Бурял Дондокович Лыгденов³

^{1, 2, 3} Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия

¹ vlmosorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0193-5310>

² k_korobkov00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5192-2140>

³ lygdenov59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5841-0000>

Аннотация. Двухкомпонентное насыщение, при котором два элемента одновременно диффундируют на поверхности стали, приводит к формированию более сложной и многослойной структуры с уникальными свойствами.

В данной статье рассматривается двухкомпонентное насыщение бором и никелем углеродистых сталей. Целью данной работы является исследовать микроструктуру, микротвердость и фазовый состав бороникелированных слоев. Проведен металлографический, рентгенофазовый и рентгеноспектральный анализ, определена микротвердость по глубине диффузационного покрытия. Даны оценка влияния состава насыщающих смесей, используемых в данной работе на формирование пластичности и твердости бороникелированных покрытий.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, двухкомпонентное насыщение, бороникелирование, металлографический анализ, рентгенофазовый анализ, рентгеноспектральный анализ, углеродистая сталь

Для цитирования: Мосоров В. И., Коробков К. С., Лыгденов Б. Д. Исследование микроструктуры и свойств углеродистых сталей при диффузационном насыщении бором и никелем // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 152–156. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.023. EDN: <https://elibrary.ru/LZQJQD>.

Original article

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBON STEELS IN DIFFUSION SATURATION WITH BORON AND NICKEL

Vladimir I. Mosorov¹, Konstantin S. Korobkov², Buryal D. Lygdenov³

^{1, 2, 3, 4} East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

¹ vlmosorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0193-5310>

² k_korobkov00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5192-2140>

³ lygdenov59@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5841-0000>

Abstract. Two-component saturation, in which two elements simultaneously diffuse on the surface of the steel, leads to the formation of a more complex and multilayer structure with unique properties.

This article discusses the two-component saturation of carbon steels with boron and nickel. The purpose of this work is to investigate the properties, phase composition and microstructure of boronized layers. Metallographic, X-ray phase and X-ray spectral analysis were performed. The micro-hardness of the diffusion coating depth has been determined. The influence of the composition of the saturating mixtures used in this work on the formation of plasticity and hardness of boronized coatings is estimated.

Keywords: chemical and thermal treatment, two-component saturation, boronickeling, metallographic analysis, X-ray phase analysis, X-ray spectral analysis, carbon steel.

For citation: Mosorov, V.I., Korobkov, K.S. & Lygdenov, B.D. (2025). Investigation of microstructure and properties of carbon steels in diffusion saturation with boron and nickel. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 152-156. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.023. EDN: <https://elibrary.ru/LZQJQD>.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное развитие промышленности в современных условиях приводит к ужесточению требований к ресурсу машин и механизмов, поэтому про-

блема совершенствования технологических методов упрочнения конструкционных сталей является актуальной задачей современного машиностроения. Одним из эффективных способов поверхностного упрочнения сталей является химико-термическая

© Мосоров В. И., Коробков К. С., Лыгденов Б. Д., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ НАСЫЩЕНИИ БОРОМ И НИКЕЛЕМ

обработка (ХТО). Это процесс поверхностного насыщения сталей разными элементами, который заключается в изменении химического состава, микроструктуры и свойств поверхностного слоя детали [1].

Одним из видов химико-термической обработки является насыщение поверхностного слоя бором, полученные диффузионные слои характеризуются высокой твердостью и износостойкостью, но являются хрупкими и обладают низкой пластичностью.

В данной работе для снижения хрупкости боридных покрытий используется двухкомпонентное диффузионное насыщение бором и никелем. При двухкомпонентном диффузионном насыщении введение никеля делается с целью повысить показатели пластичности и износостойкости боридных слоев. Работы по исследованию на износостойкость бороникелированных слоев проводились в работах [2–8].

Бороникелированные слои показывают хорошие показатели при испытаниях на коррозионостойкость [3]. Также при диффузионном бороникелировании наблюдается снижение микротвердости [9–11]. При рентгенофазовом анализе бороникелированных покрытий на сталях и сплавах были обнаружены, кроме боридных фаз FeB и Fe_2B , следующие фазы: NiB , Ni_2B , Ni_3B и Ni_4B_3 [10, 11].

МЕТОДЫ

В качестве исследуемого материала использовали углеродистые стали 20, 45 и У10.

Бороникелирование на сталях 20, 45 и У10 проводилось в контейнерах с плавким затвором и было проведено следующими составами, представленными в таблице 1, при температуре 950 °C и временем выдержки 4 часа.

Микроструктуру образцов исследовали на металлографическом микроскопе «Neophot-21» с циф-

ровой камерой для фиксации изображений. Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 0,1 кг согласно ГОСТ 9450-76.

Рентгеноспектральный микроанализ проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре XRD-X-RAY;

Таблица 1 – Составы смеси при бороникелировании в порошках

Table 1 – Compositions of the mixture during boronickeling in powders

№ состава	1	2
B_4C	60	65
Al_2O_3	21	18
NiO	12	12
NH_4Cl	4	-
$\text{K}(\text{BF}_4)$	3	5

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате диффузионного насыщения были получены следующие бороникелированные слои: микроструктуры состава № 1 – рисунок 1, микроструктуры состава № 2 – рисунок 2.

Глубина диффузионных бороникелированных слоев состав № 1 составила: на стали 20 – 135 мкм; стали 45 – 130 мкм, стали У10 – 125 мкм.

Глубина диффузионных бороникелированных слоев состав № 2 составила: на стали 20 – 195 мкм; стали 45 – 190 мкм, стали У10 – 180 мкм.

Уменьшение толщины диффузионных бороникелированных слоев связано с увеличением содержания углерода в сталях.

Микротвердость по глубине диффузионных слоев на сталях 20, 45 и У10 распределяется неравномерно.



Рисунок 1 – Микроструктуры бороникелированных слоев на сталях состав № 1, при увеличении $\times 400$: а) сталь 20; б) сталь 45; в) сталь У10

Figure 1 – Microstructures of boronized layers on steels composition №1, with an increase of $\times 400$: a) steel 20; b) steel 45; c) steel U10

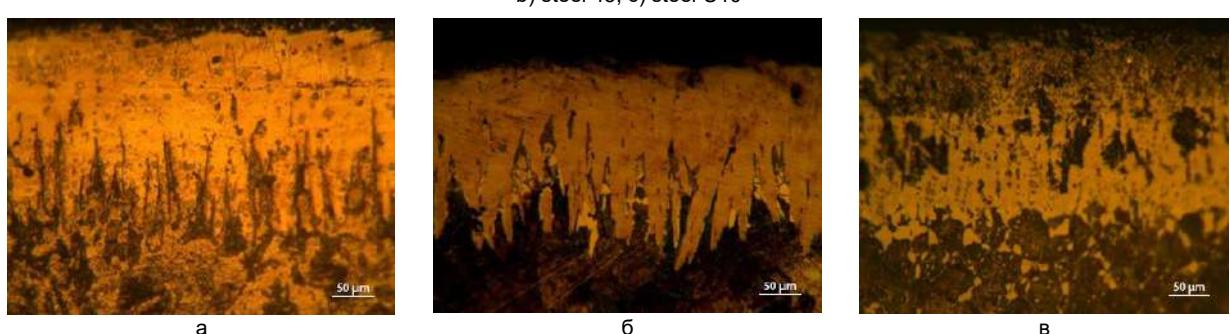


Рисунок 2 – Микроструктуры бороникелированных слоев на сталях состав № 2, при увеличении $\times 400$: а) сталь 20; б) сталь 45; в) сталь У10

Figure 2 – Microstructures of boronized layers on steels composition №2, with an increase of $\times 400$: a) steel 20; b) steel 45; c) steel U10

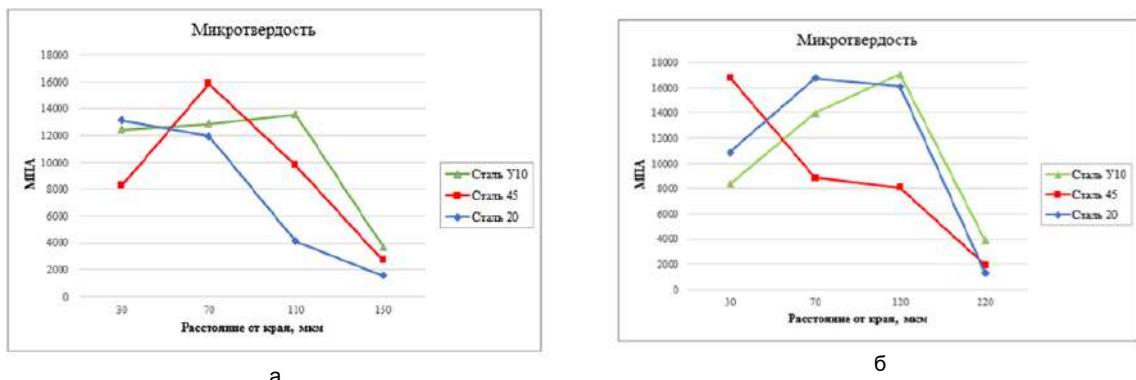


Рисунок 3 – График распределения микротвердости по глубине бороникелированных слоев: а) состав № 1; б) состав № 2
Figure 3 – Graph of the micro-hardness distribution over the depth of boronized layers: a) composition № 1; b) composition № 2

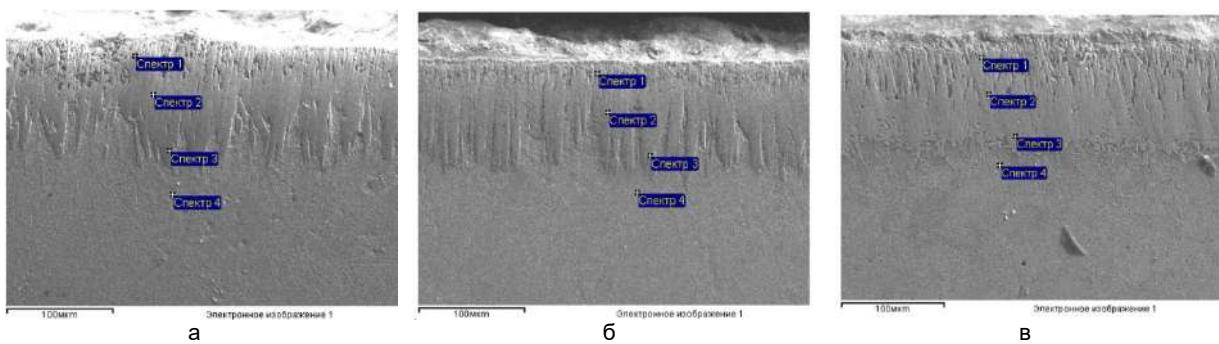


Рисунок 4 – Электронное изображение бороникелированных слоев на сталях состав №1, при увеличении ×350:
а) сталь 20; б) сталь 45; в) сталь У10

Figure 4 – Electronic image of boronized layers on steels composition №1, with an increase of $\times 350$:
a) steel 20; b) steel 45; c) steel U10

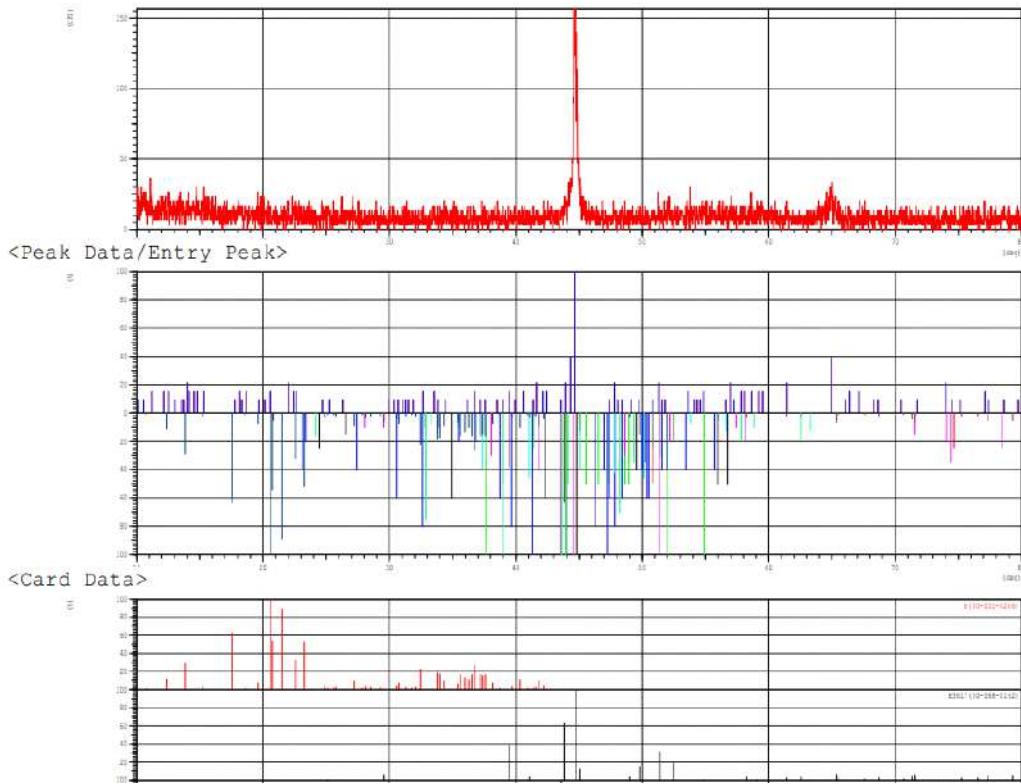


Рисунок 5 – График распределения пиков при определении фаз, состав № 2, сталь У10

Figure 5 – Graph of the distribution of peaks, when determining phases, composition № 2, steel U10

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ НАСЫЩЕНИИ БОРОМ И НИКЕЛЕМ

Микротвердость измеряли на глубине от поверхности 30, 70, 110 и 150 мкм для состава № 1, для состава № 2 – на глубине 30, 70, 120, 220 мкм, данные приведены на графике рисунка 3.

Состав 1 на стали 20 – микротвердость на расстоянии от 30 мкм 13125 МПа, на расстоянии 70 мкм уменьшилась до 11944 МПа; Сталь 45 – микротвердость на расстоянии от 30 мкм 8271 МПа, на расстоянии 70 мкм увеличилась до 15852 МПа; Сталь У10 – микротвердость на расстоянии 30 мкм 12435 МПа, на расстоянии 70 мкм не изменилась 12845 МПа, на расстоянии 110 мкм 13548 МПа.

При составе 2 на стали 20 – микротвердость на расстоянии 30 мкм 10870 МПа, при 70 мкм увеличилась до 16764 МПа; Сталь 45 – микротвердость на расстоянии 30 мкм 16799 МПа, при 70 мкм уменьшилась до 8841 МПа; Сталь У10 – микротвердость на расстоянии 30 мкм 8363 МПа, при 70 мкм увеличилась до 13966 МПа, при 120 мкм 17049 МПа.

Электронные изображения бороникелированных слоев углеродистых сталей состава № 1 рентгеноспектрального микроанализа представлены на рисунке 4.

No.	Card	Chemical Formula	Chemical Name (Mineral Name)	S	L	d	I	R
				Dx	WT%	S.G.		
1	00-031-0206	B	Boron	0.413	0.571 (28/49)	0.771	0.355	0.156
					2.33	57.32	P41	
2	00-068-0162	B ₃ Ni ₇	Boron Nickel	0.718	0.750 (21/41)	0.639	0.401	0.192
					7.97	42.68	P63mc	
3	00-047-1405	Fe0.64Ni0.36	Iron Nickel	0.155	1.000 (3/ 5)	0.855	0.611	0.523
					8.15	-----	Fm-3m	
4	00-035-1339	BFe ₃	Boron Iron	0.226	0.800 (12/15)	0.808	0.537	0.347
					7.44	-----	Fm3a	
5	00-012-0416	Ni ₄ B ₃	Boron Nickel	0.206	0.640 (16/25)	0.717	0.725	0.333
					7.43	-----	C2/c	
6	00-036-0978	Fe _x Ni _{23-x} B ₆	Boron Iron Nickel	0.556	0.933 (14/18)	0.595	0.580	0.323
					7.90	-----	Fm-3m	
7	00-047-1332	B ₆ Fe ₂₃	Boron Iron	0.278	0.900 (9/10)	0.630	0.464	0.263
					7.19	-----	Fm-3m	
8	00-039-1314	Fe ₂ B	Boron Iron	0.465	0.800 (8/10)	0.590	0.458	0.216
					7.24	-----	I	
9	00-006-0567	Ni ₃ B	Boron Nickel	0.306	0.700 (7/10)	0.629	0.294	0.130
					7.18	-----	Cmcm	

Рисунок 6 – Идентифицированные фазы образца бороникелированного слоя стали У10

Figure 6 – Identified phases of the baron nickel-plated layer sample made of U10 steel

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам измерения микротвердости можно сделать вывод, что Ni на стали 45 при составе № 1 и на сталях 20 и У10 при составе № 2 диффундирует в верхние слои, так как снижается твердость, а также повышает пластичность бороникелированных слоев на глубине 30 мкм 8271–10870 МПа, в глубь Ni проникает меньше, и твердость на расстоянии 70 мкм возрастает до 15852–17049 МПа.

Глубина бороникелированных слоев при составе 2 больше состава 1 на 50–60 мкм.

Содержание Ni в диффузионных слоях составило на поверхности до 0,99 %.

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что двухкомпонентное диффузионное насыщение бором и никелем является эффективным способом для повышения пластичности боридных покрытий.

Марки сталей, используемые в работе, показывают разную чувствительность к процессу бороникелирования:

Сталь 20: хорошо реагирует на процесс, обес-

печивая высокую твердость, но требует осторожности при выборе состава из-за риска хрупкости.

Сталь 45 образует более равномерные слои, что делает ее подходящей для широкого спектра применений.

Сталь У10 показывает наиболее стабильное снижение по микротвердости и наличие Ni, что делает ее оптимальной для ответственных деталей.

Влияние состава насыщающей смеси на свойства покрытий:

Состав № 1 эффективен для получения высокой поверхностной твердости, но его применение ограничено из-за повышенной хрупкости.

Состав № 2 обеспечивает оптимальный баланс между твердостью и пластичностью за счет фазы B₃Ni₇, что делает его предпочтительным для деталей, работающих в условиях интенсивного износа.

Результаты исследований выполнены при финансовой поддержке ФГБОУ ВО ВСГУТУ в рамках гранта «Молодые ученые ВСГУТУ» (Приказ 1176 от 27.04.2024).

Содержание Ni в бороникелированном слое на стали 20 составило 0,09–0,19 %.

Содержание Ni в бороникелированном слое на стали 45 составило 0,24–0,99 %.

Содержание Ni в бороникелированном слое на стали У10 составило 0,18–0,62 %.

На всех образцах содержание Ni уменьшается по мере удаления от поверхности.

График распределения никеля при определении фаз и их идентификация рентгенофазовым анализом на бороникелированном слое стали У10 состав № 2 представлены на рисунках 5, 6. Для идентификации фаз использовалась база данных PDF-2, рентгеновская трубка с анодом меди (Cu K α , $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), для количественного анализа использован метод Ритвельда. В результате рентгенофазового анализа в бороникелированном слое была найдена фаза B₃Ni₇ и химический элемент B. По отношению друг к другу фазы на основе B составляют 57.32 %, а фаза B₃Ni₇ составляет 42.68 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ляхович Л.С. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : Справочник. М., 1981. 229 с.
2. Определение износостойкости диффузионных покрытий после химико-термической обработки в обмазке на основе карбида бора с добавлением никеля / Ж.В. Самаев [и др.] // Ползуновский альманах. 2019. Т. 5. № 3. С. 41–54.
3. Повышение износостойкости и коррозионной стойкости стальных деталей методами комплексного боронирования и боровольфрамирования / С.Г. Иванов // Фундаментальные проблемы современно-го материаловедения. 2010. Т. 7. № 4. С. 108–111.
4. Перспективные диффузионные покрытия / Б.Д. Лыгденов [и др.]. Raleigh, NorthCarolina, 2015. 131 с.
5. Борирование малоуглеродистой стали / А.М. Гурьев [и др.] // Raleigh, NorthCarolina, 2015. С. 572–573.
6. Упрочнение поверхности литой стали комплексным диффузионным насыщением бором и хромом / В.И. Мосоров [и др.] // Обработка металлов. 2011. № 2. С. 33–36.
7. Лыгденов Б.Д. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 45 и 5ХНВ // Вестник ВСГУТУ. 2011. № 1. С. 25–31.
8. Распределение фаз в боридном слое на стали 45 / В.И. Мосоров [и др.] // Ползуновский Альманах. 2017. № 4. С. 137–142.
9. Иванов С.Г. Влияние добавок легирующих элементов в обмазку на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного насыщения стали / С.Г. Иванов, М.А. Гурьев, А.Г. Иванов, А.М. Гурьев // Современные научно-исследовательские технологии. 2010. № 7. С. 170–172.
10. Ocak-Araz S., Birden A., Bayca S.U. [et al.]. Effect

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

Статья поступила в редакцию 08 ноября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 08 Nov 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

of Powder-Pack Boronizing on the Micro-hardness, Wear, and Corrosion Behaviors of AISI 304L Steel. *J. of Mater Eng and Perform* 33, 166–172. (2024).

11. GUNES I., KEDDAM M., CHEGROUNE R. [et al.]. Growth kinetics of boride layers formed on 99.0 % purity nickel. *Bull Mater Sci* 38, 1113–1118. (2015).

Информация об авторах

В. И. Мосоров – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Металловедение и технологии обработки материалов» Восточно-Сибирского университета технологий и управления.

К. С. Коробков – аспирант кафедры «Металловедение и технологии обработки материалов» Восточно-Сибирского университета технологий и управления.

Б. Д. Лыгденов – доктор технических наук, профессор Уханьского текстильного университета.

Information about the authors

V.I. Mosorov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Metallology and Materials Processing Technologies" of the East Siberian University of Technology and Management.

K.S. Korobkov - postgraduate student of the Department "Metallology and Materials Processing Technologies" of the East Siberian University of Technology and Management.

B.D. Lygdenov - Doctor of Technical Sciences, Professor of Wuhan.



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 520.6.07

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.024

EDN: MLFICF

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Владислав Викторович Соловьев¹, Максим Андреевич Аревков²,
Александра Дмитриевна Рычкова³, Валерия Павловна Березовская⁴

^{1, 2, 3}, Амурский государственный университет, Благовещенск, Россия

⁴ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

¹ soloviev.1975@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0139-7903>

² maksim.arevkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1096-1473>

³ sam_28_02@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6124-4690>

⁴erez_vp@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8360-2312>

Аннотация. В статье представлены результаты оценки возможностей применения современных композиционных материалов в космических летательных аппаратах. В качестве объекта исследования были выбраны образцы углепластика, полученные различными способами формования, а также образцы из эпоксидных смол и эпоксидного компаунда с разными соотношениями отвердителя. Основной задачей исследования было – оценить свойства этих материалов и их пригодность для использования в космических аппаратах. В результате исследования было выявлено, что композиты на основе эпоксидных смол и компаунда обладают оптимальными характеристиками. Было установлено, что различные методы формования углепластиковых композитов оказывают влияние на их структуру и свойства. Эти результаты подтверждают потенциал использования современных композиционных материалов в разработке космических летательных аппаратов и указывают на необходимость дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: композиционные материалы, углепластик, эпоксидные смолы, эпоксидный компаунд, космические летательные аппараты, физико-механические свойства, структура материала.

Для цитирования: Соловьев В. В., Аревков М. А., Рычкова А. Д., Березовская В. П. Оценка механических свойств углепластиков // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 157–162. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.024. EDN: <https://elibrary.ru/MLFICF>.

Original article

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS

Vladislav Viktorovich Solovyov¹, Maxim Andreevich Arevkov²,
Alexandra Dmitrievna Rychkova³, Valeria Pavlovna Berezovskaya⁴

^{1, 2, 3, 4} Amur State University, Blagoveshchensk, Russia

⁴ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

¹ orpd_st@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8204-0000>

² arevkov.ma@amursu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1096-1473>

³ sam_28_02@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6124-4690>

⁴erez_vp@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8360-2312>

Abstract. This article presents the results of evaluating the potential applications of modern composite materials in aerospace vehicles. Samples of carbon fiber-reinforced plastic obtained through various forming methods, as well as samples made from epoxy resins and epoxy compounds with different hardener ratios, were chosen as the objects of study. The main objective of the research was to assess the properties of these materials and their suitability for use in aerospace vehicles. The study revealed that composites based on epoxy resins and compounds exhibit optimal characteristics. Additionally, it was discovered that various forming methods for carbon fiber-reinforced composites influence their structure and properties. These findings confirm the potential of using modern composite materials in the development of aerospace vehicles and highlight the need for further research in this field.

Keywords: composite materials, carbon fiber-reinforced plastic, epoxy resins, epoxy compound, aerospace vehicles, physico-mechanical properties, material structure.

For citation: Solovyov, V. V., Arevkov, M. A., Rychkova, A. D. & Berezovskaya, V. P. (2025). Evaluation of mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 157-162. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.024. EDN: <https://elibrary.ru/MLFICF>.

© Соловьев В. В., Аревков М. А., Рычкова А. Д., Березовская В. П., 2025

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного производства и промышленности невозможно без использования полимерных композиционных материалов. При создании различных видов техники, машин и оборудования требуются новые материалы, получаемые путем соединения разнородных веществ, свойства которых должны обладать повышенными количественными и качественными характеристиками.

Актуальность использования композиционных материалов в промышленности, в том числе и при производстве космических летательных аппаратов (КЛА), остро стоит в современном мире. КЛА эксплуатируются в экстремальных условиях с повышенными значениями температур и нагрузок, что приводит к созданию и использованию высокопрочных и термостойких композиционных материалов.

Одним из ключевых параметров космических летательных аппаратов является вес. Снижение веса космических летательных аппаратов может позволить увеличить массу полезной нагрузки. Существенно снизить вес позволяет использование композиционных материалов, отличающихся высокими прочностными характеристиками и низкой плотностью. Поиску решения проблем посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых. Сабадаха Е.Н. [1] считает, что использование композиционных материалов в производстве космической и авиационной техники позволяет сэкономить от 5 до 30 % веса летательного аппарата. Авторы Пересыпкин К.В. [2], Колдяжная И.Н. [3] предлагают варианты снижения веса КЛА за счет внедрения композиционных материалов при изготовлении сухих отсеков ракет-носителей и криогенных топливных баков с использованием конструкции оболочек, усиленных гофрированными листами, а также комбинирование вспененного алюминия с углепластиком для повышения прочности при минимальном весе.

Как отмечает Власенко В.А. [4] и его коллеги, активное использование композитов наблюдается в проектах НАСА, где их применяют при создании обтекателей, криогенных резервуаров, узлов двигательных установок и т.д. Для эксплуатации в условиях сверхзвуковых скоростей и экстремальных температурных нагрузок в ракетно-космической технике предпочтение отдается материалам с углеродным армированием. В качестве связующих компонентов в таких композитах, как углепластики, основой служит эпоксидная матрица, а для структур с углеродной матрицей ключевым компонентом становятся карбоновые волокна, обеспечивающие термостойкость и механическую стабильность.

Храменкова Д.Н. и Арискина Д.Н. [5] отметили возможность использования композитных материалов на основе оксидных соединений переходных металлов, которые рекомендуются для создания катализитических систем в реакциях окисления углеводородов и катодных компонентов химических источников энергии.

В работе Штокал А.О., Рыкова Е.В., Добросо-вестнова К.В. [7] выявлено, что в узлах раскрытия работающих под нагрузкой космических аппаратов недопустимо применять детали из алюминиевого сплава АМгб с МДО-покрытием для предотвращения сварки контактирующих поверхностей.

Композиционные материалы используются не только при производстве космических аппаратов и его узлов. Помимо этого, они находят применение и при функционировании стартового комплекса.

В работах Козлова В.В. [8] и Загрутдинова Ю.А.

[9] приведен анализ перспектив внедрения композиционных материалов при функционировании стартового комплекса с целью повышения их эксплуатационной надежности и уменьшения рисков в процессе запуска аппарата.

Работа под руководством Каботовой Н.С. [10] сосредоточена на разработке гибридных композитов системы «металл–углерод», включающих различные формы углерода: многослойные углеродные нанотрубки, технический углерод, а также углерод–углеродный композиционный материал Сибунит – и металлов (Ag, Ni, Co). Авторы детально изучают их физико-химические параметры и катализическую активность. Классификация композиционных материалов по признакам, морфологии фаз приведена в работе Рогова В.А. [11].

Анализ опыта применения композиционных материалов в различных отраслях и сферах деятельности показал, что космическая и авиационная техника сталкиваются с экстремальными условиями эксплуатации, такими как высокий вакуум, радиационная нагрузка и широкий диапазон температур с резкими перепадами, то для обеспечения эффективной работы в таких условиях, материалы, используемые в изготовлении, должны быть исключительно прочными и при этом легкими. Применение композитных материалов для конструкций и оборудования позволяет значительно снизить их вес, сохранив при этом необходимые прочностные характеристики. Среди различных композитных материалов углепластики являются наиболее подходящими в настоящее время по прочности и жесткости. Углепластики состоят из углеродных волокон, которые обеспечивают высокую прочность и жесткость, и полимерной матрицы, которая обеспечивает сцепление и защиту волокон. Этот материал характеризуется отличной удельной прочностью и удельной жесткостью, что позволяет снизить вес конструкций и оборудования без ущерба для их надежности и функциональности. Использование углепластиков в космической и авиационной технике имеет ряд преимуществ. Данные материалы обладают высокой стойкостью к коррозии, что особенно важно в условиях высокого вакуума и агрессивных сред. Углепластики имеют высокие диэлектрические свойства, позволяющие работать при воздействии радиации. Дополнительно углепластиковые композиты могут быть легко формованы в различные сложные формы, обеспечивая гибкость в проектировании и адаптации к специфическим требованиям каждого конкретного приложения [12].

В настоящее время при производстве композиционных материалов используются различные классы связующих компонентов: полиэфирные, винилэфирные, эпоксидные, бисмалеимидные и полимиидные. Данные связующие, прежде всего, отличаются друг от друга прочностными характеристиками и температурой эксплуатации. В условиях космоса, где диапазон перепадов температур достигает 200 °C, наиболее оптимальным вариантом для изготовления углепластика является использование эпоксидных связующих, так как они сохраняют свои свойства даже в космическом пространстве.

В современном производстве композиционных материалов применяются разнообразные виды связующих компонентов: полиэфирных, винилэфирных, эпоксидных, бисмалеимидных и полимиидных. Ключевые различия между ними заключаются в механической прочности и термостойкости, которые, в свою очередь, определяют пределы их эксплуатационных температур. В космических условиях, характеризую-

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ

щицеся экстремальными перепадами до 200 °С, эпоксидные связующие демонстрируют наибольшую эффективность при создании углепластиков, так как они способны сохранять структурную стабильность и свойства при различных условиях. Это обуславливает рост потребности в исследовании деформационного поведения композитных материалов на основе эпоксидной смолы в общих условиях нагружения [13].

Целью исследования является оптимизация состава матриц и получение композитных материалов, устойчивых к механическим воздействиям и эксплуатационным нагрузкам, с последующей оценкой возможности их применения в космических летательных аппаратах.

Объектом исследования определены образцы углепластика, полученные различными способами формования, образцы из эпоксидных смол и эпоксидного компаунда с разными соотношениями отвердителя.

МЕТОДЫ

Исследование проводилось с использованием методов определения предельной прочности при сжатии и растяжении. В ходе эксперимента образцы смол и компаундов были распределены на три группы: первая включала смолу ЭД-20 с отвердителем ПЭПА в соотношениях от 5 до 30 %, вторая – эпоксидный компаунд Этап Карбон-257У Light с отвердителем (пропорции 10–35 %), третья – смолу ЭД-16 и ПЭПА (5–25 %). Объем смолы варьировался в диапазоне 25–300 мл.

Для проведения испытаний на прочность при сжатии образцов эпоксидных смол ЭД-16, ЭД-20 и компаунда Этап Карбон-257У Light применялась испытательная машина ИП 6011-500-1. Предварительно образцы обтачивались, проверялись на отсутствие сколов и трещин, а также проводилась оценка качества поверхности готового образца. Для проведения испытания замерялись геометрические параметры образцов, такие как диаметр образца d и его высота h . На подвижную траверсу монтировалось испытательное устройство для анализа сжатия. Образец размещался на нижней плите, центрирован был относительно оси, с сохранением промежутка между верхней плитой и поверхностью образца в 5–10 мм. Перед началом тестирования выполнялась калибровка машины ИП 6011-500-1 путем сброса начальных значений. Далее нагрузка на образец постепенно увеличивалась, вызывая деформацию, после чего отмечалось максимальное значение усилия, зафиксированное в момент его разрушения. Все последующие образцы тестились по аналогичной методике. Предел прочности на сжатие определялся как отношение разрушающей нагрузки к площади поперечного сечения образца.

Для испытаний на растяжение полученных композитных материалов были подготовлены образцы с длиной 175 мм и шириной 25 мм. Во время испытаний образцов № 1, 2, 3, 4, 5, 6 использовалась испытательная машина Instron 8802. Образцы композитных материалов подвергаются испытаниям на растяжение с помощью специализированных испытательных машин согласно ГОСТ 56785-2015 [14]. Методика испытаний предполагает растяжение образца полимерного композита (ПКМ) с постоянной скоростью приложения нагрузки или деформации до момента разрушения. На подготовительном этапе для каждого образца выполнялись замеры толщины и ширины рабочих участков в трёх точках, после чего учитывалось минимальное полученное значение. Эксперименты осуществлялись в лабораторных условиях при температуре +24 °С и влажности 52 %. Образцы подвергались одноосному растяжению до потери целостности.

Корреляция между удлинением Δl и приложенной силой F автоматически фиксировалась диаграммной системой испытательной машины, формируя кривую зависимости $F = f(\Delta l)$. На последующем этапе по полученной диаграмме определялось начало координат, предел текучести и прочности, на основе которых рассчитывались механические параметры материала. Для исключения зависимости характеристик от геометрии образца (исходной площади сечения A_0 и длины l_0) сила F нормировалась с преобразованием в механическое напряжение $\sigma = F/A_0$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе были приготовлены углепластиковые композиты с помощью разнообразных методов формования и образцы из эпоксидных смол и эпоксидного компаунда с различными соотношениями отвердителя.

Исследование свойств смолы ЭД-20 позволило сформулировать следующие выводы. При введении 5 % отвердителя ПЭПА процесс полимеризации не происходил в течение нескольких суток из-за недостаточности этой концентрации для завершения реакции. Увеличение содержания отвердителя до рекомендуемых 10 % обеспечило прочность материала на уровне 43,9 МПа, что подтверждает эффективность данного соотношения. Дальнейшее повышение доли отвердителя до 15 % привело к росту прочности – до 68,62 МПа, указывая на положительное влияние концентрации на механические характеристики. Однако при достижении 20 % наблюдался эффект саморазогрева смолы и изменение цвета образцов в результате структурных изменений. Исходя из полученных данных, оптимальным для производства композитов был выбран состав с 15 % отвердителя, сочетающий высокую прочность и стабильность полимеризации.

Анализ эпоксидного компаунда Этап Карбон-257У Light выявил следующие закономерности. При концентрации отвердителя 10–15 % материал не достигал требуемой степени затвердевания, подтверждая недостаточность этих пропорций. Использование 20 % отвердителя обеспечило прочность 91,99 МПа, а повышение до 25 % дало прирост до 99,61 МПа. При увеличении доли до 30 % зафиксировано снижение прочности до 72,42 МПа, вероятно, связанное с нарушением баланса компонентов. Последующий рост концентрации сопровождался вторичным увеличением прочности до 112,19 МПа, обусловленным тепловым эффектом. Для промышленного применения рекомендован состав с 25 % отвердителя, обеспечивающий стабильную полимеризацию и максимальную прочность.

Работа с эпоксидной смолой ЭД-16 была ограничена ее высокой вязкостью. При 5 % отвердителя ПЭПА материал становился слишком густым для равномерного перемешивания, поэтому было использовано 10 % отвердителя для обеспечения рабочей консистенции и прочности на сжатие 148,51 МПа. Увеличение содержания до 15 % привело к снижению прочностных характеристик, тогда как увеличение доли концентрации отвердителя восстанавливало показатели, сопровождаясь эффектом саморазогрева. Для практического применения рекомендован состав с 10 % отвердителя, сочетающий оптимальную вязкость и механическую устойчивость.

В таблице 1 приведены данные испытаний на растяжение и геометрические параметры полученных образцов углепластика.

Группа образцов № 1 демонстрирует среднее значение максимального напряжения при растяжении

величиной 301,3 МПа, а образец 1.1 имеет лучшие прочностные характеристики среди своей группы. Единственный образец группы № 2 показал прочность при растяжении, равной 399,51 МПа. Оценка параметров группы № 3 выявила усредненное значение предела прочности при растяжении, равное 480,4 МПа. Среди этой группы образец 3.3 показывает оптимальные показатели прочности. В группе образцов № 4 было получено среднее значение прочности при растяжении 495,9 МПа, при этом максимальные прочностные свойства зафиксированы у образца 4.1. Прочность при растяжении группы образцов № 5 по усредненному показателю составила 436,7 МПа. Из группы образцов № 6 наилучшая прочность была у образца 6.1, а среднее значение составило 62,1 МПа.

Автоматический модуль Юнга (АМЮ) в гигапаскалях (ГПа) показывает, насколько материал жесткий или упругий, данный параметр указывает на способность материала сопротивляться деформации под воздействием внешних сил: чем выше значение модуля Юнга в ГПа, тем жестче и менее деформируем материал (рисунок 1). Образец № 6 обладает самым низким модулем Юнга и легко деформируется, тогда как наиболее жестким и упругим является образец № 4.

Таблица 1 – Результаты испытаний на растяжение полученных композитных материалов

Table 1 – Results of Tensile Tests of the Obtained Composite Materials

Образец	Скорость, мм/мин	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь поперечного сечения, мм ²	Максимальное напряжение при растяжении, МПа	Максимальная нагрузка, Н	Автоматический модуль Юнга, ГПа
Группа образцов 1: углеродная ткань саржевого переплетения 2/2 (12К, 1000, 400), связующее ЭД-20 с отвердителем ПЭПА, метод ручной укладки							
1.1	2,00	1,71	25,04	42,56	325,23	13838,32	21,77
1.2	2,00	1,77	25,81	45,42	263,54	11967,17	18,72
1.3	2,00	1,76	25,06	44,08	315,13	13893,08	20,53
Среднее	2,00	1,75	25,28	44,03	301,31	13232,87	20,33
Группа образцов 2: углекань саржа 2/2 (12К, 1000, 400), эпоксидный компаунд Этап Карбон-257У Light, ручная технология формования							
2.1	2,00	1,82	16,35	29,59	399,52	11815,68	26,07
Среднее	2,00	1,82	16,35	29,59	399,52	11815,68	26,07
Группа образцов 3: углеродное полотно саржевого типа 2/2 (12К, 1000, 400), смола ЭД-20, отвердитель ПЭПА, вакуумное формование							
3.1	2,00	2,08	25,06	52,36	456,40	23887,32	28,98
3.2	2,00	2,19	25,71	56,04	487,20	27292,22	29,64
3.3	2,00	1,98	25,11	49,46	497,90	24616,22	29,88
Среднее	2,00	2,09	25,29	52,62	480,50	25265,25	29,52
Группа образцов 4: углекань саржа 2/2 (12К, 1000, 400), эпоксидный состав Этап Карбон-257У Light, вакуумное формование							
4.1	2,00	1,65	25,00	41,25	602,80	24869,53	35,41
4.2	2,00	1,66	24,97	41,44	486,20	20139,13	37,65
4.3	2,00	1,69	25,03	42,27	398,50	16852,70	45,96
Среднее	2,00	1,67	24,98	41,74	495,80	20693,92	39,60
Группа образцов 5: углеродная ткань саржевого переплетения 2/2 (12К, 1000, 400), компаунд Этап Карбон-257У Light, вакуумная инфузия							
5.1	2,00	2,08	25,02	51,78	512,19	26526,85	28,28
5.2	2,00	2,10	25,31	53,14	450,01	23908,51	29,05
5.3	2,00	2,09	24,90	52,05	347,89	18104,73	29,72
Среднее	2,00	2,09	25,08	52,41	436,69	22883,07	29,02
Группа образцов 6: углекань саржа 2/2 (3К, 1000, 200), смола ЭД-16 с отвердителем ПЭПА, вакуумное формование							
6.1	2,00	4,82	24,95	120,55	44,89	5413,15	8,03
6.2	2,00	4,30	25,05	108,01	33,41	3607,21	6,23
6.3	2,00	4,61	25,04	115,65	107,89	12477,57	13,77
Среднее	2,00	4,58	25,03	114,85	62,09	7131,57	9,35

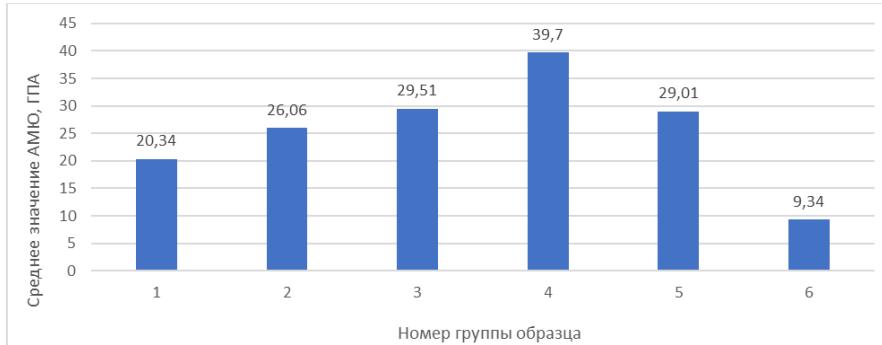


Рисунок 1 – Диаграмма распределения значений автоматического модуля Юнга

Figure 1 – Diagram of Young's Modulus Distribution Values

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье были описаны результаты проведенных экспериментов и анализ полученных результатов в ходе их проведения, дана оценка использования современных композиционных материалов в космических аппаратах. Анализ результатов показал, что использование композиционных материалов, углепластиков, в КЛА является перспективным и эффективным. Образцы из эпоксидных смол и эпоксидного компаунда с правильным соотношением отвердителя обладали высокой прочностью и устойчивостью к воздействию внешних факторов. Образцы углепластиковых композитов, полученных различными методами формования, показали различные свойства, что может быть использовано для оптимизации конструкции и повышения производительности космических летательных аппаратов.

Анализ экспериментальных данных позволил установить, что вакуумное формование представляет собой универсальный подход к изготовлению композитных образцов. Визуальный осмотр выявил однородную поверхность с минимумом структурных дефектов и выраженным глянцевым блеском. Механические испытания подтвердили, что данный метод обеспечивает максимальные прочностные показатели в сравнении с испытываемыми методами.

В результате исследования двух марок эпоксидных смол и одного эпоксидного компаунда с различным содержанием отвердителя определены рациональные пропорции связующего и отвердителя. Экспериментально установлены следующие соотношения: для смолы ЭД-20 – 85 % основы и 15 % отвердителя ПЭПА; для компаунда Этал Карбон-257У – 75 % смолы и 25 % отвердителя Этал-45; для смолы ЭД-16 – 90 % смолы и 10 % отвердителя.

При сравнительной оценке свойств материалов было выявлено, что смола ЭД-16 не подходит для производства углепластиков с любым плетением ткани из-за высокой вязкости, которая не позволяет обеспечивать равномерную пропитку углеткани всех типов плетения. Смола ЭД-20 совместима с двумя из трех технологий формования, проявляя высокие физико-механические характеристики. Однако использование этой смолы ограничено технологическими особенностями. Эпоксидный компаунд Этал Карбон-257У Light сочетает высокую текучесть, малое количество дефектов структуры и максимальные прочностные параметры при достаточно низкой стоимости, что делает его предпочтительным и универсальным для промышленного применения в сравнении с остальными связующими. Наряду с компаундом, смола ЭД-20 может рассматриваться как альтернатива, но с использованием меньших способов выкладки.

Из-за низкой электропроводности и достаточно высокого предела прочности данные углепластики подойдут для использования в различных сенсорах и антенных малых КЛА (типа CubeSat), работающих на низких околоземных орбитах, так как они способствуют устранению электромагнитных помех и поддержанию электромагнитной совместимости. В некоторых случаях за счет теплоизоляционных свойств полученные углепластики можно применять при защите космических аппаратов от нагрева, а также для создания обтекателей и топливных баков. Кроме того, произведенные композитные материалы могут быть использованы для обеспечения точности работы оптических и электронных систем на борту КЛА. Практическое применение подобных углепластиковых композитов позволит производить более легкие, прочные и эффективные конструкции КЛА. Это, в свою очередь, способствует снижению экономических затрат и повышению количества успешных космических миссий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Термостабильные композиционные материалы / Е.Н. Сабадаха, Н.Р. Прокопчук, А.Л. Шутова, А.И. Глоба // Труды БГТУ, серия 2.2017. № 2. С. 108–117. УДК 678.6.
2. Проектирование конструкции сухого отсека ракеты-носителя из композиционных материалов в виде оболочки, подкреплённой гофрированным листом / К.В. Пересыпкин, А.А. Старкова, Ю.Е. Галкина // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета. 2020. № 1(16). С. 28–34. EDN ULLKBR.
3. Колодяжная И.Н., Сгибнева И.В. Перспективные сочетания материалов криогенных топливных баков ракет-носителей // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 6(120). С. 31–34. EDN PVUFMO.
4. Применение перспективных композиционных материалов для проектирования ракетно-космической техники / А.В. Власенко, В.В. Скрябин ; научный руководитель М.Д. Евтифьев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики 2016. Том 1. Красноярск : Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева., 2016. С. 7173. УДК 629.78.
5. Храменкова А.В., Арискина Д.Н. Исследование композиционных оксидных материалов на углеволокнистом носителе методами x-ray и XPS спектроскопии // Электрохимия органических соединений. ЭХОС-2018: Тезисы докладов XIX Всероссийского совещания с международным участием, Новочеркасск, 03–06 октября 2018 года / Под общей редакцией А.Г. Крвенко, В.А. Курмаза. Новочеркасск : "НОК", 2018. С. 162–163. EDN VTAODC.
6. Пути повышения надёжности работы узлов раскрытия космических аппаратов с отложенным срабатыванием / А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов [и др.] // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 4(38). С. 60–67. EDN ZTSMHN.
7. Пути повышения надёжности работы узлов раскрытия космических аппаратов с отложенным срабатыванием / А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов [и др.] // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 4(38). С. 60–67. EDN ZTSMHN.
8. Решение задачи снижения деструктивного воздействия на элементы пускового устройства и стартового сооружения при старте ракеты-носителя / В.В. Козлов, А.В. Лагун, А.Д. Сыров // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2021. № 679. С. 221–231. EDN UVAKPI.
9. Способ оценивания теплового воздействия на железобетонные конструкции при аварийном возгорании компонентов ракетного топлива / Ю.А. Загрутдинов, А.В. Казимиров, С.А. Мачнев // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2018. № 663. С. 86–89. EDN ZDYNZB.
10. Физико-химические свойства и катализическая активность композиционных материалов "металл-углеродный носитель" / Н.С. Коботаева, Т.С. Скороходова, Г.И. Раздъяконова, О.Х. Полещук // Журнал физической химии. 2017. Т. 91. № 7. С. 1124–1131. DOI: 10.7868/S0044453717070184. EDN YULQHL.
11. Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении / В.А. Рогов, М.И. Шкарупа, А.К. Велис // Вестник РУДН, серия Инженерные исследования. 2012. № 2. С. 41–49. УДК 621.43.068.5.
12. Российские физики провели испытания радиационной стойкости отечественных композитных материалов для космических летательных аппаратов // Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН. URL : <https://academcity.org/content/ugleplastik-dlya-kosmosa> (дата обращения: 11.07.2023).
13. Космос как задача. Из чего и как делают

обшивку головной части российских ракет-носителей / Левин Д. // N+1: URL: <https://nplus1.ru/material/2020/06/03/spaceships-composite-materials>. (дата обращения: 11.07.2023).

14. ГОСТ 56785-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов.

Информация об авторах

В. В. Соловьев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Стартовые и технические ракетные комплексы», Амурский государственный университет.

М. А. Аревков – старший преподаватель кафедры «Стартовые и технические ракетные комплексы», Амурский государственный университет.

А. Д. Рычкова – студент кафедры «Стартовые и технические ракетные комплексы», Амурский государственный университет.

В. П. Березовская – студент кафедры «Стартовые и технические ракетные комплексы», Амурский государственный университет.

Information about the authors

V.V. Solovyov - is a candidate of technical sciences, associate professor at the Department of Launch and Technical Rocket Complexes, Amur State University.

M.A. Arevkov - is a senior lecturer at the Department of Launch and Technical Rocket Complexes, Amur State University.

A.D. Rychkova - is a student at the Department of Launch and Technical Rocket Complexes, Amur State University.

V.P. Berezovskaya - is a student at the Department of Launch and Technical Rocket Complexes, Amur State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06 мая 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 06 May 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК 549.6

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.025

EDN: VGKBHK

ПОЛУЧЕНИЕ ДИОПСИДА НА ОСНОВЕ ЗОЛЫ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОГО СИНТЕЗА

Илья Дмитриевич Твердов¹, Елена Михайловна Готлиб²,
Алина Равилевна Валеева³, Екатерина Сергеевна Ямалеева⁴,

¹ Университете Иннополис, Иннополис, Россия, idtverdov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7524-3038>

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия
egotlib@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2318-7333>

³ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия, alina.valeevaa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9159-7863>

⁴ Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия
curls888@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5754-205X>

Аннотация. Эффективность применения диопсида в рецептуре керамических и других строительных материалов, а также для наполнения полимерных композиций, и одновременные сложности при его промышленной добыче и переработке делают актуальным синтез диопсида на основе доступных исходных компонентов, например, продукта карбонизации отхода рисового производства. При этом для получения данного минерала перспективно использовать достаточно простой и дешевый твердофазный синтез золы рисовой шелухи и доломит как доступный источник кальция и магния.

Оптимизация соотношения исходных компонентов в шихте проводилась на основе анализа фазового состава продукта твердофазной реакции методом РКФА с целью получения максимального содержания диопсида у синтезированного кальция магниевого силиката. Плавку проводили 3 часа при 1100 °С. Снижение температуры твердофазного синтеза было достигнуто за счет добавления плавня – борной кислоты. Установлено, что максимальное содержание диопсида (96 %) обеспечивает состав шихты (%): плавня – 5, золы рисовой шелухи – 37, доломита – 58. Хвостовыми примесями при этом являются кристобалит и акерманит (кристаллические оксиды кремния). Необходимость существенного избытка доломита, по отношению к золе рисовой шелухи, обусловлена тем, что в процессе синтеза диопсида доломит разлагается с выделением углекислого газа, что приводит к пористости получаемого продукта, которая относительно невысокая. Образец оптимального состава имеет довольно равномерную структуру, согласно данным электронно-микроскопического анализа.

На однородность его структуры указывает также унимодальное, относительно узкое распределение частиц по размерам, у максимального количества которых диаметр порядка 1 мкм. Синтетический диопсид имеет близкие к нейтральным значения рН, вероятно, из-за использования при его получении борной кислоты, и невысокие значения маслопемкости из-за относительно небольшого общего объема пор.

Ключевые слова: диопсид, зола рисовой шелухи, фазовый состав, твердофазный синтез, дисперсность, пористость.

Благодарности: авторы выражают признательность сотрудникам комплексной лаборатории «Нано Аналитика».

Для цитирования: Твердов И. Д., Готлиб Е. М., Валеева А. Р., Ямалеева Е. С. Получение диопсида на основе золы рисовой шелухи методом твердофазного синтеза // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 163–167. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.025. EDN: <https://elibrary.ru/VGKBHK>.

Original article

PRODUCTION OF DIOPSIDE BASED ON RICE HUSK ASH BY SOLID-PHASE SYNTHESIS METHOD

Ilya D. Tverdov¹, Elena M. Gotlib², Alina R. Valeeva³, Ekaterina S. Yamaleeva⁴

¹ Innopolis University, Innopolis, Russia, idtverdov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7524-3038>

² Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia egotlib@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2318-7333>

³ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia, alina.valeevaa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9159-7863>

⁴ Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia curl888@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5754-205X>

© Твердов И. Д., Готлиб Е. М., Валеева А. Р., Ямалеева Е. С., 2025

Abstract. The effectiveness of using diopside in the formulation of ceramic and other building materials, as well as for filling polymer compositions, and the simultaneous difficulties in its industrial extraction and processing make it relevant to synthesize diopside based on available starting components, for example, the carbonization product of rice production waste. At the same time, to obtain this mineral it is promising to use a fairly simple and cheap solid-phase synthesis of rice husk ash and dolomite as an accessible source of calcium and magnesium.

Optimization of the ratio of the initial components in the charge was carried out on the basis of an analysis of the phase composition of the solid-phase reaction product using the XRF method, in order to obtain the maximum diopside content of the synthesized calcium magnesium silicate. Melting was carried out for 3 hours at 1100 °C. A decrease in the temperature of solid-phase synthesis was achieved by adding flux - boric acid. It has been established that the maximum content of diopside (96%) is provided by the composition of the charge (%): flux - 5, rice husk ash - 37, dolomite - 58. The tail impurities in this case are cristobalite and ackermanite (crystalline silicon oxides). The need for a significant excess of dolomite in relation to rice husk ash is due to the fact that during the synthesis of diopside, dolomite decomposes with the release of carbon dioxide, which leads to the porosity of the resulting product, which is relatively low. A sample of the optimal composition has a fairly uniform structure, according to electron microscopic analysis.

The homogeneity of its structure is also indicated by the unimodal, relatively narrow distribution of particle sizes, the maximum number of which has a diameter of about 1 μm . Synthetic diopside has close to neutral pH values, probably due to the use of boric acid in its preparation, and low oil absorption values due to the relatively small total pore volume.

Keywords: diopside, rice husk ash, phase composition, solid-phase synthesis, dispersity, porosity.

Acknowledgements: the authors are grateful to the staff of the «NanoAnalytics» integrated laboratory.

For citation: Tverdov, I.D., Gotlib, E.M., Valeeva, A.R. & Yamaleeva, E.S. (2025). Production of diopside based on rice husk ash by solid-phase synthesis method. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 163-167. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.025. EDN: <https://elibrary.ru/VGKBHK>.

ВВЕДЕНИЕ

Диопсид успешно используется в рецептуре различных строительных материалов [1, 2], в частности, для производства керамических изделий и фаянса, сухих смесей, а также он интересен как наполнитель полимерных композиций [3, 4].

Однако в связи со сложностью и трудозатратностью разработки отечественных месторождений этого кальций-магниевого силиката (КМС) [5] рационально получать синтетический кальций-магниевый силикат. Например, для этого эффективно использовать в качестве одного из компонентов продукт карбонизации отхода производства риса (ЗРШ) [6], который широко известен для получения волластонита [7]. Но мы нашли только одну работу иностранных авторов [8], посвященную применению ее для синтеза диопсида.

МЕТОДЫ

Твердофазным методом в муфельной печи при термической обработке 3 часа при 1100 °C из ЗРШ (ТУ23.20.13.-004-92313540-2018) и доломита (ГОСТ 23672-2020), при их разных соотношениях в шихте, в присутствии 5 % плавня – борной кислоты (ГОСТ 18704-78), был получен синтетический диопсид (СД) [9].

На многофункциональном дифрактометре Rigaku Smart Lab оценивалась фазовая структура синтезированного кальций-магниевого силиката

Методами Брунауэра, Эмметта и Теллера (BET – метод ISO 9277:2010 газовой низкотемпературной сорбции азота и газоглущения (ISO 15901-2:2006) на приборе Quantachrome Nova 1200e определялись параметры пористости структуры СД.

pH-метром марки SevenMulti при 20 °C определялись кислотно-основные свойства поверхности полученных наполнителей

Методом лазерной дифракции определялся размер частиц СД (ГОСТ Р 8.777-2011).

Маслоемкость определялся по ГОСТ 21119.8-75.

На растровом микроскопе Jeol JSM7001F с использованием детектора Oxford X-max 80 определялась структура наполнителей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Авторы [8] получали синтетический диопсид (СД) с использованием ЗРШ золь-гель методом.

Несмотря на высокий выход и качество синтезированного ими продукта [8], по нашему мнению, твердофазный синтез является наиболее легким и недорогим методом получения диопсида.

Конечно, для большего выхода целевого продукта при использовании этого способа и интенсивного фазообразования при спекании компонентов необходима изотермическая выдержка исходной смеси при относительно высокой температуре [2].

В то же время длительность процесса твердофазного синтеза значительно меньше, чем при применении гель-золь метода, и нет необходимости в использовании дополнительных химических реагентов, за исключением плавня [10].

Использование доломита рационально из-за его доступности и более простой подготовки шихты вследствие оптимального состава этого кальций-магниевого карбоната [11].

Оптимизация соотношения исходных компонентов в шихте проводилась на основе анализа фазового состава продукта твердофазной реакции методом РКФА [10] с целью получения максимального содержания диопсида у синтезированного кальция магниевого силиката.

Золу рисовой шелухи и доломит предварительно измельчали до размера частиц 24–125 μm в планетарной мельнице Pulverisette 7 с использованием керамической ступки и десяти шариков (скорость вращения 200 об/мин, время – 10 минут), после смешивали с порошком борной кислоты в соответствующих соотношениях (табл. 1) в той же планетарной мельнице [10].

Полученную смесь обжигали в тиглях корундового типа в муфельной лабораторной печи марки Snol.

Плавку осуществляли при изотермической выдержке 3 часа при 1100 °C и скорости повышения температуры 5 град/мин. Затем расплав медленно охлаждали в этой же печи после ее выключения. Полученный спекшийся продукт извлекали из тигля и измельчали в ступке до однородной массы (рис. 1) [12].

Нам удалось упростить технологию синтеза диопсида по сравнению с известными способами [8, 13] и значительно снизить время выхода целевого продукта.

ПОЛУЧЕНИЕ ДИОПСИДА НА ОСНОВЕ ЗОЛЫ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОГО СИНТЕЗА

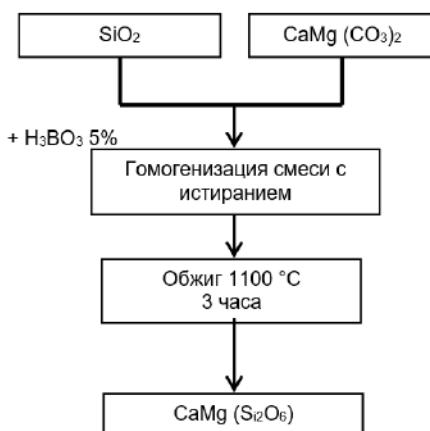


Рисунок 1 – Технологическая схема получения диопсида на основе ЗРШ

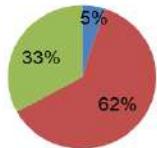
Figure 1 – Technological scheme for the production of diopside based on RHA

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты (рис. 1) свидетельствуют о том, что максимальное содержание диопсида (96 %) в составе синтезированных образцов обеспечивает концентрация в шихте (%) плавня – 5, ЗРШ – 37, доломита – 58. Хвостовыми примесями при этом являются кристоболит и акерманит (кристаллические оксиды кремния).

Фазовый состав: Диопсид – 61 %, Акерманит – 23 %, Форстерит – 8 %, Волластонит – 7 %

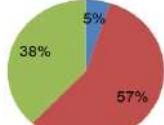
■ Плавень ■ Доломит ■ ЗРШ ■



Кальций-магниевый силикат № 1

Фазовый состав: Диопсид – 97 %, Тридимит – 2 %, Кристоболит – 1 %

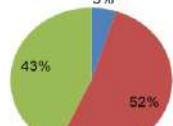
■ Плавень ■ Доломит ■ ЗРШ ■



Кальций-магниевый силикат № 2

Фазовый состав: Диопсид – 97 %, Тридимит – 2 %, Кварц и кристоболит – следы

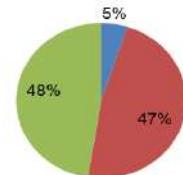
■ Плавень ■ Доломит ■ ЗРШ ■



Кальций-магниевый силикат № 3

Фазовый состав: Диопсид – 97 %, Тридимит – 2 %

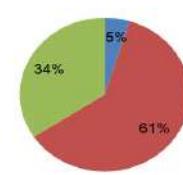
■ Плавень ■ Доломит ■ ЗРШ ■



Кальций-магниевый силикат № 4

Фазовый состав: Диопсид – 51 %, Тридимит – 29 %, Акерманит – 19 %, Кристоболит – 1 %

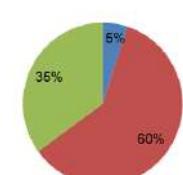
■ Плавень ■ Доломит ■ ЗРШ ■



Кальций-магниевый силикат № 5

Фазовый состав: Диопсид – 88 %, Акерманит – 11 %, Кристоболит – 1 %

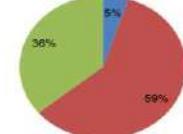
■ Плавень ■ Доломит ■ ЗРШ ■



Кальций-магниевый силикат № 6

Фазовый состав: Диопсид – 83 %, Акерманит – 14 %, Кристоболит – 2 %, Тридимит – 1 %

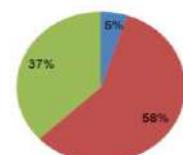
■ Плавень ■ Доломит ■ ЗРШ ■



Кальций-магниевый силикат № 7

Фазовый состав: Диопсид – 96 %, Акерманит – 3 %, Кристоболит – 1 %

■ Плавень ■ Доломит ■ ЗРШ ■



Кальций-магниевый силикат № 8

Рисунок 2 – Фазовый состав КМС, синтезированных на основе шихты с разным соотношением компонентов ЗРШ:Доломит:Плавень

Figure 2 – Phase composition of CMS synthesized on the basis of a charge with different ratios of the components: AGR:Dolomite:Plaven

Таким образом, максимальное количество цевевого компонента (диопсида) содержит образец,

синтез которого проводился при значительно большем содержании доломита, чем ЗРШ. Это можно объяснить разложением доломита с получением углекислого газа и оксидов магния и кальция в процессе синтеза диопсида. В результате выравнива-

Таблица 1 – Пористость синтетического диопсида

Table 1 – Porosity of synthetic diopside

Удельная поверхность пор БЭТ, м ² /г	Общий объем пор по ВЖН, см ³ /г	Средний диаметр пор по ВЖН, нм
0,614	0,001	4,11

При неоптимальном составе шихты получаемый продукт, кроме кристаллических оксидов кремния, содержит еще акерманит ($\text{Ca}_2\text{Mg} [\text{Si}_2\text{O}_7]$) – кальций-магниевый силикат, отличающийся от диопсида строением кристаллической решетки [4,14], а также форстерит (Mg_2SiO_4) – ортосиликат магния. В составе одного из полученных образцов обнаружено небольшое (7 %) содержание волластонита (рис. 3).



Рисунок 3 –Электронно-микроскопический снимок СД (увеличение 2·10³х)

Figure 3 –Electron microscopic image of SD (magnification 2·10³x)

Образец с наибольшим содержанием диопсида (96 %) имеет довольно равномерную структуру, согласно данным электронно-микроскопического анализа (рис. 3). На однородность его структуры указывает также унимодальное, достаточно однородное распределение частиц по размерам (рис. 4).

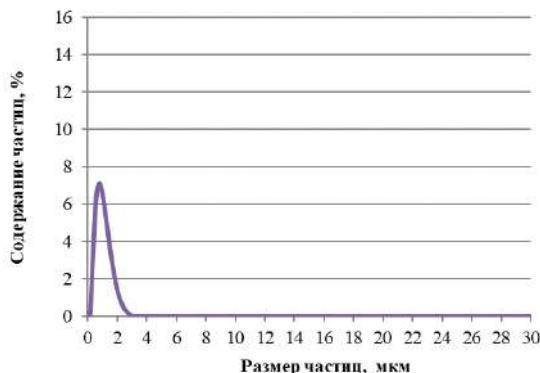


Рисунок 4 – Характер распределения частиц СД по размерам

Figure 4 – The nature of the particle size distribution of SD

Синтезированный продукт имеет частицы диаметром от 1 до 3 мкм (рис. 4), и их средняя удельная площадь 1958 см²/см³.

Получен достаточно тонкодисперсный наполнитель, что должно положительно сказаться на расши-

рении соотношение этих оксидов с диоксидом кремния из продукта карбонизации отхода производства риса.

Разложение доломита приводит к пористости СД, которая относительно невысокая (табл. 1).

рении областей его применения при изготовлении отделочных материалов, в частности керамической плитки.

Таблица 2 – Маслоемкость и кислотно-основные свойства наполнителя

Table 2 – Oil capacity and acid-base properties of the filler

Маслоемкость, г/100 г	pH водной вытяжки (20°C)
13	8

Синтетический диопсид имеет близкие к нейтральным значения pH (табл. 2), вероятно, из-за использования при его получении борной кислоты, для снижения температуры спекания исходных компонентов [4]. У него невысокие значения маслоемкости из-за небольшого объема пор (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа фазовой структуры полученного продукта определен оптимальный состав исходной смеси для синтеза по твердофазной реакции кальций-магниевого силиката с максимальным содержанием диопсида. Установлен высокий выход целевого продукта и наличие у него довольно однородной структуры, относительно невысокой пористости, низкой маслоемкости и нейтральной природы поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верещагин В.И., Бурученко А.Е., Меньшикова В.К. Безусадочный облицовочный керамический материал на основе диопсидового сырья // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 13–19.
2. Верещагин В.И., Могилевская Н.В., Сафонова Т.В. Спекание и прочность стеновой керамики и фаянса из композиций глинистого и диопсидодержащего сырья // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 6. С. 122–133. doi: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-122-133.
3. Исследование материалов на основе полиэфирной смолы и диопсида / В.В. Козик [и др.] // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2004. Т. 47. № 1. С. 112–115.
4. Готлиб Е.М., Ямалеева Е.С. Диопсид содержащие наполнители // Мин-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. Казань : КНИТУ, 2023. 106 с.
5. Synthesis, phase composition and microstructure of colored ceramic materials based on diopside / L. Lakov [et al] // International scientific journal Materials science. 2020. I. 3. P. 77–79.
6. Rohani A.B. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk / A.B. Rohani, Y. Rosiyah, N.G. Seng // Procedia Chemistry. 2016. V. 19. P. 189–195.
7. Synthesis and Characterization of Nano-Wollastonite from Rice Husk Ash and Limestone / H. Ismail [et al] // Materials Science Forum. 2013. Vol. 756. P. 43–47.
8. A novel cost-effective approach to fabricate diopside bioceramics / P.A. Srinath [et al] // Advanced powder technology. 2021. V. 32. No 3. P. 875–884.

ПОЛУЧЕНИЕ ДИОПСИДА НА ОСНОВЕ ЗОЛЫ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОГО СИНТЕЗА

9. Диопсид как наполнитель эпоксидных полимеров. / И.Д. Твердов [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 4. С. 11–15.

10. Способ получения диопсида: пат. 2801146 Рос. Федерации № 2022131067; заявл. 29.11.2022; опубл. 02.08.2023, Бюл. № 22. 2 10.

11. Vereshchagin V.I. Ceramic tiles containing diopside and clay raw materials from Khakassia / V.I. Vereshchagin // Glass and Ceramics. 2000. Vol. 57. P. 87–90. doi:10.1007/BF026815.

12. Готлиб Е.М., Ямалеева Е.С., Твердов И.Д., Михагин К.А., Ха Ф.Т.Н. Применение рисовой шелухи как сырья для получения волластонит- и диопсидодержащих наполнителей // Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Экология родного края: проблемы и пути их решения. Киров: Изд-во: Вятский государственный университет, 2023. Т. 1. С. 418–421.

13. Biominerization, antibacterial activity and mechanical properties of biowaste derived diopside nanopowders / R. Choudhary [et al] // Adv Powder Technol. 2019. Vol. 30. Is. 9. P. 1950–1964. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.06.014>.

14. Effect of Cr_2O_3 on Crystallization of Diopside Glass-Ceramics / Y. Wang [et al] // Crystals. 2022. Vol. 12. P. 1714. <https://doi.org/10.3390/cryst12121714>.

Информация об авторах

И. Д. Твердов – инженер, университета Иннополис.

Е. М. Готлиб – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии синтетического каучука» Казанского национального исследовательского технологического университета.

А. Р. Валеева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение, сварка, и производственная безопасность» Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ.

Е. С. Ямалеева – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Медицинская инженерия» Казанского национального исследовательского технологического университета.

REFERENCES

1. Vereshchagin, V.I., Buruchenko, A.E., Menshikova, V.K. (2015). Non-detractionem contra materiam ceramicam fundatam in diopside materiarum ruditum. *Problemata moderna scientiae et educationis*. (№ 1-1). 13-19. (In Russ.).

2. Vereshchagin, V.I., Mogilevskaya, N.V. & Safonova, T.V. (2019). Sintering and strength of wall ceramics and faience from compositions of clay and diopside-containing raw materials. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. (Vol. 21). (№ 6). 122-133. (In Russ.). doi: 10.31675/1607-1859-2019-216-122-133.

3. Kozik, V.V., Borodina, I.A., Borilo, L.P. & Slizhov, Yu.G. (2004). Research of materials based on polyester resin and diopside. *Izvestia of Higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. (Vol. 47). (№ 1). 112-115.

4. Gotlib, E.M. & Yamaleeva, E.S. (2023). Diopside continens fillerum. Kazan. nationalis investigationis technol. univ. Kazan: KNRTU. 106.

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

Статья поступила в редакцию 28 июня 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 28 June 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 66.017

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.026

EDN: WTMALC

НАПОЛНЕНИЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА СИНТЕТИЧЕСКИМ ВОЛЛАСТОНИТОМ, ПОЛУЧЕННЫМ НА ОСНОВЕ РАЗНЫХ ВИДОВ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Сахаяна Николаевна Данилова¹, Екатерина Сергеевна Ямалеева²,
Елена Михайловна Готлиб³, Софья Борисовна Ярусова⁴,
Павел Сергеевич Гордиенко⁵, Айталина Алексеевна Охлопкова⁶,
Любовь Николаевна Иванова⁷

^{1, 6, 7} Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия

¹ dsn.sakhayana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>

⁶ okhlopkova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>

^{2, 3} Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

² egotlib@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2318-7333>

³ curl888@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5754-205X>

^{4, 5} Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Россия

⁴ yarusova_10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1500-1319>

⁵ pavel.gordienko@mail.ru

⁷ luvana05@gmail.com

Аннотация. В работе проведен сравнительный анализ влияния волластонита на механические и трибологические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Актуальность работы обусловлена получением принципиально новых данных по модификации СВМПЭ и разработкой нового состава полимерных композиционных материалов. Полимерная матрица СВМПЭ в данной работе отличается средней молекулярной массой и средним размером частиц, и характеризуется высокой прочностью и самосмазывающимися свойствами. Однако, для СВМПЭ характерны низкие показатели износостойкости, поэтому для его модификации и армирования используется синтетический волластонит. Синтез этого силиката кальция рационально проводить на основе золы рисовой шелухи и отходов производства борной кислоты (борогипса). Для модификации СВМПЭ с высокой молекулярной массой 9 млн г/моль использовали волластонит, полученный из рисовой шелухи, а для модификации СВМПЭ с молекулярной массой 5 млн г/моль – волластонит из борогипса. Установлено, что с точки зрения улучшения деформационно-прочностных характеристик СВМПЭ и повышения его модуля упругости более эффективным является волластонит, полученный на основе отходов производства борной кислоты. Так, прочность композитов увеличивается на 27 %, модуль упругости на 50 %, а относительное удлинение на 18 %, при этом износостойкость возрастает в три раза. Волластонит, полученный из отходов рисовой шелухи, показал себя как перспективный наполнитель для улучшения антифрикционных свойств СВМПЭ, таких, как более низкий коэффициент трения и минимальная скорость изнашивания. Показано, что данный тип волластонита снижает скорость массового изнашивания на 36 % и коэффициент трения на 29 %, по сравнению с исходным полимером.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, волластонит, борогипс, зола рисовой шелухи, деформационно-прочностные и антифрикционные свойства

Благодарности: Исследование ПКМ проводилось в рамках ГЗ № FSRG–2023–0026. Работы по синтезу волластонита из борогипса выполнены в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН (FWFN(0205)-2022-0002, тема 2, раздел 3).

Для цитирования: Наполнение сверхвысокомолекулярного полиэтилена синтетическим волластонитом, полученным на основе разных видов побочных продуктов / С.Н. Данилова [и др.]. // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 168–175. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.026. EDN: <https://elibrary.ru/WTMALC>.

Original article

FILLING OF ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE WITH SYNTHETIC WOLLASTONITE OBTAINED FROM VARIOUS TYPES OF BY-PRODUCTS

Sakhayana N. Danilova¹, Ekaterina S. Yamaleeva², Elena M. Gotlib³,
Sofia B. Yarusova⁴, Pavel S. Gordienko⁵, Aitalina A. Okhlopkova⁶,
Lyubov N. Ivanova⁷

^{1, 6, 7} North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

¹ dsn.sakhayana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>

⁶ okhlopkova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>

^{2, 3} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

² egotlib@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2318-7333>

³ curl888@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5754-205X>

^{4, 5} Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

⁴ yarusova_10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1500-1319>

⁵ pavel.gordienko@mail.ru

⁷ liuvana05@gmail.com

Abstract. The work presents a comparative analysis of the influence of wollastonite on the mechanical and tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). The relevance of the work is discussed by obtaining fundamentally new data on the modification of UHMWPE and the development of a new composition of polymer composite materials. The polymer matrix of UHMWPE in this work is characterized by an average molecular weight and an average particle size, which are characterized by high strength and self-lubricating properties. However, this polymer matrix is characterized by low wear resistance, so synthetic wollastonite is used for its modification and reinforcement. It is rational to synthesize this calcium silicate on the basis of rice husk ash and waste from boric acid production (borogypsum). Wollastonite obtained from rice husk was used to modify ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) with a high molecular weight of 9 million g/mol. Wollastonite from borogypsum was used to modify another UHMWPE sample with a molecular weight of 5 million g/mol. It was found that wollastonite obtained from boric acid waste is more effective in terms of improving the deformation and strength characteristics of UHMWPE and increasing its elastic modulus. Thus, the strength of composites increases by 27%, the elastic modulus by 50%, and the relative elongation by 18%, while wear resistance increases threefold. Wollastonite obtained from rice husk waste has proven itself to be a promising material for imparting antifriction properties to UHMWPE, such as a lower friction coefficient and minimum mass wear rate. It has been shown that this type of wollastonite reduces the rate of mass wear rate by 36% and the friction coefficient by 29% compared to the initial polymer.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, wollastonite, borogypsum, rice husk ash, mechanical and antifriction properties

Acknowledgements: The study of the PCM was conducted within the framework of State Project No. FSRG-2023-0026. Synthesis of wollastonite from borogypsum were conducted within the framework of the State assignment of the Institute of Chemistry of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences (FWFN (0205)-2022-0002, theme 2, section 3).

For citation: Danilova, S. N., Yamaleeva, E. S., Gotlib, E. M., Yarusova, S. B., Gordienko, P. S., Okhlopkova, A. A. & Ivanova, L. N. (2025). Filling of ultra-high molecular weight polyethylene with synthetic wollastonite obtained from various types of by-products. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 168-175. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.026. EDN: <https://elibrary.ru/WTMALC>.

ВВЕДЕНИЕ

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) эффективно применяется для получения морозо- и износостойких полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1]. Благодаря высокой молекулярной массе данный полимер обладает высокой химической инертностью, широким температурным интервалом эксплуатации, отличной ударопрочностью и низкой паро- и газопроницаемостью.

Однако, СВМПЭ не обладает высоким модулем упругости и износостойкостью, поэтому целесообразна его модификация. При этом процесс модификации матрицы СВМПЭ с применением различных технологических приёмов остается актуальным, поскольку нераскрыты в полном объеме, так как массовое производство этого полимера начиналось лишь с 50-х гг. прошлого века.

Модификация полимерной матрицы введением наполнителей различной природы, формы и размера частиц является наиболее доступным и дешевым способом повышения функциональных свойств ПКМ.

Как перспективный наполнитель для модификации и армирования СВМПЭ известен природный волластонит [2]. Волластонит часто используется в материаловедении для придания полимерам высоких значений термостабильности и повышения прочностных и барьерных свойств, а также для улучшения биосовместимости [3].

Как известно [4], волластонит природного происхождения является метасиликатом кальция цепочечной структуры с химической формулой CaSiO_3 (или $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). Однако отечественный природный силикат кальция практически отсутствует на российском рынке, так как добывается лишь в небольших количествах, поэтому его синтез является актуальной проблемой [5].

Во многих исследованиях, хорошо изучена технология получения волластонита из порошков, содержащих кремнезем (SiO_2) и оксид кальция (CaO) [8]. Поэтому стоит вопрос получения волластонита с использованием отходов промышленности (техногенного происхождения) и сельского хозяйства. Известно [11-13], что основными способами получения волластонита являются твердофазные реакции, гидрохимические и гидротермальные

методы, синтез с помощью микроволн, метод соосаждения, золь-гель метод, расплавный метод и т.д.

В настоящее время накоплена большая база научных и практических знаний по изучению и промышленной апробации технологии синтеза волластонита.

Самыми распространёнными из вышеперечисленных являются гидротермальный и твердофазный способы получения волластонита, что объясняет их выбор и в данном исследовании.

В настоящее время имеется успешный опыт синтеза волластонита из золы рисовой шелухи [6] и отходов производства борной кислоты (борогипса) [7]. В свою очередь применение отходов для синтеза в качестве исходного сырья представляет научный интерес с точки зрения экологии и экономики.

Известно [9, 10], что борогипс содержит в своем составе аморфный кремнезем и дигидрат сульфата кальция, а рисовая шелуха является ценным источником аморфного диоксида кремния поэтому эти два отхода являются отличными прекурсорами для синтеза волластонита. В связи с этим представляется интересным сравнить модифицирующее действие этих силикатов кальция в композициях на основе СВМПЭ.

Цель работы – исследовать и сравнить влияние волластонита, синтезированного из разных отходов, на полимерную матрицу СВМПЭ.

МЕТОДЫ

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR-4022 (Celanese, Китай) с молекулярной массой 5,0 млн г/моль и со средним размером частиц 155 мкм модифицировали волластонитом из борогипса (волластонит Б). Для модификации СВМПЭ марки GUR-4150 (Celanese, Китай) с молекулярной массой 8,7 млн. г/моль и со средним размером частиц 120 мкм применяли волластонит из рисовой шелухи (волластонит З). Образцы СВМПЭ характеризуются плотностью 0,93 г/см³.

Волластонит Б получали гидротермальным методом [14] с использованием борогипса и раствора гидроксида калия марки «ч.д.а», взятых в стехиометрическом соотношении. Синтез проводили в лабораторном автоклаве при температуре 220 °C в течение 3 ч. После фильтрации, промывки и сушки полученный осадок обжигали при температуре 900 °C в течение 3 ч.

Волластонит З получали [15] методом твердофазного синтеза из оксида кальция на основе известняка и диоксида кремния из золы обожженной при 800 °C рисовой шелухи, при молярном соотношении CaO : SiO₂ = 1,2:1, в муфельной камерной печи в течение 3 ч при температуре 900 °C.

Композиты для исследований изготавливали методом горячего прессования при температуре 175 °C, давлении 10 МПа и времени выдержки 20 минут.

Механические характеристики наполненных композиций на основе СВМПЭ определяли на универсальной разрывной машине "AGS-J" (Shimadzu, Япония), согласно ГОСТ 11262 и ГОСТ 9550. Трибологические параметры определяли на приборе UMT-3 (CETR, США) при удельной нагрузке 1,9 МПа и линейной скорости скольжения 0,5 м/с по схеме трения «плунжер–диск» в течение 3 ч. Коэффициент трения исследовали, согласно ГОСТ 11629. Для расчета скорости массового изнашивания измеряли массу образца до и после трения на аналитических весах «Discovery DV215CD» (OHAUS, Швейцария). Структуру образцов в объеме и поверхности трения исследовали методом ИК спектроскопии на ИК-Фурье стенд-скан спектрометре FT IR 7000 с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (Varian, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Актуальность использования армирующих наполнителей для полимерных материалов обусловлена необходимостью улучшения их механических и трибологических свойств, в частности модуля упругости, что значительно расширяет область их применения. Армирующие наполнители позволяют создавать материалы с заданными характеристиками, такими как прочность, жёсткость, теплостойкость и т.д. В частности, введение армирующих наполнителей в полимерные композиционные материалы позволяет улучшить их адаптацию под конкретные требования и условия эксплуатации. Фактор анизотропии игольчатых частиц волластонита зависит от соотношения длины частиц к их ширине. Примечательно, что соотношение этих параметров при синтезе волластонита можно варьировать, что дает возможность контролировать степень армирования полимерной матрицы. Кроме того, адаптация полимерных композиционных материалов с помощью армирующих наполнителей позволяет создавать изделия с уникальными свойствами, которые находят применение в различных отраслях промышленности, строительстве, медицине и других областях [16, 17].

Результаты испытаний на растяжение ПКМ, наполненного волластонитом З, приведены на рис. 1. Полученные экспериментальные результаты показали, что добавление волластонита З в полимер приводит к небольшому увеличению предела прочности при растяжении (при концентрации 0,5 мас. %) и модуля упругости (при 5 мас. %), примерно на 11–12 %.

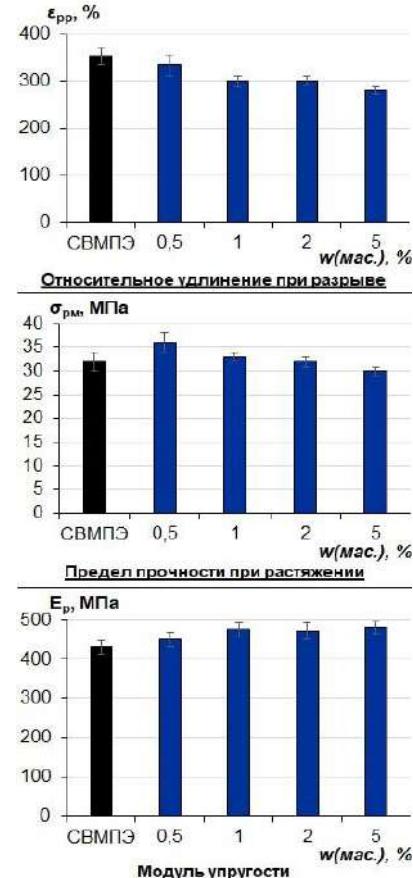


Рисунок 1 – Результаты испытаний на растяжение наполненного СВМПЭ в зависимости от содержания волластонита З

Figure 1 – Results of elongation tests of filled UHMWPE from wollastonite content A

НАПОЛНЕНИЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА СИНТЕТИЧЕСКИМ ВОЛЛАСТОНИТОМ, ПОЛУЧЕННЫМ НА ОСНОВЕ РАЗНЫХ ВИДОВ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Установлено, что относительное удлинение при разрыве ПКМ снижается до 20 % при введении 5 мас.% волластонита З. Потеря эластичности образца при добавлении волластонита может быть связана с неравномерным распределением наполнителя в объеме полимера. Из-за высокой вязкости расплава полимерной матрицы СВМПЭ с большой молекулярной массой волластонит распределяется неоднородно, что приводит к образованию дефектной структуры ПКМ. Эти дефекты выступают как дополнительные очаги напряжения, способствуя преждевременному разрушению ПКМ и расслаиванию матрицы от поверхности волластонита при растяжении.

На рис. 2 представлены результаты по растяжению ПКМ, содержащего волластонит Б.

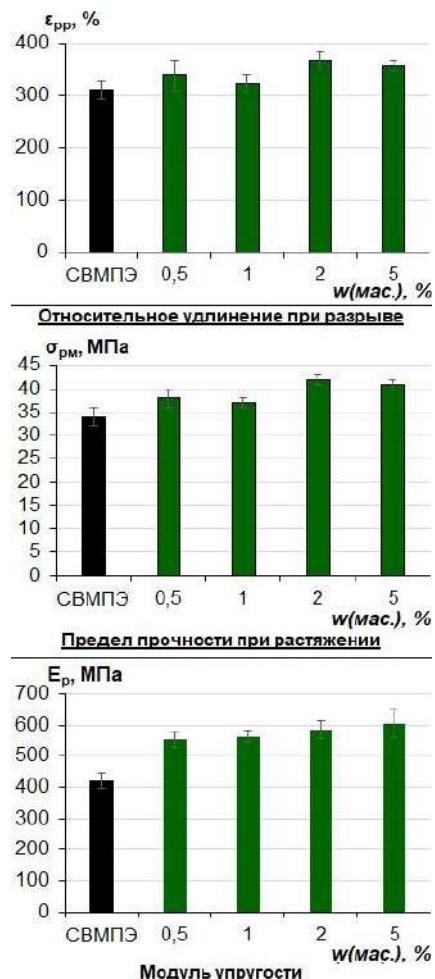


Рисунок 2 – Результаты испытаний на растяжение наполненного СВМПЭ в зависимости от содержания волластонита Б

Figure 2 – Results of elongation tests of filled UHMWPE from wollastonite content B

Волластонит, синтезированный из отходов борного производства при концентрации 2 мас.% обеспечивает повышение значений относительного удлинения при разрыве на 18 %, предела прочности при растяжении на 26 %, а модуля упругости примерно на 51 %, по сравнению с исходной полимерной матрицей (рис. 2). Первый показатель максимальен при содержании этого силиката кальция 0,5-1 мас.%, а второго при 1-5 мас.%.

POLZUNOVSKIY VESTNIK № 2 2025

(рис. 1 и рис. 2). Композиции, содержащие 5 мас.% волластонита Б, характеризуются увеличением модуля упругости на 43 %. Это свидетельствует о том, что волластонит Б может быть перспективным наполнителем для улучшения свойств полимерных композиционных материалов. Дальнейшее увеличение содержания этого наполнителя обуславливает снижение деформационно-прочностных свойств СВМПЭ.

Повышение эластичности и прочности образцов при введении волластонита Б объясняется армирующим эффектом игольчатых частиц волластонита. Кроме того, в этом случае СВМПЭ имеет меньшую молекулярную массу по сравнению с полимером, модифицированным волластонитом З. Исходя из этого макромолекулы СВМПЭ способны механически скрепляться с поверхностью волластонита Б. Также за счет снижения вязкости расплава может наблюдаться равномерное смешение и распределение волластонита Б в объеме СВМПЭ.

В рамках работы были проведены исследования прочности при сжатии ПКМ, наполненных 5 мас.% волластонита, результаты которых приведены на рис. 3. Для построения кривой брали среднее значение прочности при сжатии ПКМ при 5 мас.% содержаниях волластонита. Наполненные образцы имеют высокие значения модуля упругости, что свидетельствует об их высокой жесткости.

Как видно из кривой рис. 3, композиты, наполненные сравниваемыми наполнителями, характеризуются увеличением значений напряжения при сжатии. Введение волластонита З обеспечивает максимальное улучшение этого показателя. Так зафиксировано повышение его на 10 %, по сравнению с исходным СВМПЭ, и на 18 % относительно полимера, содержащего волластонит Б.

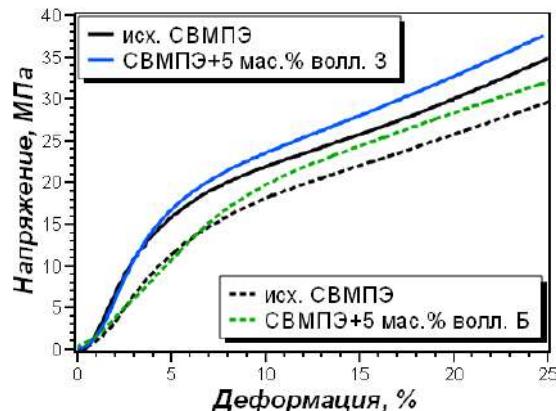


Рисунок 3 – Кривая зависимости напряжения от деформации образцов при сжатии

Figure 2 – Stress-strain curve of samples under compression

Исходя из полученных данных, ПКМ с волластонитом З проявляет сильное сопротивление по отношению к осевой нагрузке сжатия, поскольку наполнитель обладает анизотропными свойствами [18]. При этом частицы волластонита могут препятствовать преждевременной деформации матрицы, под сжимающей нагрузкой, как бы армируя и увеличивая ее прочность.

Таким образом, с точки зрения улучшения деформационно-прочностных характеристик СВМПЭ более эффективным является волластонит, полученный

из отходов производства борной кислоты, так как его введение сопровождается комплексным улучшением механических свойств.

Значения коэффициента трения и скорости массового изнашивания ПКМ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные коэффициента трения и скорости массового изнашивания ПКМ

Table 1 – Data on the coefficient of friction and the rate of mass wear of PCM

Волластонит Содержание, мас.%	3	Б	3	Б
	f		I, мг/ч	
0	0,41	0,38	0,14	0,12
0,5	0,40	0,40	0,09	0,05
1,0	0,34	0,42	0,13	0,04
2,0	0,31	0,41	0,12	0,08
5,0	0,29	0,40	0,16	0,14

Примечания: f – коэффициент трения; I, мг/ч – скорость массового изнашивания.

Введение небольшого количества волластонита 3 (0,5 мас.%) в исходный полимер приводит к значительному снижению скорости его массового изнашивания — на 36 %. При увеличении концентрации волластонита до 1–2 мас.% скорость массового изнашивания композитов остаётся примерно такой же, как у ненаполненного СВМПЭ. Однако дальнейшее повышение содержания силиката кальция до 5 мас.% приводит к увеличению скорости массового изнашивания на 14 %, что свидетельствует о превышении оптимальной концентрации волластонита 3 в композиции на основе СВМПЭ. Одновременно с увеличением концентрации волластонита 3 имеет место закономерное снижение коэффициента трения, который максимально уменьшается на 29 % при содержании 5 мас.% наполнителя.

При добавлении волластонита Б в СВМПЭ в концентрации 1 мас. % наблюдается снижение скорости массового изнашивания в 3 раза. Коэффициент трения при этом остаётся практически неизменным. Повышение содержания волластонита до 2 мас. % приводит к увеличению коэффициента трения на 10 % по сравнению с ненаполненным полимером. Однако это может быть скомпенсировано улучшением других механических характеристик ПКМ.

Увеличение коэффициента трения может быть связано с абразивным действием частиц волластонита Б в зоне трения. Можно предположить, что эти частицы обладают более высокой твердостью по сравнению с волластонитом 3. В свою очередь, волластонит 3 будет проявлять смазывающий эффект, выходя в зону трения.

Так, различие величины модифицирующего действия волластонита, полученного из борогипса и золы рисовой шелухи, связано с их разным фазовым и гранулометрическим составом [9, 19].

Стоит отметить, что при добавлении волластонита в состав СВМПЭ в количестве более 5 мас.%, износстойкость материала снижается. При этом увеличение значений скорости изнашивания наблюдается независимо от способа получения волластонита. Это может привести к тому, что материал будет быстрее изнашиваться и терять свои эксплуатационные свойства. Для того чтобы предотвратить снижение износстойкости, необходимо контролировать

содержание волластонита до его предельного значения (5 мас.%).

С точки зрения обеспечения лучших антифрикционных свойств СВМПЭ, более перспективно использование волластонита на основе золы рисовой шелухи.

Таким образом, можно предположить, что частицы синтетического волластонита активно участвуют в ориентационных эффектах в процессе изнашивания. В результате протекания ориентационных эффектов и трибохимических реакций формируется более износостойкий экранирующий слой – «вторичная структура» на поверхности трения ПКМ (в зоне между поверхностью стального контртела и полимера). В результате формирования этого слоя облегчаются релаксационные процессы скольжения и снижаются сдвиговые напряжения. Следовательно, исследованные материалы характеризуются повышенной износстойкостью [20].

Для оценки протекания трибохимических реакций поверхности трения ПКМ исследуют с помощью ИК спектроскопии с приставкой нарушенного-полного внутреннего отражения, что позволяет зафиксировать изменение спектральных параметров функциональных групп полимеров при введении наполнителей или под влиянием внешних параметров. Результаты исследования СВМПЭ и ПКМ представлены на рисунках 4 и 5.

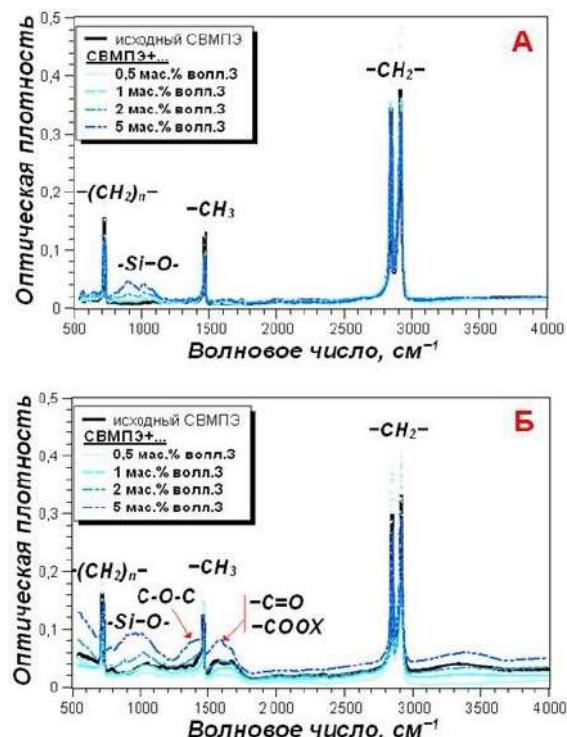


Рисунок 4 – ИК спектр СВМПЭ и ПКМ, наполненного волластонитом 3:
А – в объёме; Б – поверхности трения

Figure 4 – IR spectrum of UHMWPE and PCM filled with wollastonite A:
A – in the volume; B – friction surfaces

НАПОЛНЕНИЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА СИНТЕТИЧЕСКИМ ВОЛЛАСТОНИТОМ, ПОЛУЧЕННЫМ НА ОСНОВЕ РАЗНЫХ ВИДОВ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

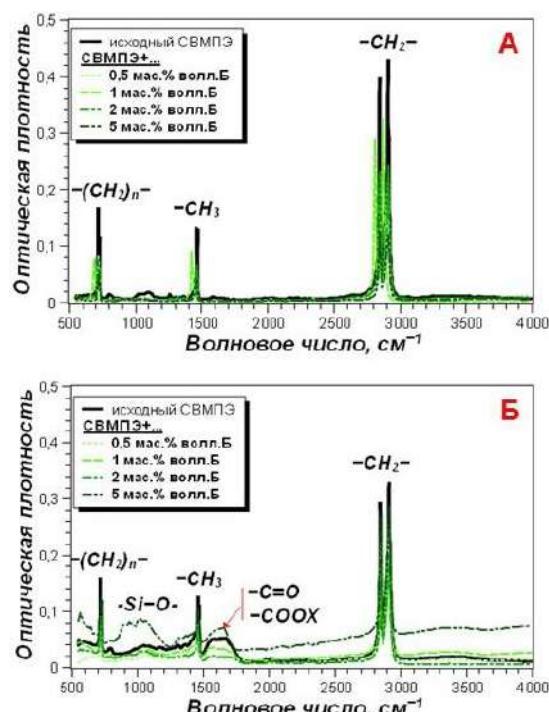


Рисунок 5 – ИК спектр СВМПЭ и ПКМ, наполненного волластонитом Б:
А – в объеме; Б – поверхности трения

Figure 5 – IR spectrum of UHMWPE and PCM filled with wollastonite B:
A – in the volume; B – friction surfaces

Известно [21], что СВМПЭ характеризуется интенсивными полосами поглощения при 2908, 2843, 1469 и 716 см^{-1} , обусловленными валентными, деформационными и маятниковыми колебаниями алкильных групп и структурного звена самого полимера.

ИК спектры до трения (рис. 4 А) ПКМ, наполненных волластонитом из золы рисовой шелухи, отличаются появлением новой полосы поглощения, в основном, силиката кальция. Так, обнаруженная область поглощения в диапазоне 774–1144 см^{-1} указывает на наличие асимметричных валентных колебаний мостиковых связей Si–O–Si, а также симметричных валентных колебаний концевых связей Si–O. При этом показано, что увеличение содержания волластонита 3 в полимере сопровождается увеличением площади и интенсивности поглощения этих пиков.

В ИК-спектре в объеме ПКМ с волластонитом из борогипса (рис. 5 А) зарегистрированы основные пики полимера, при этом полосы поглощения силиката кальция не наблюдаются, что возможно обусловлено равномерным распределением волластонита. Они появляются лишь при введении высоких концентраций волластонита Б в СВМПЭ.

На рисунке 5 А видно, что при введении 5 мас.% волластонита Б зафиксировано наличие пика при 811 см^{-1} . Кроме того, наблюдается и некоторое смещение основных пиков СВМПЭ в область меньших волновых чисел.

Установлено, что исходный СВМПЭ отличается наличием полосы поглощения в области 1000–1173 см^{-1} , относящейся к функциональной группе эфиров связи C–O–C, что свидетельствует о частичном окислении полимера во время переработки СВМПЭ.

Введение волластонита Б сопровождается снижением интенсивности этой полосы, что свидетельствует об ингибировании окислительных процессов при изготовлении ПКМ. Кроме того, это может указывать на влияние частиц силиката кальция на равномерное перераспределение температуры нагрева между компонентами композиции.

ИК-спектры поверхностей трения (рис. 4 и 5 Б) СВМПЭ и ПКМ отличаются появлением полосы поглощения при 1545–1808 см^{-1} , соответствующей окисленным карбонильным и карбоксильным группам. Кроме того, зафиксирована полоса поглощения в области 3050–3646 см^{-1} , которая является характерным пиком колебания гидроксильных групп. Это свидетельствует о протекании трибоокислительных реакций в процессе трения, которые приводят к формированию более износостойкой вторичной структуры в зоне трения [22].

В трибоокислительных реакциях участвуют все элементы металлополимерного контакта – это продукты износа, полимер, стальное контртело и частицы волластонита. Исходя из этого, объясняется увеличение интенсивности полос поглощения окисленных групп с ростом содержания волластонита. Кроме того, частицы волластонита выходят в зону трения, что подтверждается интенсификацией полосы поглощения колебаний связи Si–O. Кроме того, помимо пиков карбоксильных и карбонильных соединений, отмечается наличие полосы, соответствующей колебаниям эфирных связей.

Таким образом, методом ИК-спектроскопии доказано формирование вторичных структур на поверхностях трения ПКМ. Ориентированные вторичные структуры, образованные из продуктов трибораспада, СВМПЭ и частиц волластонита, способны локализовать деформации сдвига и защитить поверхностный слой материала от дальнейшего износа. Это объясняет повышение прочности и устойчивости к износу композитов с волластонитом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно заключить, что, в зависимости от областей применения сверхвысокомолекулярного полиэтилена, следует рекомендовать волластонит, синтезированный из золы рисовой шелухи или борогипса. Для обеспечения более высокого уровня деформационно-прочностных свойств СВМПЭ рекомендуется применение волластонита на основе борогипса в количестве 2-5 мас.%, а минимальной скорости изнашивания – 0,5-1 мас.%. Для получения антифрикционных материалов с более низким коэффициентом трения перспективно использовать волластонит из золы рисовой шелухи в количестве 1-2 мас.%.

Методом ИК-спектроскопии установлено, что волластонит Б обуславливает ингибирование окислительных процессов при изготовлении материалов на основе СВМПЭ. Волластонит 3 в большей степени участвует в трибохимических процессах по сравнению с волластонитом Б.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валуева М.И., Колобков А.С., Малаховский С.С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) //Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). С. 49–57. doi 10.18577/2307-6046-2020-0-3-49-57.

2. Галибейев С.С., Хайруллин Р.З., Архиреев В.П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы //Вестник Казанского технологического

университета. 2008. № 2. С. 50-55.

3. Gineika A., Dambrauskas T., Baltakys K. Synthesis and characterisation of wollastonite with aluminium and fluoride ions //Ceramics International. 2021. Vol. 47. N 16. P. 22900-22910. doi 10.1016/j.ceramint.2021.05.003.

4. Regueiro González-Barros M.M., García Ten J., Alonso-Jimenez A. Synthesis of wollastonite from diatomite-rich marls and its potential ceramic uses //Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2022. Vol. 61, Issue 6. P. 585-594. doi 10.1016/j.bsecv.2021.05.002

5. Исламова Г.Г. Технология синтетического волластонита из природных кальций- и кремнийсодержащих соединений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2012. 20 с.

6. Материал на основе синтетического волластонита и его влияние на функциональные свойства мелкозернистого бетона / П.С. Гордиенко [и др.] //Перспективные материалы. 2017. № 9. С. 40.

7. Synthesis and characterization of nano-wollastonite from rice husk ash and limestone / Ismail H. [et al.] //Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2013. Vol. 756. P. 43-47.

8. Silica extraction from sodium silicate for wollastonite synthesis at low temperatures / Bekhiekh I. [et al.] //Journal of Engineering Research. 2024. doi 10.1016/j.jer.2024.06.019.

9. Комплексная переработка отходов производства борной кислоты с получением материалов для стройиндустрии / Гордиенко П. С. [и др.] //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №. S4-9. С. 60-66.

10. Получение оксида кремния из рисовой шелухи методом термической обработки / Аскарулы К. [и др.] //Горение и плавикомия. 2019. Т. 17. № 3. С. 178-183. doi 10.18321/cpc324.

11. Novembre D., Pace C., Gimeno D. Synthesis and characterization of wollastonite-2M by using a diatomite precursor //Mineralogical Magazine. 2018. Vol. 82. N 1. P. 95-110. doi 10.1180/minmag.2017.081.025.

12. Vakalova T.V., Pogrebennov V.M., Karionova N.P. Solid-phase synthesis of wollastonite in natural and technogenic siliceous stock mixtures with varying levels of calcium carbonate component //Ceramics International. 2016. Vol. 42. N 15. P. 16453-16462. doi 10.1016/j.ceramint.2016.06.060.

13. In-vitro evaluation of wollastonite nanopowder produced by a facile process using cheap precursors for biomedical applications / Amin A.M.M. [et al.] //Ceramics International. 2021. Vol. 47. N 13. P. 18684-18692. doi 10.1016/j.ceramint.2021.03.201.

14. Способ получения волластонита / Гордиенко П.С. [и др.]. Пат. 2595682 Рос. Федерации № 2015141614/05; заявл. 30.09.2015; опубл. 27.08.2016, Бюл. № 24.

15. Готлиб Е.М., Ха Т.Н.Ф. Получение синтетического волластонита на основе рисовой шелухи //Вестник технологического университета. 2019. Т. 22. № 7. С. 42-46.

16. Markandan K., Lai C.Q. Fabrication, properties and applications of polymer composites additively manufactured with filler alignment control: A review //Composites Part B: Engineering. 2023. Vol. 256. P. 110661. doi 10.1016/j.compositesb.2023.110661.

17. Material Design Methodology for Optimized Wear-Resistant Thermoplastic-Matrix Composites Based on Polyetheretherketone and Polyphenylene Sulfide / Panin S.V. [et al.] //Materials. 2020. Vol. 13. N 3. P. 524. doi 10.3390/ma13030524.

18. Kadhim T.R., Olewi J.K., Hamad Q.A. Investigation of Compression and Hardness for UHMWPE Bio-composites as Internal Bone Plate Fixation //Engineering and Technology Journal. 2022. Vol. 40. N 12. P. 1783-1794. doi 10.30684/etj.2022.135083.1258.

19. Ха Тхи Нья Фыонг Эпоксидные композиции, наполненные природным волластонитом и синтетическим силикатом кальция на основе золы рисовой шелухи: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2021.

20. Самоорганизация и структурное модифицирование в металлополимерных трибосистемах: монография / Ю. К. Машков [и др.]. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. 222 с.

21. Smith B. The infrared spectra of polymers II: polyethylene //Spectroscopy. 2021. Vol. 36. Issue 9. P. 24-29. doi 10.56530/spectroscopy.xp7081p7.

21. Природа первичных актов фрикционного взаимодействия СВМПЭ с поверхностью стали / Краснов А.П. [и др.] // Трение и износ. 2013. Т. 34. № 2. С. 154-164.

Информация об авторах

С. Н. Данилова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Полимерные композиты для Севера», Институт естественных наук, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова».

Е. С. Ямалеева – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Медицинской инженерии», Институт технологии легкой промышленности, моды и дизайна, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Е. М. Готлиб – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии синтетического каучука», Институт полимеров, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

С. Б. Ярусова – кандидат химических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории защитных покрытий и морской коррозии, Институт химии ДВО РАН.

П. С. Гордиенко – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией защитных покрытий и морской коррозии, Институт химии ДВО РАН.

А. А. Охлопкова – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник-руководитель лаборатории УНТЛ «Технологии полимерных нанокомпозитов им. С.А. Слепцовой», Институт естественных наук, ФГАОУ ВО «Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова».

Л. Н. Иванова – студент 2 курса Химического отделения Института естественных наук, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова».

REFERENCES

1. Valueva, M.I., Kolobkov, A.S., & Malakhovskiy, S.S. (2020). Ultra-high molecular weight polyethylene: market, properties, directions of application (review). *Proceedings of VIAM*, 3 (87), 49-57. (In Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-49-57.

2. Galibeev, S.S., Hajrullin, R.Z., & Arhireev, V.P. (2008). Ultra-high molecular weight polyethylene. Trends and prospects. *Bulletin of the Technological University*, (2), 50-55. (In Russ.).

3. Gineika, A., Dambrauskas, T., & Baltakys, K. (2021). Synthesis and characterisation of wollastonite with aluminium and fluoride ions. *Ceramics International*, 47 (16), 22900-22910. DOI 10.1016/j.ceramint.2021.05.003.

4. Regueiro González-Barros, M.M., García Ten, J., & ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

НАПОЛНЕНИЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА СИНТЕТИЧЕСКИМ ВОЛЛАСТОНИТОМ, ПОЛУЧЕННЫМ НА ОСНОВЕ РАЗНЫХ ВИДОВ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Alonso-Jimenez, A. (2022). Synthesis of wollastonite from diatomite-rich marls and its potential ceramic uses. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 61 (6), P. 585-594. DOI 10.1016/j.bsecv.2021.05.002

5. Islamova, G.G. (2012). *Technology of synthetic wollastonite from natural calcium- and silicon-containing compounds*: autoref. dis. ... kand. tehn. nauk, Kazan. (in Russ.).

6. Gordienko, P.S., Yarusova, S.B., Kozin, A.V., Ivin, V.V., Silantiev, V.E., Lizunova, P.Yu., & Shornikov, K.O. (2017). Synthetic wollastonite-based material and its effect on the functional properties of fine-grained concrete. *Perspektivnye materialy*, (9), 40. (in Russ.).

7. Ismail, H., Shamsudin, R., Hamid, M.A.A., & Jalar, A. (2013). Synthesis and characterization of nano-wollastonite from rice husk ash and limestone. In *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 756, 43-47.

8. Bekhiekh, I., Bouzerara, F., Bouatrous, M., & Ghoul, B. (2024). Silica extraction from sodium silicate for wollastonite synthesis at low temperatures. *Journal of Engineering Research*. DOI 10.1016/j.jer.2024.06.019.

9. Gordienko, P.S., Kozin, A.V., Yarusova, S.B., Zgiby, I.G. (2014). Complex processing of the boric acid production waste with manufacture of materials for construction industry. *Mining informational and analytical bulletin (Scientific and Technical Journal)*, (S4-9), 60-66. (in Russ.).

10. Askaruli, K., Azat, S., Eleuov, M., Kerimkulova, A.R., Zhantikeyev, U.N., & Berdikhanov, A.E. (2019). Obtaining of silica from rice husk by thermal treatment. *Combustion and plasma chemistry*, 17 (3), 178-183. (in Russ.). DOI 10.18321/cpc324.

11. Noveembre, D., Pace, C., & Gimeno, D. (2018). Synthesis and characterization of wollastonite-2M by using a diatomite precursor. *Mineralogical Magazine*, 82 (1), 95-110. DOI 10.1180/minmag.2017.081.025.

12. Vakalova, T.V., Pogrebenkov, V.M., & Karionova, N.P. (2016). Solid-phase synthesis of wollastonite in natural and technogenic siliceous stock mixtures with varying levels of calcium carbonate component. *Ceramics International*, 42 (15), 16453-16462. DOI 10.1016/j.ceramint.2016.06.060.

13. Amin, A.M., El-Amir, A.A., Karunakaran, G., Kuznetsov, D., & Ewais, E.M. (2021). In-vitro evaluation of wollastonite nanopowder produced by a facile process using cheap precursors for biomedical applications. *Ceramics International*, 47 (13), 18684-18692. DOI 10.1016/j.ceramint.2021.03.201.

14. Gordienko, P.S., Yarusova, S.B., Kozin, A.V., Stepanova, V.A., Shabalina, I.A., & Zhevutun, I.G. *Method of producing wollastonite*: Pat. 2595682 Russ. Federation, publ. 27.08.2016, Bull. № 24. (In Russ.).

15. Gotlib, E.M., & Ha, Ph. (2019). Obtaining synthetic wollastonite using rice husk. *Bulletin of the Technological University*, 22 (7), 42-46. (In Russ.).

16. Markandan, K., & Lai, C.Q. (2023) Fabrication, properties and applications of polymer composites additively manufactured with filler alignment control: A review. *Composites Part B: Engineering*, 256, 110661. DOI 10.1016/j.compositesb.2023.110661.

17. Panin, S.V., Lyukshin, B.A., Bochkareva, S.A., Kornienko, L.A., Nguyen, D.A., Hiep, L.T.M., Panov, I.L., & Grishaeva, N.Y. (2020). Material Design Methodology for Optimized Wear-Resistant Thermoplastic-Matrix Composites Based on Polyetheretherketone and Polyphenylene Sulfide. *Materials*, 13 (3), 524. DOI 10.3390/ma13030524.

18. Kadhim, T.R., Olewi, J.K., & Hamad, Q.A. (2022). Investigation of Compression and Hardness for UHMWPE Biocomposites as Internal Bone Plate Fixation. *Engineering and Technology Journal*, 40 (12), 1783-1794. DOI 10.30684/etj.2022.135083.1258.

19. Ha Thi N'ya Fyong (2021). *Epoxy compositions filled with natural wollastonite and synthetic calcium silicate based on rice husk ash*: dis. ... kand. tehn. nauk, Kazan. (in Russ.).

20. Mashkov, Yu.K., Kropotin, O.V., SHil'ko, S.V., & Pleskachevskij, Yu.M. (2013). *Self-organization and structural modification in metal-polymer tribosystems*. Omsk: Izd-vo OmGTU, 222 p. (in Russ.).

21. Smith, B. (2021) The infrared spectra of polymers II: polyethylene. *Spectroscopy*, 36 (9), 24-29. DOI 10.56530/spectroscopy.xp7081p7.

21. Krasnov, A.P., Naumkin, A.V., Yudin, A.S., Solov'eva, V.A., Afonicheva, O.V., Buyaev, D.I., & Tikhonov N.N. (2013). Nature of initial acts of friction of ultrahigh molecular weight polyethylene with steel surface. *Journal of Friction and Wear*, 34 (2), 154-164. (in Russ.).

Information about the authors

S. N. Danilova, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory «Polymer Composites for the North», Institute of Natural Sciences, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova.

E. S. Yamaleeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of «Medical Engineering», Institute of Light Industry Technology, Fashion and Design, Kazan National Research Technological University.

E. M. Gotlib, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «Synthetic Rubber Technologies», Institute of Polymers, Kazan National Research Technological University.

S. B. Yarusova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Laboratory of «Protective Coatings and Marine Corrosion», Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

P. S. Gordienko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of «Protective Coatings and Marine Corrosion», Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

A. A. Okhlopkova, Doctor of Technical Sciences, professor, Professor, Chief Researcher-Head of the educational, scientific and technological laboratory "Technologies of polymer nanocomposites named after S.A. Sleptsova", Institute of Natural Sciences, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova.

L. N. Ivanova is a 2nd-year student at the Chemical Department of the Institute of Natural Sciences, Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov.

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

Статья поступила в редакцию 21 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 21 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 632.122; 614.7; 622.882

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.027

EDN: SMIZTQ

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ПРИ ОЧИСТКЕ ПОЧВ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Ольга Юрьевна Сартакова¹, Ольга Михайловна Горелова²

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

¹ olga-sartakova@yandex.ru

² osgor777@mail.ru

Аннотация. Техногенная нагрузка на окружающую среду приводит к загрязнению земель и исключает их из хозяйственного оборота. С целью возврата почв в сельскохозяйственный оборот необходимо проводить различные рекультивационные работы. В современных условиях агрохимические методы мелиорации земель конкурируют с биологическими, последние отличаются меньшей энерго- и ресурсоемкостью и большей экологичностью. Тяжелые металлы тормозят развитие растений, накапливаются в них и передаются по пищевой цепи. Данные токсиканты поступают в почву, водные объекты в результате антропогенной деятельности: функционирования металлургических и энергетических комплексов, эксплуатации транспорта и сельхозтехники, использования агрохимикатов. В связи с аграрной спецификой Алтайского края, эта проблема актуальна для данного региона. Загрязнение тяжелыми металлами отражается на количестве и качестве получаемой сельхозпродукции. Эффективным методом очистки почв от указанных поллютантов является фиторемедиация. В работе на первом этапе были проведены исследования по поиску культур – ремедиантов и биотестеров, имеющих отклик на наличие тяжелых металлов в почве. Изучалось изменение биометрических и гравиметрических характеристик овса посевного в зависимости от содержания ионов кадмия в почве. На втором этапе изучалось влияние присутствия в почвенном субстрате ионов кадмия, свинца, цинка и никеля на такие культуры, как люцерна, гречиха, овес. Исследовалась фитоаккумуляция поллютантов в биомассе растений. По результатам проведенных исследований были сформулированы рекомендации по применению указанных культур как биотестеров или фиторемедиантов исходя из отклика растений и их выявленных кумулятивных способностей.

Ключевые слова: фиторемедиация, биотестирование, ионы тяжелых металлов, загрязненные сельхозугодья, тяжелые металлы, кадмий, свинец, цинк, никель, овес посевной, гречиха, люцерна, рекультивация.

Для цитирования: Горелова О.М., Сартакова О.Ю. Исследования по фиторемедиации при очистке почв от тяжелых металлов // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 176–181. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.027. EDN: <https://elibrary.ru/SMIZTQ>.

Original article

RESEARCH ON PHYTOREMEDIATION OF HEAVY METALS IN SOIL

Olga Y. Sartakova¹, Olga M. Gorelova²

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

¹ olga-sartakova@yandex.ru

² osgor777@mail.ru

Abstract. Human impacts on the environment lead to land pollution and exclude this territory from economic use. Various reclamation works must be carried out to return soils for agricultural use. In modern conditions, agrochemical land reclamation methods compete with biological ones, the latter being less energy- and resource-intensive and more environmentally friendly. Heavy metals inhibit plant growth, accumulate in them, and transfer through the food chain. These toxicants enter the soil and water bodies due to anthropogenic activity: the operation of metallurgical and energy complexes, transport and agricultural machinery, and agrochemicals. Due to the agricultural specifics of the Altai Krai, this problem is relevant for this region. Heavy metal pollution affects the quantity and quality of agricultural products. An effective method of cleaning soils from these pollutants is phytoremediation. In the first stage of the work, research was conducted to find remediant cultures and biotesters that respond to the presence of heavy metals in the soil. The change in biometric and gravimetric characteristics of oats was analyzed depending on the content of cadmium ions in the soil. The influence of cadmium, lead, zinc and nickel ions in the soil substrate on crops such as medicago, buckwheat and oats was investigated in the second stage. Phytoaccumulation of pollutants in plant biomass was considered. Based on the research results, recommendations were formulated for using the specified crops as biotesters or phytoremediants, considering the plants' reaction and their identified cumulative abilities.

Keywords: phytoremediation, biotesting, heavy metal ions, contaminated agricultural land, heavy metals, cadmium, lead, zinc, nickel, oats, buckwheat, medicago, soil reclamation.

For citation: Sartakova O. Y. & Gorelova O. M. (2025). Research on phytoremediation of heavy metals in soil. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 176-181. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.027. EDN: <https://elibrary.ru/SMIZTQ>.

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный слой является важнейшим ресурсом для аграрной отрасли. Сельскохозяйственные угодья производят около 90 процентов всей пищевой продукции и сырья, пригодного для использования в других отраслях хозяйства. Качество почв определяет урожайность сельхозкультур и безопасность продукции.

В процессе поглощения из почвы питательных элементов, через корневую систему в растворе могут поступить токсичные вещества, которые по пищевой цепочке передадутся человеку.

Для тяжелых металлов почвы представляют собой хорошую депонирующую среду. Это позволяет соединениям металлов прочно сорбироваться в почве и вступать во взаимодействия с почвенным гумусом. В результате такого взаимодействия могут образовываться труднорасторимые соединения, что является ключевым фактором накопления тяжелых металлов в почве.

При совокупности некоторых условий, в почве создаются благоприятные условия для миграции и переноса разного рода веществ как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении почвенного профиля.

Загрязнение атмосфере влечет за собой загрязнение всех компонентов окружающей среды, поэтому при попадании ионов тяжелых металлов в воздух, они будут обнаруживаться и в водоемах, и в почве.

Выбросы могут быть произведены как автомобильным транспортом, так и тепловыми электростанциями, если они находятся рядом с местом загрязнения, другие промышленные предприятия, химические средства защиты сельскохозяйственных культур от болезней и вредителей. Минеральные и органические удобрения вносят свой вклад в загрязнение тяжелыми металлами, как и орошение водой, обогащенной ионами тяжелых металлов [1].

На данный момент существует обострение экологической ситуации в нескольких регионах в России, в том числе и в Алтайском крае, по причине ненормированного внесения удобрений, которые в своем составе содержат тяжелые металлы.

Уровень накопления металлов в почве определяется их концентрацией [2]:

- в минеральных удобрениях;
- почвенных мелиорантах;
- водах, в том числе сточных, применяемых для орошения угодий.

При совокупности определенных условий, ионы тяжелых металлов, которые находятся в минеральных удобрениях, могут обладать высокой подвижностью в почвах, что позволяет им быстро проникать в клетки растений и по пищевым цепям поступать в организм животных и человека.

Наибольшую угрозу создают элементы с очень высоким (Cd, Hg, Cu, Cr, Sn) и высоким (Mo, Mn, Ni, Fe, Se) транслокационным потенциалом загрязнения. Переход тяжелых металлов, содержащихся в агрохимикалах, в почвенные растворы определяет вероятность присутствия их в субстрате. Металлы, находящиеся в составе малорастворимых соединений могут находиться в большей мере в неподвижной форме, в хорошо растворимых – в подвижной форме.

В технологии фиторемедиации предлагается использование двух типов растений [3]:

1) аккумуляторы или фиторемедианты, которые аккумулируют тяжелые металлы в надземных органах как при низком, так и высоком содержании их в почве;

2) биотестеры, которые сигнализируют о превышении ПДК тяжелых металлов в почве ввиду своей высокой чувствительности к данному явлению.

Таблица 1 – Содержание накопленных металлов в почве в зависимости от агротехнического источника загрязнения почв микроэлементами (мг/кг сухой массы)

Ион	Сточными водами	Фосфорные удобрения	Известняки	Азотные удобрения
Ni ²⁺	16-5300	7 - 38	10-20	7-34
Pb ²⁺	50 – 3000	7 - 225	20 - 1250	2 – 27
Zn ²⁺	700 – 49000	50-1450	10-450	1-42
Cd ²⁺	2 – 1500	0,1 – 170	0,04 – 0,1	0,05 – 8,5

Среди аккумуляторов можно выделить также растения гипер-аккумуляторы, которые способны накапливать тяжелые металлы в очень большом количестве без каких-либо отрицательных последствий для организма.

Растения-аккумуляторы и их толерантность к какому-либо металлу является специфичной. То есть, одна культура может поглощать один металл и подавляться на другом. Например, овес проявляет способность к аккумуляции цинка, однако свинец он поглощает значительно хуже [4].

У растений могут формироваться отдельные популяции, которые при этом проявляют устойчивость к двум и более металлам (множественную).

На содержание металла в корнях и побегах оказывает влияние его количество в почве, а также вид растения, фаза развития, сезон года [5].

Целью настоящих исследований являлось выявление возможности фиторемедиации ионов никеля, свинца, цинка, кадмия такими растениями, как люцерна, овес, гречиха.

При проведении эксперимента по фиторемедиации готовились образцы суглинистой почвы. Это связано с преобладанием на пахотных землях Алтайского края почв такого типа.

Изучалось угнетающее влияние тяжелых металлов кадмия, никеля, цинка и свинца в концентрациях, типичных представителей поллютантов земель Алтайского края.

Наличие кадмия в почве объясняется применением суперфосфата, который вносится перед посевом и как подкормка для практически всех сельхозкультур [6].

Свинец поступает в окружающую среду, как правило, в составе отходов производства и потребления (аккумуляторный лом, отработанные батарейки и др.).

Наличие никеля и цинка в почве можно объяснить попаданием в нее недостаточно очищенных производственных стоков, шламов, никелированного и оцинкованного металлома.

Ключевым фактором в выборе культур для исследования было то, что овес, гречиха и люцерна широко распространены на территории Алтайского края.

Оптимальное сочетание климатических факторов, связанных с поступлением солнечной радиации, теплообеспеченности, наличием влаги от осадков обеспечивает произрастание данных культур на территории края.

Кроме того, по данным исследований А. Ф. Титова было установлено, что растения, относящиеся к семейству злаковых, отличаются способностью к выделению веществ – фитосидерофоров. Данные вещества попадают в слой почвы, который непосредственно контактирует с корневой системой растения [3].

Фитосидерофоры оказывают воздействие на процесс поглощения тяжелых металлов, тем самым ускоряя его. Этот факт также повлиял на выбор овса как гречихи в качестве фиторемедиантов.

Также многочисленные исследования позволили рассматривать семейства бобовых в качестве фиторемедианта [7].

МЕТОДЫ

Для создания в почве потенциально-угнетающих факторов, к чистым субстратам добавлялись следующие соли тяжелых металлов: сульфаты цинка и никеля, ацетат меди и нитрат кадмия.

В таблице 2 представлены предельно допустимые концентрации для данных металлов в почве согласно СанПиНу 1.2.3685-21 [8].

Таблица 2 – Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в почве, мг/кг

Table 2 – Maximum permissible concentrations of heavy metals in soil, mg/kg

Элемент	Pb	Zn	Cd	Ni
Значение	6,0	23,0	0,5	4,0

Почвенный субстрат брался массой 200 г. Тяжелые металлы вносились в таком количестве, чтобы в почве была концентрация 1 ПДК, 1,5 ПДК и 2 ПДК соответственно.

Семена выбранных культур предварительно прорачивались на бумажных фильтрах в воздухопроницаемых боксах при благоприятном температурном режиме от 25 °C до 28°C, и необходимой степени увлажнения. Срок выдерживания семян до появления проростков составил трое суток.

Далее проводилась высадка проросших семян в почву исследуемых образцов и наблюдение за ними в течение 20 дней.

На протяжении роста растений производился визуальный контроль всходов, оценивались и корректировались следующие показатели: температурный, влажностный режимы, а также степень освещенности.

Затем ростки аккуратно изымались из почвенного субстрата, промывались, подсушивались при комнатной температуре до постоянного веса.

Для анализа морфологических особенностей растений в качестве методов анализа применяли гравиметрию и биометрию.

При гравиметрии производилось взвешивание всего растения на аналитических весах, биомасса оценивалась в граммах с точностью до тысячных.

При биометрии исследуемые растения предварительно разделялись на наземную и подземную части, после чего анализировались – оценивался размер каждой части растения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гречиха более выраженно отреагировала на присутствие тяжелых металлов в почве. Она была подвер-

жена сильному угнетению на почве с тяжелыми металлами, поэтому не может рассматриваться в качестве культуры для фиторемедиации. Было решено отнести гречиху к тестовым культурам, которые чувствительны к наличию металлов в почве и могут сигнализировать о повышении предельно допустимых концентраций.

В качестве потенциальных фиторемедиаторов были рассмотрены две культуры: овес и люцерна.

Результаты биометрического анализа побега и корневой системы овса представлены на рисунках 1, 2.

Присутствие цинка и свинца оказали подавляющее воздействие на длину побега, а кадмий и никель простилировали рост побега.

Влияние на корневую систему присутствия тяжелых металлов было несколько иным: подавляющим эффектом на корень обладали свинец и никель, в то время как цинк и кадмий усилили рост корневой части растения.

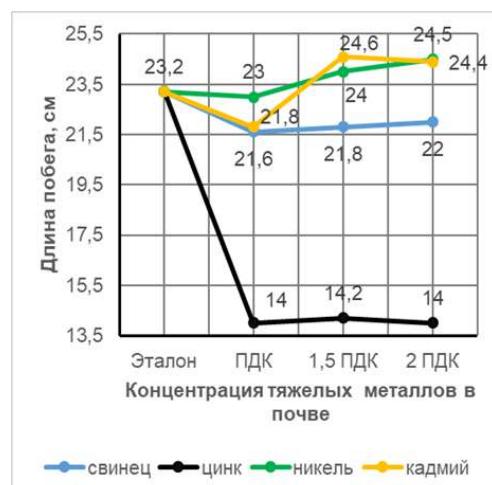


Рисунок 1 – Влияние тяжелых металлов на биометрические показатели побега овса

Figure 1 – The effect of heavy metals on biometric indicators of oat shoot

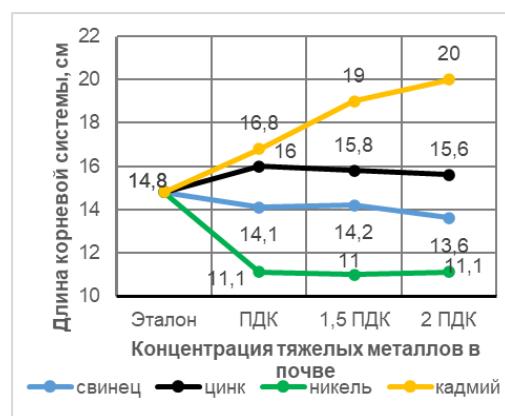


Рисунок 2 – Влияние тяжелых металлов на биометрические показатели корневой системы овса

Figure 2 – The influence of heavy metals on the biometric parameters of the oat root system

Гравиметрический анализ (рисунок 3) продемонстрировал увеличение массы растений по сравнению с контролем только на субстратах с кадмием.

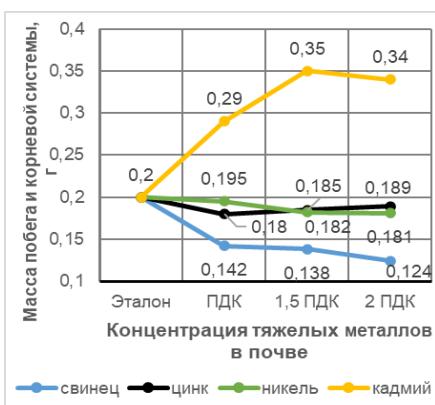


Рисунок 3 – Влияние тяжелых металлов на гравиметрические показатели овса

Figure 3 – Influence of heavy metals on gravimetric parameters of oats

В дальнейшем аналогичные исследования проводили для люцерны (рисунки 4-6).

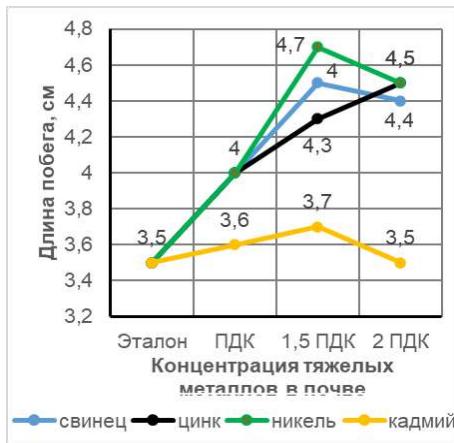


Рисунок 4 – Влияние тяжелых металлов на биометрические показатели надземной части люцерны

Figure 4 – The influence of heavy metals on the biometric parameters of the aboveground alfalfa

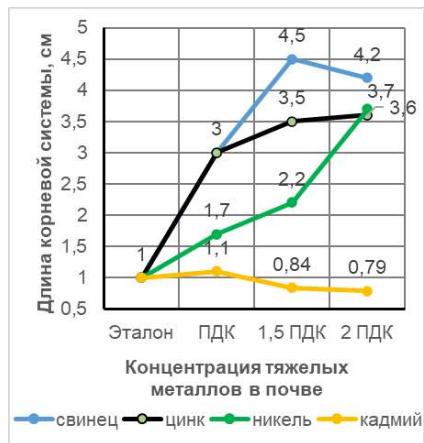


Рисунок 5 – Влияние тяжелых металлов на биометрические показатели корневой системы люцерны

Figure 5 – The effect of heavy metals on the biometric parameters of the alfalfa root system

Все исследуемые образцы почв позволили получить растения с большей длиной побега чем контрольный, что говорит о стимулировании, при этом наибольший рост наблюдался на субстрате с никелем. Анализ корневой системы люцерны показал, что подавление развития наблюдалось лишь на почве с кадмием, а максимальное стимулирование проявил свинец.

Гравиметрические исследования растений люцерны (рисунок 6) свидетельствуют о снижении массы растений в присутствии цинка в почвенных образцах. Наибольшая масса растений была достигнута на субстратах с кадмием.

Потенциальные фиторемедианты анализировались с помощью атомно-абсорбционного спектрометра МГА-1000 по известной методике [9, 10]. Оценивалась степень поглощения тяжелых металлов биомассой растений: овса, люцерны, как выращенных на субстратах с поллютантами, так и на незагрязненной почве (фон). Анализировалась биомасса всего растения, включающая надземную, подземную часть.

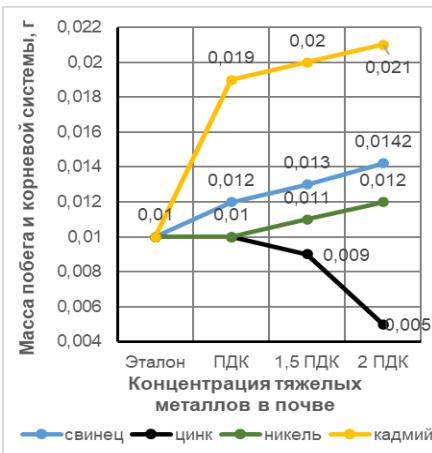


Рисунок 6 – Влияние тяжелых металлов на гравиметрические показатели люцерны

Figure 6 – Influence of heavy metals on alfalfa gravimetric parameters

Определение содержания металлов в биомассе растений включало два этапа:

1) подготовка образцов проб методом мокрой минерализации;

2) анализ проб на атомно-абсорбционном спектрометре.

Метод мокрой минерализации предполагал подготовку навески растений, массой 0,5 – 1 г. Далее навеску помещали в колбу и проводили разрушение органических веществ концентрированной азотной кислотой в объеме 10 см³. Полученный раствор выдерживался 15 минут и затем упаривался до 3 – 5 см³. После чего в раствор добавлялась 30%-ная перекись водорода, порциями по 1 см³. Полученный раствор вновь упаривался до 3 – 5 см³. Минерализованную пробу переносили в колбу объемом 50 мл и доводили до нужного объема бидистиллированной водой.

Метод атомно-абсорбционной спектрометрии основан на резонансном поглощении или абсорбции излучения от источника свободными атомами определяемых элементов, которые образуются в процессе электротермической атомизации в графитовой кювете спектрометра.

Полученные результаты анализа проб представлены в таблицах 3 и 4.

Как видно из таблицы 3, во всех случаях наблюдается аккумуляция тяжелых металлов по сравнению с контрольными образцами. В случае с цинком увеличение концентрации в почве в наибольшей мере ведет к увеличению концентрации металла в биомассе.

В случае с никелем и свинцом прослеживается подавляющий эффект действия тяжелого металла на овес, поэтому при меньшей концентрации металла в почве аккумулирующий эффект был выше.

Таблица 3 – Концентрация тяжелых металлов в биомассе овса

Table 3 – Concentration of heavy metals in oat biomass

Металл	Фоновая концентрация (мг/кг)	Концентрация металла в биомассе растения (мг/кг)		
		ПДК	1,5 ПДК	2 ПДК
Zn	1,52	5,25	6,28	10,90
Ni	0,80	3,25	2,85	2,54
Pb	0,25	4,00	3,99	3,09
Cd		менее 0,05		

Фоновое содержание кадмия и содержание данного элемента в биомассе растений на загрязненных почвах вышло за минимальный предел измерения атомно-абсорбционного спектрометра. Таким образом, можно сделать вывод о практическом отсутствии транслокации кадмия в ткани растения.

Таблица 4 – Концентрация тяжелых металлов в биомассе люцерны

Table 4 – Concentration of heavy metals in alfalfa biomass

Металл	Фоновая концентрация (мг/кг)	Концентрация металла в биомассе растения (мг/кг)		
		ПДК	1,5 ПДК	2 ПДК
Zn	1,40	14,7	12,2	10,1
Ni	0,23	3,0	4,3	4,5
Pb	0,30	4,6	5,7	6,0
Cd		менее 0,05		

В случае исследования люцерны, также наблюдается аккумуляция тяжелых металлов в биомассе растения по сравнению с контрольными образцами. На почвенных субстратах с никелем и свинцом происходит увеличение концентрации металлов в биомассе люцерны по мере возрастания концентрации металлов в почве. Однако, на почвенных субстратах с цинком наблюдалось угнетение гравиметрических показателей люцерны по мере увеличения концентрации поллютанта в почве, соответственно сокращался и аккумулирующий эффект.

Концентрацию кадмия в биомассе люцерны ниже минимального предела измерения, соответственно транслокация кадмия также отсутствует.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставляя результаты эксперимента по аккумуляции с данными гравиметрических показателей, отмечаем следующее:

1) в большинстве случаев наблюдалась взаимосвязь концентрации тяжелых металлов в биомассе растения и гравиметрических показателей овса и люцерны;

2) на всех почвенных субстратах, при отсутствии ингибирующего эффекта, наблюдалась корреляция между концентрацией поглощенного тяжелого металла биомассой и массой растения – концентрация увеличивалась вместе с массой;

3) на всех почвенных субстратах, при наличии ингибирующего эффекта, наблюдается уменьшение массы растений и концентрации тяжелых металлов в биомассе;

4) эффект стимулирования роста растений в случае присутствия кадмия в почве не связан с его аккумуляцией в биомассе овса, а может быть объяснен как биогенным эффектом нитрат-иона, так и токсическим действием кадмия на патогенную микрофлору.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленный в работе эффект угнетения гречихи не позволяет рекомендовать данную культуру для рекультивации почв, загрязненных тяжелыми металлами – цинком, свинцом, никелем, кадмием. Высокая чувствительность гречихи к данным поллютантам относит ее к биотестовым культурам.

Овес и люцерна способны эффективно аккумулировать вышеуказанные тяжелые металлы из почвы, что позволяет рекомендовать использования их для рекультивации нарушенных земель методом фиторемедиации.

Соли кадмия можно рассматривать как составную часть средств защиты растений от патогенной микрофлоры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селюкова С.В. Тяжелые металлы в органических удобрениях // Агрохимический вестник, 2016. №5, С. 47-51.
2. Лукин С.В., Селюкова С.В. Агроэкологическая оценка влияния органических удобрений на микроэлементный состав почв // Достижения науки и техники АПК, 2016. №12, С. 61-67.
3. Елизарьева Е. Н., Янбаев Ю. А., Кулагин А. Ю. Особенности выбора фиторемедиационных технологий очистки почв и сточных вод от ионов тяжелых металлов // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле», 2016. №3, С. 7 – 18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-vybora-fitoremediatsionnyh-tehnologiy-ochistki-pochv-i-stochnyh-vod-ot-ionov-tyazhelyh-metallov> (дата доступа 29.01.2025).
4. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review / S. S. Dhaliwal [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. № 2. P. 1319-1333. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1> . URL : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31808078/> (дата доступа 29.01.2025)
5. Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 194. URL: <https://natural-sciences.ru/> (дата доступа 29.01.2025)
6. Бауэр В. В., Горелова О. М., Сартакова О. Ю. Фиторемедиация как перспективный метод очистки почв от тяжелых металлов // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 160 - 165. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.021. EDN: <https://elibrary.ru/GXGPPD>. (дата доступа 29.01.2025).
7. Кулик Е.Н., Радомская В.И. Особенности транслокации тяжелых металлов в бобовые культуры при антропогенном воздействии // Вестник КрасГАУ. 2011. № 8. С.83-88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-translokatsii-tyazhelyh-metallov-v-bobovye-kultury-pri-antropogenom-vozdeystvii/viewer> (дата доступа 29.01.2025).
8. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среди обитания» (с изменениями на 30 декабря 2022 года) [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://www.sanpин.рф/> (дата доступа 29.01.2025)

<https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата доступа 29.01.2025).

9. ГОСТ Р 55447-2013. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение содержания кадмия, свинца, мышьяка, ртути, олова методом атомно-абсорбционной спектроскопии. М.: Стандартинформ.2014.18 с.

10. Измерение массовой доли элементов (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, V, Zn) в пробах почв, грунтов, донных отложений и осадков сточных вод. Методика М 03-07-2014 ПНД Ф 16.1:2.2:2.2:2.3.63-09 (изд. 2014) ПУ 62-2017 СТ РК 2.377-2015.

Информация об авторах

О. Ю. Сартакова – кандидат технических наук, доцент Международной кафедры ЮНЕСКО «Инженерная экология» института биотехнологий, пищевой и химической инженерии АлтГТУ.

О. М. Горелова – кандидат технических наук, доцент Международной кафедры ЮНЕСКО «Инженерная экология» института биотехнологий, пищевой и химической инженерии АлтГТУ.

REFERENCES

1. Selyukova, S.V. (2016). Heavy metals in organic fertilizers. Agrochemical Bulletin, (5), 47-51. (In Russ.).
2. Lukin, S.V. & Selyukova, S.V. (2016). Agroecological assessment of the effect of organic fertilizers on the microelement composition of soils. Achievements of science and technology of the agroindustrial complex, (12), 61-67. (In Russ.).
3. Elizarieva, E. N., Yanbaev, Yu.A. & Kulagin, A. Yu. (2016). Features of the choice of phytoremediation technologies for cleaning soils and wastewater from heavy metal ions // Bulletin of the Udmurt University. The series "Biology. Earth Sciences", (3), 7-18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-vybora-fitoremediatsionnyh-tehnologiy-ochistki-pochv-i-stochnyh-vod-ot-ionov-tyazhelyh-metallov>. (In Russ.).
4. Dhaliwal, S. S. [et al.] (2020). Remediation techniques for removing heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review // Environmental Science and Pollution Research. 27(2). 1319-1333. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1>. URL : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31808078/>.(In Russ.).
5. Titov, A. F., Kaznina, N. M. & Talanova, V. V. (2014). Heavy metals and plants. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, p. 194. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37019>. (In Russ.).
6. Bauer, V. V., Gorelova, O. M. & Sartakova, O. Yu. (2023). Phytoremediation as a promising method of soil purification from heavy metals. Polzunovskiy vestnik. (2). 160-165. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.021. EDN: <https://elibrary.ru/GXGPPD>. (In Russ.).
7. Kulik, E.N. & Radomskaya, V.I. (2011). Features of translocation of heavy metals into legumes under anthropogenic influence. Bulletin of KrasGAU. (8). 83-88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-translokatsii-tyazhelyh-metallov-v-bobovye-kultury-pri-antropogennom-vozdeystvii/viewer>. (In Russ.).
8. Sanitary rules and regulations (2022). SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) safety of environmental factors for humans" (as amended on December 30, 2022): Electronic Fund of Legal and Regulatory Documents. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>. (In Russ.).
9. HOST R 55447-2013. (2014). Feed, mixed feed, feed raw materials. Determination of cadmium, lead, arsenic, mercury, tin by atomic absorption spectroscopy. Moscow: Standardinform.2014.18 p. (In Russ.).
10. Measurement of the mass fraction of elements (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, V, Zn) in food, soils, and sediments and sewage sludge (2014). Methodology M 03-07-2014 MON F 16.1:2.2:2.2:2.3.63-09. PU 62-2017 ST RK 2.377-2015. (In Russ.).

Information about the authors

O. Yu. Sartakova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the International UNESCO Department "Engineering Ecology" of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering of Polzunov Altai State Technical University.

O. M. Gorelova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the International UNESCO Department "Engineering Ecology" of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering of 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 21 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 21 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 541.183:534.2

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.028

EDN: YWPLYA

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ

Владимир Николаевич Хмелёв ¹, Алексей Николаевич Сливин ²,
Роман Николаевич Голых ³, Александр Романович Барсуков ⁴

^{1, 2, 3, 4} Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийск, Россия

¹vnh@btu.secna.ru

²san@btu.secna.ru

³grn@btu.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

⁴barsukov.ar@btu.secna.ru

Аннотация. Для повышения эффективности технологических процессов в жидких средах при избыточном давлении предложен и разработан специализированный ультразвуковой (УЗ) технологический аппарат, способный реализовать воздействия на среды под давлением УЗ колебаниями с интенсивностью в пределах от 100 Вт/см² до 600 Вт/см². Для достижения такой интенсивности воздействия в составе колебательной системы предусмотрено применение пьезоэлектрического преобразователя, промежуточного усиливательного звена и трехсменных рабочих инструментов с различными по диаметру излучающими поверхностями, обеспечивающими формирование колебаний с амплитудой до 136 мкм. Для обеспечения задаваемой амплитуды колебаний при всех возможных изменениях состояния обрабатываемой среды электронный генератор снабжен системами фазовой автоподстройки частоты и стабилизации амплитуды. Результаты проведенных стендовых исследований позволили подтвердить возможность реализации ультразвуковых воздействий при потребляемой мощности не более 600 Вт при избыточном давлении до 2 мПа и эффективность применения практически реализованного оборудования для интенсификации различных технологических процессов в жидких средах, при совместном применении повышенных давлений и ультразвуковых колебаний.

Ключевые слова: ультразвук, кавитационные явления, воздействие на вещество, интенсификация диффузии, избыточное давление.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>.

Для цитирования: Хмелёв В. Н., Сливин А. Н., Голых Р. Н., Барсуков А. Р. Ультразвуковой аппарат для повышения эффективности технологических процессов при избыточном давлении // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 182–186. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.028. EDN: <https://elibrary.ru/YWPLYA>.

Original article

ULTRASONIC DEVICE TO INCREASE EFFICIENCY TECHNOLOGICAL PROCESSES UNDER EXCESSIVE PRESSURE

Vladimir N. Khmelev ¹, Alexey N. Slivin ², Roman N. Golykh ³,
Aleksandr R. Barsukov ⁴

^{1, 2, 3, 4} Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

¹vnh@btu.secna.ru

²san@btu.secna.ru

³grn@btu.secna.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7708-0665>

⁴barsukov.ar@btu.secna.ru

Abstract. To increase the efficiency of technological processes in liquid media at excessive pressure, a specialized ultrasonic (ultrasonic) technological device has been proposed and developed that is capable of influencing media under pressure with fluctuations in intensity ranging from 100 W/cm² to 600 W/cm². To achieve such an intensity of

© Хмелёв В. Н., Сливин А. Н., Голых Р. Н., Барсуков А. Р., 2025

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ

impact, the oscillatory system includes the use of a piezoelectric transducer, an intermediate amplifying link and three interchangeable working tools with radiating surfaces of different diameters, providing the formation of vibrations with an amplitude of up to 136 microns. To ensure a preset oscillation amplitude for all possible changes in the state of the treated medium, the electronic generator is equipped with phase-locked frequency and amplitude stabilization systems. The results of the conducted bench studies confirm the possibility of realizing ultrasonic effects with a power consumption of no more than 600 watts at an excess pressure of up to 2 MPa and the effectiveness of using practically implemented equipment to intensify various technological processes in liquid media, with the combined use of increased pressures and ultrasonic vibrations.

Keywords: ultrasound, cavitation phenomena, effect on matter, diffusion intensification, excessive pressure.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>.

For citation: Khmelev, V.N., Slivin, A.N. Golykh, R.N. & Barsukov, A.R. (2025). Ultrasonic device to increase efficiency technological processes under excessive pressure. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 182-186. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.028. EDN: <https://elibrary.ru/YWPLYA>.

ВВЕДЕНИЕ

Создание избыточных (в сравнении с атмосферным) давлений в рабочих камерах при реализации различных технологических процессов позволяет не только создавать принципиально новые материалы, но и изменять структуру, свойства известных материалов для повышения их качества [1], а также реализовывать замкнутые безотходные и энергосберегающие производства.

Так, перевод сенокислотного производства на технологическую схему, работающую при давлении 1,5 — 2 МПа, обеспечивает утилизацию вторичных энергоресурсов и перевод всего производства на энергетическое самообеспечение. Применение дополнительного гидростатического давления сокращает продолжительность пропитки с нескольких суток до 10-30 с и существенно ускоряет растворение газов [1,2]. Повышение давления оказывает влияние на протекание газофазных химико технологических реакций [3]. При переработке полимерных материалов использование избыточного давления обеспечивает бездефектное заполнение расплавом формы, ускоряет процесс кристаллизации, сдвигает температуру кристаллизации в область повышенных температур, а изменение величины избыточного давления позволяет регулировать усадку материала [4].

В производстве отдельных видов химической продукции (стирола, амиака, некоторых сверхтвердых материалов) высокое давление обеспечивает существенное ускорение технологического процесса [5].

Однако, в большинстве случаев, создание избыточного давления требует увеличения затрат на производство. Это не всегда экономически целесообразно из-за неоправданно больших эксплуатационных и энергетических затрат, необходимости установки толстостенного оборудования повышенной прочности. Поэтому, в технологической практике, вопрос о целесообразности использования избыточного давления решается в каждом конкретном случае в зависимости от соотношения степени повышения эффективности процесса от затрат на создание избыточного давления, обеспечивающего эту эффективность.

Таким образом, ключевым моментом практической реализации технологий при избыточном давлении является, либо необходимость дальнейшего повышения эффективности процесса при достигаемых давлениях, или поиск путей обеспечения достигнутой эффективности при меньших избыточных давлениях.

Наиболее эффективным путем совершенствования известных и разработки новых технологий является применение избыточных давлений при одновременном воздействии ультразвуковыми колебаниями.

POLZUNOVSKIY VESTNIK № 2 2025

ями высокой интенсивности [6]. Так, ускорение гетерогенных процессов в системах жидкость-жидкость и жидкость-твердое тело, в том числе за счет ускорения процессов на границе раздела фаз, осуществляется под воздействием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, с применением ультразвуковых технологических аппаратов [7].

В большинстве случаев, при ускорении технологических процессов под давлением более 0,5-0,7 МПа, заметные эффекты ультразвукового кавитационного воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды начинаются при амплитуде УЗ колебаний не менее 50 мкм [8]. Таким образом, для создания кавитации в жидкой среде при избыточном давлении необходимо создание колебаний с такой амплитудой для обеспечения интенсивности (плотности энергии) ультразвукового воздействия не менее 100 Вт/см². Дальнейшее увеличение интенсивности ультразвукового воздействия очень благоприятно влияет на интенсификацию всех реализуемых технологических процессов.

Однако, до настоящего времени, такие технологии практически не реализуется из-за отсутствия специализированного ультразвукового оборудования [9], способного реализовать такие воздействия в средах при избыточном давлении.

МЕТОДЫ

В связи с этим, возникает необходимость разработки и практической реализации ультразвукового аппарата, способного обеспечить создание в обрабатываемых средах необходимых амплитуд колебаний для реализации новых технологий, основанных на совместном применении повышенных давлений и ультразвуковых колебаний. Достигнуто это может быть только за счет создания аппаратов с пьезоэлектрической колебательной системой, имеющей рабочие инструменты с различными по размерам излучающими поверхностями [10].

Это обуславливает необходимость создания пьезоэлектрической колебательной системы заданной мощности и разработки рабочих инструментов со специальной формой образующей и диаметром излучающей торцевой поверхности, способных обеспечить максимальную эффективность УЗ воздействия (интенсивность ультразвуковых колебаний) при повышенных значениях давлений в проточном объеме.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для комплектации аппарата разработана ультразвуковая колебательная система, выполненная по трехполуволновой конструктивной схеме – пьезопреобразователь, промежуточный полуволновой усилительный

концентратор (бустерное звено) и сменные рабочие инструменты на резьбовом соединении с бустером.

Ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь выполнен по полуволновой конструктивной схеме (схеме Ланжевена) и имеет в своем составе 4 пьезоэлектрических элемента кольцевого типа, стальную отражательную и алюминиевую рабочую накладки для увеличения амплитуды колебаний пьезоэлементов (максимальное достигаемое значение не менее 10 мкм). Дальнейшее увеличение амплитуды УЗ колебаний обеспечивается применением бустерного усилительного звена с коэффициентом усиления не менее 3, что позволяет увеличить амплитуду формируемых колебаний до 30 мкм. Входящее в состав колебательной системы промежуточное бустерное звено, выполненное по полуволновой схеме, позволяет разместить на его поверхности, в месте минимума механических ультразвуковых колебаний, фланец для крепления колебательной системы в технологическом объеме. Такой фланец практически не влияет на формирование колебаний и позволяет обеспечить герметичность и надежность крепления при эксплуатации колебательной системы при высоких избыточных давлениях.

Для обеспечения необходимой амплитуды и интенсивности ультразвуковых колебаний при избыточном давлении от 0,1 до 2 мПа были спроектированы инструменты со специальной формой образующей конического типа (с излучающей поверхностью, диаметром 4 и 10 мм и коэффициентами усиления 5 и 3, соответственно), и с образующей ступенчатого типа в зоне минимальной амплитуды колебаний (с рабочей поверхностью, диаметром 15 мм и коэффициентами усиления 2,5) (Рисунок 1). Для питания созданной колебательной системы и реализации новых технологий был спроектирован и практически реализован ультразвуковой технологический аппарат, представленный на рисунке 2.

Электронный генератор созданного ультразвукового технологического аппарата оснащен системой фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) для работы на резонансной частоте пьезоэлектрической колебательной системы при любых изменениях условий её эксплуатации (изменения давлений, температур, плотности и вязкости среды и др.).

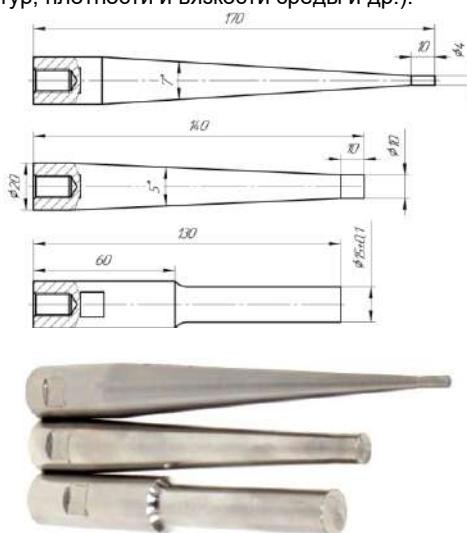


Рисунок 1 – Рабочие инструменты для работы при избыточном давлении

Figure 1 – Working tools for overpressure operation



Рисунок 2 – Ультразвуковой технологический аппарат с комплектом сменных рабочих инструментов специальных конфигураций

Figure 2 – Ultrasonic technological device with a set of interchangeable working tools of special configurations

Генератор снабжен также системой автоматического поддержания задаваемой (устанавливаемой на передней панели) амплитуды колебаний при изменении давления от 0,1 до 2 мПа (а также при изменении других условий эксплуатации).

Основные технические характеристики созданного аппарата:

- мощность, ВА, не более 1000;
- частота ультразвуковых колебаний, кГц $20 \pm 2,0$;
- питание от сети переменного тока напряжением, В 220 ± 22 ;
- время непрерывной работы, ч 8.

Габаритные размеры:

- электронный генератор, мм $430 \times 290 \times 115$;
- колебательная система, мм $\varnothing 110 \times 300$;
- диаметр окончаний рабочих инструментов, мм $15, 10, 4$.

Для определения функциональных возможностей созданного аппарата, а также для установления энергетических режимов его эксплуатации при различных режимах ультразвукового воздействия на жидкость при избыточном давлении, был разработан и изготовлен исследовательский стенд, Стенд для проведения экспериментальных исследований с ультразвуковым технологическим аппаратом и технологическим объемом, представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Стенд с ультразвуковым технологическим аппаратом и технологическим объемом

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ

Figure 3 – Stand with ultrasonic technological apparatus and technological volume

В состав стенда входит созданный ультразвуковой аппарат с потребляемой электрической мощностью не более мощностью 1000 ВА, специализированный технологический объем для реализации проточной ультразвуковой обработки жидких сред, и обеспечения необходимой в объеме интенсивности воздействия при избыточном давлении от 0,1 до 2 мПа.

Избыточное давление от 0,1 до 2 мПа обеспечивалось при помощи насоса высокого давления плунжерного типа Hawk NMT1520R. Для контроля величины давления жидкости применялся стандартный манометр из комплекта насоса. Для измерения электрических параметров качества потребляемой энергии использовался измеритель мощности Insteek GPM-8212. При проектировании и настройке ультразвукового аппарата, а также перед проведением стендовых испытаний были проведены измерения амплитуды колебаний рабочей поверхности инструментов с использованием стробоскопического метода в воздушной среде.

С учетом того, что разработанный ультразвуковой технологический аппарат оснащен системой автоматического поддержания задаваемой амплитуды колебаний при изменении давления от 0,1 до 2 мПа измеренные значения амплитуд будут оставаться неизменными при всех возможных изменениях условий эксплуатации аппарата.

Проведенные измерения и исследования позволили установить следующее.

1. Максимальная амплитуда ультразвуковых колебаний, формируемых в жидкой или в жидкодисперсной среде при использовании инструмента с окончанием диаметром 15 мм достигает 65 мкм (ин-

Таблица 1 – Значения потребляемой активной мощности ультразвукового технологического аппарата, в зависимости от давления в проточном объеме, для разных типов сменных инструментов

Table 1 – Values of the consumed active power of the ultrasonic technological apparatus, depending on the pressure in the flow volume, for different types of replaceable instruments

Тип сменного инструмента	Без давления	0,3 МПа, (проточное давление в воде)	0,5 МПа	1 МПа	1,5 МПа	2 МПа
сменный инструмент с излучающей поверхностью диаметром 4 мм	350 Вт	370 Вт	380 Вт	372 Вт	372 Вт	366 Вт
сменный инструмент с излучающей поверхностью диаметром 10 мм	360 Вт	410 Вт	435 Вт	470 Вт	470 Вт	479 Вт
сменный инструмент с излучающей поверхностью диаметром 15 мм	360 Вт	410 Вт	608 Вт	620 Вт	620 Вт	615 Вт

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ реализуемых на практике процессов позволил установить возможность повышения их эффективности за счет одновременного применения с избыточным давлением, воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды ультразвуковыми колебаниями.

2. Для обеспечения воздействия ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности в кавитационном режиме на среды при избыточном давлении предложен и разработан специализированный ультразвуковой технологический аппарат, включающий электронный генератор с системами стабилизации амплитуды и автоподстройки частоты и пьезоэлек-

тенисивность до 150 Вт/см²).

2. Максимальная амплитуда колебаний при использовании инструментов диаметрами 10 и 4 мм достигает 85 мкм (интенсивность до 250 Вт/см²) и 135 мкм (интенсивность до 500 Вт/см²), соответственно.

Создаваемый аппаратом амплитуд колебаний и интенсивностей воздействия достаточно для формирования кавитационного процесса в средах при избыточном давлении до 2 МПа.

Для подтверждения значений формируемой в объеме интенсивности были проведены измерения выделяемой аппаратом энергии ультразвуковых колебаний в воде, в объеме 1 л методом калориметрата-вттметра в соответствие с требованиями ГОСТ 27955-88 п.п. 7.2.

В таблице 1 представлены значения потребляемой активной мощности ультразвукового технологического аппарата на максимальной потребляемой мощности (100% установленной на передней панели аппарата), в зависимости от величины избыточного давления в технологическом объеме, а также в зависимости от разных типов установленных сменных инструментов.

Проведенные в соответствии с требованиями ГОСТ 27955-88 измерения КПД аппарата позволили установить, что с применением рабочего инструмента с рабочей поверхностью излучения диаметром 4 мм КПД аппарата составляет 40%, для аппарата с инструментом диаметром 10 мм КПД аппарата составляет 55%, для аппарата с инструментом диаметром 15 мм КПД аппарата составляет 60%.

На исследовательском стенде были проведены испытания созданного аппарата на режимах эксплуатации, наиболее часто применяемых на практике при установлении в объеме избыточных давлений от 0 до 2 МПа.

трическую колебательную систему.

3. Для обеспечения на среды под давлением ультразвукового воздействия с интенсивностью в пределах от 100 Вт/см² до 600 Вт/см² в составе колебательной системы предусмотрено применение пьезоэлектрического преобразователя, промежуточного усилительного звена и трех сменных рабочих инструментов с различными по диаметру излучающими поверхностями, обеспечивающими формирование колебаний с амплитудой до 136 мкм.

4. Проведенные стендовые экспериментальные исследования позволили определить функциональные возможности аппарата при реализации различных технологий при избыточном давлении до 2 МПа и подтвердить возможность реализации эффективных

ультразвуковых воздействий при потребляемой мощности не более 600 Вт.

5. Результаты проведенных разработок и экспериментальных исследований подтвердили эффективность применения практически реализованного оборудования для интенсификации различных технологических процессов в жидких средах, при совместном применении повышенных давлений и ультразвуковых колебаний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Классификация энергетических воздействий по влиянию на структуру и свойства армированных реактопластов / И. В. Черемухина // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. Т. 83, № 2(88). С. 197-201.

2. Исследование гидрофильтрных свойств бетонных смесей для гидротехнических сооружений / С. В. Николаев, Е. Р. Богданова // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. № 2(39). С. 99-106.

3. Общая химическая технология: учебное пособие / М. А. Ленский, [и др.]. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Барнаул: АлтГТУ, 2022. 185 с. Текст : электронный. Режим доступа: http://elib.altstu.ru/uploads/open_mat/2022/Lenskiy_ObHimTe_h_up.pdf.

4. Усиление эффекта наномодифицирования алюминиевых сплавов ультразвуком / Г. Г. Крушенко, [и др.] // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 622-623.

5. Разработка методики ультразвукового процессирования химически агрессивных сред при повышенных температурах и давлении и соответствующего ультразвукового технологического оборудования / А. А. Вьюгинова, [и др.] // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2020. № 3. С. 12-17.

6. Формирование зон с максимальной интенсивностью ультразвуковой кавитации в однокомпонентных и многокомпонентных средах / Б. И. Бахтин, [и др.] // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 3. С. 662-669.

7. Ультразвуковые аппараты для интенсификации процессов в системах с дисперсионной жидкой средой / В.Н. Хмелев, [и др.]. Современные задачи инженерных наук. Сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ 2017» Международного научно-технического Форума «Первые международные Косыгинские чтения (11-12 октября 2017 года). Т. 1 / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. С.268-272.

8. Выявление оптимальных условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред / В.Н. Хмелев, [и др.]. Ползуновский вестник. 2017. № 4. С.123-128.

9. Ультразвук. Аппараты и технологии / В.Н. Хмелев, [и др.]. Барнаул: АлтГТУ, 2015. 688 с.

10. Пути развития пьезоэлектрических преобразователей для увеличения мощности. Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы международной научной конференции / В.Н. Хмелев, [и др.]. Витебск, Беларусь: УО ВГТУ, 2021. С. 82-85.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 21 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

Информация об авторах

В. Н. Хмелёв – доктор технических наук, профессор кафедры «Методов и средства 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 средства 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 средства 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 средства измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Information about the authors

V. N. Khmelev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Methods and instruments of measurement and automation» of the 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.

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.



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 628.358-032.25:363

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.29

EDN: LGVFAO

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЕЛУХИ ПШЕНИЦЫ В КАЧЕСТВЕ ПРИРОДНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

Амина Шамильевна Хисамова¹, Светлана Владимировна Степанова²,
Анна Александровна Алексеева³

^{1, 2, 3} Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

¹ aminalatipova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-2755-6753>

² ssvkan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4831-313X>

³ annank90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6119-1934>

Аннотация. Добыча и переработка нефти сопровождаются значительными рисками для окружающей среды, включая разливы нефти, которые приводят к загрязнению водных объектов и почвы. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки экологически безопасных и экономически эффективных методов ликвидации нефтяных загрязнений. Целью работы являлось исследование эффективности использования шелухи пшеницы в качестве сорбционного материала для ликвидации разлитой нефти. Для улучшения сорбционных свойств природный полимер был модифицирован 1 %-ным раствором серной кислоты.

В ходе исследования изучены сорбционные характеристики нативных и модифицированных образцов шелухи пшеницы. Установлено, что обработка серной кислотой увеличивает удельную поверхность материала с $5,8 \pm 2,8$ до $8,0 \pm 1,5 \text{ м}^2/\text{г}$ и объем пор с $1,52 \pm 0,1$ до $2,76 \pm 0,1 \text{ см}^3/\text{г}$. Сорбционная емкость модифицированной шелухи пшеницы составила $6,35 \text{ г/г}$, что на 20 % выше, чем у нативных образцов ($5,23 \text{ г/г}$). При удалении нефтяной пленки с поверхности воды модифицированный биополимер показал эффективность $99,31 \%$, тогда как нативный — $96,96 \%$.

Эксперименты по фитотоксичности показали, что очищенная модифицированными образцами вода имеет индекс токсичности 0,1, что ниже, чем у загрязненной воды (0,2). Также исследована возможность применения биополимера для очистки почвы от нефтяных загрязнений. Установлено, что использование сорбента снижает испарение легких фракций нефти на 50 % и уменьшает негативное влияние на рост растений.

Полученные результаты демонстрируют, что применение шелухи пшеницы в качестве сорбента не только эффективно решает проблему нефтяных загрязнений, но и способствует утилизации сельскохозяйственных отходов, что соответствует принципам циркулярной экономики и устойчивого развития.

Ключевые слова: нефтеразливы, нефтепродукты, отходы сельскохозяйственной промышленности, биополимер, фитотоксичность.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования: Хисамова А. Ш., Степанова С. В., Алексеева А. А. Использование шелухи пшеницы в качестве природного сорбционного материала для ликвидации разливов нефти // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 187–192. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.029. EDN: <https://elibrary.ru/LGVFAO>.

Original article

USE OF WHEAT HUSK AS A NATURAL SORPTION MATERIAL FOR OIL SPILL RESPONSE

Amina Sh. Khisamova¹, Svetlana V. Stepanova², Anna A. Alekseeva³

^{1, 2, 3} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

¹ aminalatipova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-2755-6753>

² ssvkan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4831-313X>

³ annank90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6119-1934>

Abstract. Oil extraction and refining are accompanied by significant environmental risks, including oil spills that lead to pollution of water bodies and soil. The relevance of the research is determined by the need to develop environmentally safe and cost-effective methods of oil pollution elimination. The aim of the work was to study the effectiveness of wheat husk as a sorption material for the elimination of spilled oil. To improve the sorption properties, the natural polymer was modified with 1 % sulphuric acid solution.

Sorption characteristics of native and modified samples of wheat husk were studied. It was found that treatment with

© Хисамова А. Ш., Степанова С. В., Алексеева А. А., 2025

sulfuric acid increases the specific surface area of the material from 5.8 ± 2.8 to $8.0 \pm 1.5 \text{ m}^2/\text{g}$ and pore volume from 1.52 ± 0.1 to $2.76 \pm 0.1 \text{ cm}^3/\text{g}$. The sorption capacity of modified wheat husk was 6.35 g/g , which was 20 % higher than that of native samples (5.23 g/g). In removing oil film from the water surface, the modified SW showed an efficiency of 99.31 %, whereas the native showed an efficiency of 96.96 %.

Experiments on phytotoxicity showed that water treated with modified wheat husk had a toxicity index of 0.1, which is lower than that of polluted water (0.2). The possibility of wheat husk application for soil purification from oil pollution was also investigated. It was found that the use of sorbent reduces the evaporation of light fractions of oil by 50 % and reduces the negative impact on plant growth.

The obtained results demonstrate that the use of wheat husk as a sorbent not only effectively solves the problem of oil pollution, but also contributes to the utilization of agricultural waste, which corresponds to the principles of circular economy and sustainable development.

Keywords: oil spills, oil products, agricultural waste, wheat husks, phytotoxicity.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to his / her colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.

For citation: Khisamova, A.Sh., Stepanova, S.V., Alekseeva, A.A. (2025). Use of wheat husk as a natural sorption material for oil spill response. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 187-192. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.029. EDN: <https://elibrary.ru/LGVFAO>.

ВВЕДЕНИЕ

Добыча ископаемого топлива (уголь, нефть, металлы) сопровождается загрязнением окружающей среды. Нефтедобыча, транспортировка и переработка несут риски для водных источников, даже при соблюдении экологических норм. Загрязнение нефтью водных объектов, вызванное разливами (человеческий фактор до 50 %) [1], утечками или транспортировкой (неисправности оборудования до 40 %), наносит вред экосистемам, дикой природе и здоровью человека из-за содержания токсичных веществ, таких как углеводороды, тяжелые металлы и химикаты.

Попадая в водный объект нефть образует плёнку на поверхности воды, препятствующую процессу фотосинтеза растений, что приводит к деградации и гибели экосистем [2].

Для минимизации негативного воздействия нефти на окружающую среду необходимо применять оперативные и эффективные меры реагирования, такие как локализация нефтяного пятна с последующей очисткой воды и почв [3]. Основные методы очистки воды от нефтепродуктов включают в себя: механическую (сбор, фильтрация, сорбция), биологическую (микроорганизмы, растения), физико-химическую (флотация, коагуляция) и термическую (сжигание) обработку [4].

Один из наиболее распространенных и эффективных методов — это применение сорбентов, которые обладают способностью притягивать и адсорбировать нефтяные загрязнения, образуя агломераты, которые затем можно легко удалить. В качестве сорбентов для удаления нефти используются различные материалы и вещества от искусственных специализированных материалов до органических отходов, например, сельского хозяйства [5,6].

Сорбенты на основе отходов злаковых культур являются эффективным и экологически безопасным вариантом для удаления пленок нефти на водной поверхности [7]. Отходы злаковых культур, такие как солома, семена и оболочки, шрот и другие растительные материалы, в основе которых лежат природные полимеры, имеют высокую абсорбционную способность, что позволяет им эффективно взаимодействовать с нефтяными загрязнениями [8, 9].

Применение природных полимеров в качестве сорбентов для удаления пленок нефти позволяет решить геоэкологическую проблему — образования отходов, а именно, утилизации растительных отходов для экологизации сельскохозяйственной отрасли, а также очистки вод и почв [10, 11].

Целью данной работы является исследование применения природного полимера (шелухи пшеницы) в качестве сорбционного материала (СМ) для ликвидации разливов нефти как с водной поверхности, так и с почвы.

МЕТОДЫ

Исходный продукт — шелуха пшеницы (ШП), ежегодно в значительных объемах складируется на предприятиях по переработке зерна в качестве отхода и легкодоступна.

Изменение структуры биополимера при модификации исследовалось с помощью атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии.

Определение сорбционной емкости материала при различной концентрации нефти в воде.

Эксперимент по проведению сорбции нефти проводился в соответствии с [12].

Водопоглощение СМ показывает какая масса воды, поглощается нефтесорбентом при нормальных условиях. Эксперимент по определению водопоглощения проводился по методике, представленной в [13].

Суммарную сорбционную емкость СМ определяли в зависимости от объема нефти и времени воздействия СМ на загрязненный участок водной поверхности [12].

Содержание нефти, оставшейся в воде после сорбции, определилось методом экстракции проводилось в соответствии с ПНД Ф 1:2:4.168, ПНД Ф 14.1:2.116.

Модификация образцов проводилась следующим образом: отбранную пробу образца ШП, массой 1 г, помещали в колбу и добавляли 100 мл 1%-й раствор серной кислоты. Содержимое перемешивали, в течение 60 минут, на электрической мешалке со скоростью 3000 об/мин, после чего отфильтровывали и высушивали СМ до постоянной массы.

При определении фитотоксичности объектом исследования являлась загрязненная нефтью вода (17 г/л) и модельная вода, очищенная от нефти, ШП, модифицированной 1 % раствором серной кислоты. Предметом исследования являлась всхожесть растительных тест-объектов: кress-салат (*Lepidium sativum* L); редис (*Raphanus sativus* L).

На дно чашек Петри помещали бумажные фильтры, которые увлажняли водой, очищенной от нефти модифицированным СМ, и равномерно распределяли зерна тест-культур кress-салата (*Lepidium sativum* L) и редиса (*Raphanus sativus* L) в соответствие с требованиями технических условий определения всхожести семян в соответствии с ГОСТ 12038-84 (рис. 1).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЛУХИ ПШЕНИЦЫ В КАЧЕСТВЕ ПРИРОДНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

Индекс токсичности определяется по формуле:

$$J = \frac{b_{\text{контроль}} - b_{\text{опыт}}}{b_{\text{контроль}}} \quad (1)$$

где J – индекс токсичности, $b_{\text{контроль}}$ – всхожесть семян в контроле, $b_{\text{опыт}}$ – всхожесть семян в опытном варианте.

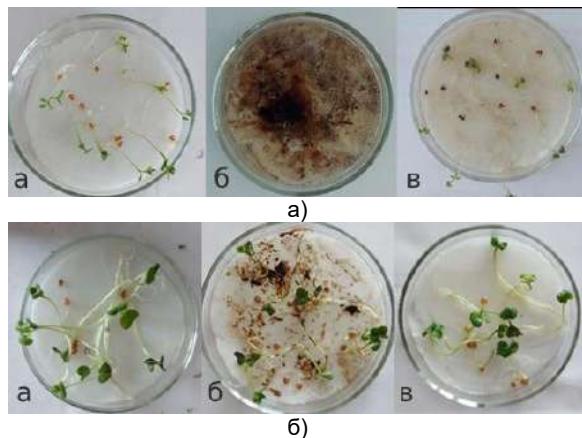


Рисунок 1 – Всхожесть растительных тест-объектов кress – салат (А) и редис (Б) а) дистиллированная вода (контроль); б) модельная вода; в) модельная вода, очищенная шелухой пшеницы

Figure 1 - Germination of plant test objects cress - lettuce (A) and radish (B) a) distilled water (control); b) model water; c) model water purified with wheat husk

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Использование нативных т.е. немодифицированных образцов ШП для удаления нефтяных пленок с поверхности воды может привести к вторичному загрязнению очищенных вод из-за наличия в ней примесей, которые вымываются при контакте с водой и увеличивают цветность и мутность (песок, пыль и др. взвешенные вещества). С целью недопущения повторного загрязнения воды, а также улучшения технологических характеристик сорбентов проводили модификацию нативных образцов ШП 1% раствором H_2SO_4 .

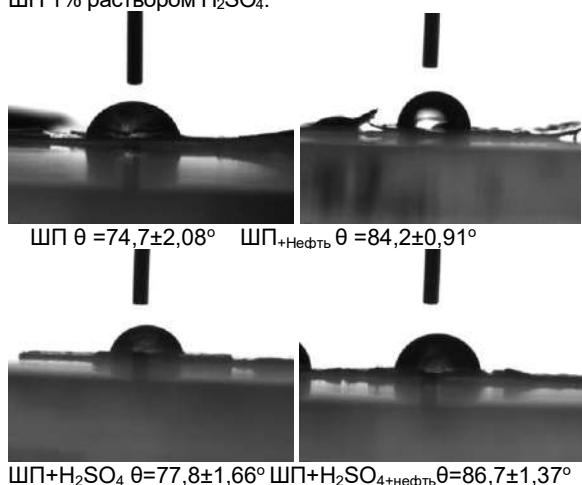


Рисунок 2 – Изображения краевого угла смачивания кислотомодифицированных образцов ШП

Figure 2 – Images of the contact angle of acid-modified wheat husk samples

При обработке растительных отходов слабыми кислотными растворами происходит расширение целлюлозы, в то же время происходит сокращение массы сырья до 20 % из-за высвобождения порового пространства от водорастворимых веществ. Следовательно, увеличивается внутренняя поверхность СМ.

У полученных модифицированных образцов ШП исследовалось влияние раствора 1% H_2SO_4 на структуру и свойства материала.

Поверхностное натяжение — это ключевой параметр, определяющий способность удерживать поглощаемое вещество на границе раздела, в данном случае на границе СМ: водой, является мерой силы взаимодействия. Краевой угол смачивания (θ) представляет собой угол, который образуется между поверхностью СМ и поверхностью воды при их контакте. Чем больше гидрофильность вещества, тем ниже краевого углом смачивания θ . Значение краевого угла смачивания на исходном и модифицированном СМ показаны на рис. 2).

Анализ рис.2 указывает на то, что обработка ШП слабым раствором H_2SO_4 улучшает сорбционные свойства материала по отношению к нефти. Это происходит за счет образования пленок нефти на поверхности материала, что повышает его адгезию к нефти. Уменьшение гидрофобности отрицательно сказывается на плавучести материала, она уменьшается, что может привести к оседанию агломератов на дно водоемов.

Обработка раствором серной кислоты, помимо прочего, влияет на поверхность биополимера. По микроскопическим фотографиям, представленным на рис. 3 и 4 можно наблюдать разволокнение образцов и целлюлозы входящей в ее состав. Высота фрагментов ШП после модификации увеличивается в 2-3 раза (с 50-100 нм у ШП до 200-300 нм у модифицированного ШП). Очевидно, что данные факты способствуют увеличению удельной поверхности.

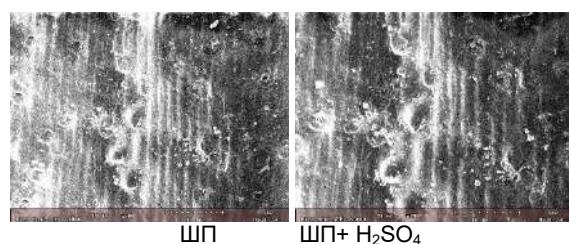


Рисунок 3 – Изображение АСМ поверхности образцов ШП (увеличение в 700 раз)

Figure 3 – Image of the surface of wheat husk samples with an atomic force microscope (700 times magnification)

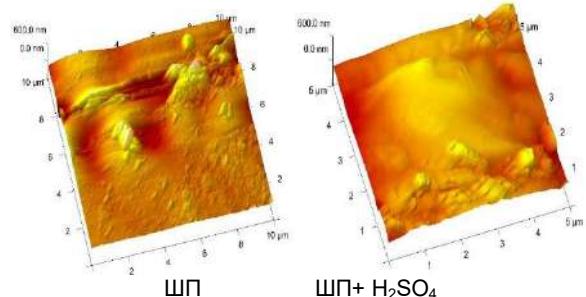


Рисунок 4 – Изображение СЭМ поверхности образцов ШП

Figure 4 – Scanning electron microscope image of the surface of wheat husk samples

Далее были проанализированы стандартные сорбционные характеристики нативных и модифицированных образцов ШП, которые показали увеличение суммарного объема пор с $1,52 \pm 0,1$ до $2,76 \pm 0,1 \text{ см}^3/\text{г}$ и удельной поверхности с $5,8 \pm 2,8$ до $8,0 \pm 1,5 \text{ м}^2/\text{г}$ для образцов, обработанных 1 %-ным раствором H_2SO_4 , следовательно, данная модификация приводит к разрушению связей в структуре целлюлозы. Очевидно, что обработка оказывает положительный эффект на сорбционные свойства материала и препятствует вторичному загрязнению нефти.

Сравнительный анализ полученных результатов сорбционной емкости в отношении девонской нефти в статических условиях для исследованных сорбентов на основе ШП показал, что сорбционная емкость ШП, модифицированной серной кислотой (6,35 г/г) на 20 % выше сорбционной емкости нативных образцов (5,23 г/г).

Любой сорбционный материала должен соответствовать основным критериям:

- количество поглощенной нефти на единицу веса сорбента т.е. нефтеемкость;
- способность сорбента не впитывать воду т.е. гидрофобность;
- удобство нанесения СМ на поверхность и его удаление т.е. технологичность;
- доступная стоимость [14].

Таким образом, эффективность использования нефтесорбирующих материалов определяется комплексом данных показателей и их оптимальным соотношением.

Образец ШП, модифицированный раствором серной кислоты, показал значение водопоглощения – 2,08 г/г, а нативный – 1,8 г/г. Увеличение водопоглощения модифицированного образца может быть связано с вымыванием загрязнений из пор СМ при обработке раствором [15].

Для имитации аварийного разлива нефти на поверхности воды использовалась нефть девонового происхождения. При обработке полученных результатов установили зависимости суммарной сорбционной емкости ШП от объема нефтяного пятна.

Суммарная сорбционная емкость также определена для каждого образца в зависимости от времени воздействия. Использовали девонскую нефть объемом 5 см³. Результаты представлены на рисунке 5

Проанализировав рисунок 5 определено, что при удалении нефтяной пленки с поверхности воды в зависимости от объема разлива нефти и времени воздействия наибольшую эффективность имеет сорбционный материал, обработанный слабым раствором серной кислоты.

С увеличением объема нефтяного пятна суммарная сорбционная емкость материалов возрастает. Сорбированная масса воды и нефти составляет: для ШП+ H_2SO_4 – 10,96 г/г, для ШП – 4,26 г/г. Максимальная сорбционная емкость достигается при проведении эксперимента в течение 7 суток.

После удаления пленок нефти с поверхности воды СМ из ШП методом экстракции определили остаточное содержание нефти в воде. Наибольший процент сорбции достигается при использовании модифицированного сорбционного материала, при объеме загрязняющего вещества 10 см³.

Полученные данные показали, что образцы ШП+ H_2SO_4 удаляют пленку нефти с поверхности воды лучше (99,31 %), чем не модифицированная (96,96 %).

Для определения токсического влияния загрязнен-

ненных и очищенных вод от пленок нефти СМ на основе ШП использовался метод фитотоксичности.

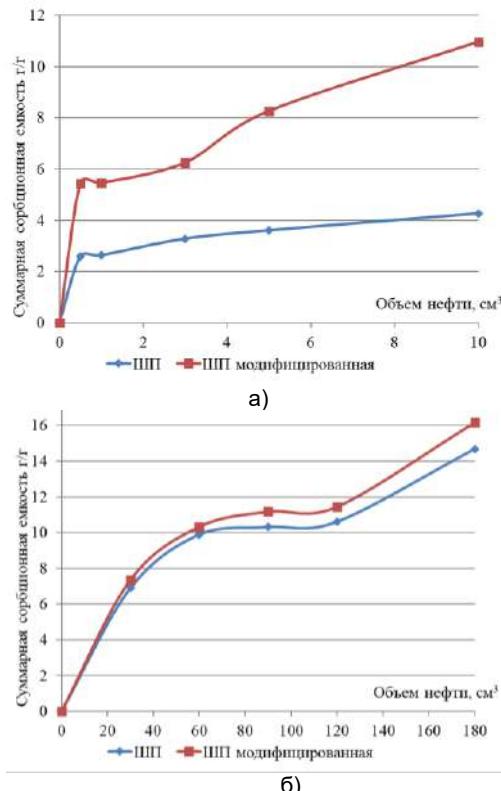


Рисунок 5 – Зависимость суммарной сорбционной емкости сорбционного материала от объема нефтяного пятна (А) и от времени контактирования (Б)

Figure 5 – Dependence of the total sorption capacity of the sorption material on the volume of the oil slick (A) and on the contact time (B)

Токсичность — ключевой показатель экологической безопасности и эффективности очистки. Для оценки токсичности вод используют биологические тест-объекты: растения и низшие организмы. Уровень токсичности определяется по реакциям жизнедеятельности: у организмов — размножение, подвижность, дыхание; у растений — всхожесть, скорость роста и морфология. Количественно токсичность выражается индексом токсичности. В результате получилось, что наибольший показатель индекса токсичности во всех экспериментах прослеживается при поливе тест-объектов загрязненной модельной водой 0,2. Применение модифицированной ШП в качестве СМ снизило индекс токсичности для семян редиса и кress-салата до 0,1 (табл. 1).

Также оценивалась возможность применения СМ на основе ШП для сбора разлитой нефти с поверхности почвы серье зно пострадать от токсичных компонентов, входящих в состав нефти, которые могут оказать стрессовое воздействие на культуры после нефтеразлива. Для уменьшения концентрации нефти в почве распространенным методом является использование СМ.

Первоначально определена максимальная способность данных материалов поглощать нефть на поверхности почвы (табл. 2).

С целью исследования влияния нефти на рост и развитие растений в почвенном слое, где был произведен разлив с последующей ликвидацией нефтяного пятна с использованием ШП была измерена фитотоксичность.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЛУХИ ПШЕНИЦЫ В КАЧЕСТВЕ ПРИРОДНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

Таблица 1 – Результаты всхожести семян, количество проросших семян

Table 1 – Seed germination results, number of germinated seeds

Растительный тест-объект	Дистиллированная вода (контроль)		Модельная вода		Очищенная модельная вода	
	через 7 дней после посадки	через 14 дней после посадки	через 7 дней после посадки	через 14 дней после посадки	через 7 дней после посадки	через 14 дней после посадки
Кресс-салат	10	10	8	4	9	9
Редис	10	10	8	8	9	9

Таблица 2 – Результаты всхожести семян, количество проросших семян

Table 2 – Seed germination results, number of germinated seeds

Вид СМ/ Объем нефти см ³	5	10	15	20	25	30
ШП+ H ₂ SO ₄	1,02	1,1	1,33	2,6	3,38	4,64
ШП	0,59	0,78	1,38	1,4	3,3	4,54

В качестве тест-объектов исследовались образцы высших растений: зерна пшеницы (*Triticum aestivum*), овса (*Avena sativa*), ячменя (*Hordeum vulgare*) и горчицы (*Brassica juncea*).

По экспериментальным и расчетным данным энергия прорастания семян культур составила 60 %, 32 %, 48 %, 88 % для пшеницы, овса, ячменя и горчицы соответственно.

Из результатов экспериментов можно сделать вывод, что нефтяное загрязнение негативно влияет на рост растений, приводя к подавлению их надземных частей. Мы наблюдали уменьшение высоты стебля у высших растений на 27 % без применения сорбционного материала и на 13 % после его использования для устранения разлива нефти на почве.

Помимо того, что нефть загрязняет почву и приводит к регрессу в росте растений, легкие фракции нефти испаряются в атмосферу, что также негативно оказывается на качестве окружающей среды.

Использование СМ на основе биополимеров может быть эффективным методом снижения испарения нефти после разлива на почве, т.к. по экспериментальным данным показано снижение испарения на 50 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведены эксперименты целесообразности применения отходов злаковых культур в виде шелухи пшеницы при ликвидации разливов нефти на поверхности воды и почв. Для улучшения сорбционных свойств, предложенный сорбционный материал модифицирован 1- % серной кислотой.

Обработка полимерного природного СМ серной кислотой показала более эффективные результаты по сравнению с нативными образцами ШП, это связано с тем, что в результате воздействия серной кислоты на целлюлозосодержащий материал из него удаляются физические, химические и механические примеси, освобождается поровое пространство и увеличивается селективность поверхности ШП по отношению к нефти.

В соответствии с современными экологическими требованиями в организациях, которые занимаются добычей и переработкой нефти должна быть регламентирована работа по составлению и применению плана действий при возникновении аварийной ситуации (в соответствии с ИТС № 28-2021). Такой план может быть разработан для определенной производственной площадки или для нефтедобывающего предприятия в целом и должен включать проведение практических тренировок по ликвидации и локализации аварийных разливов нефти. Согласно полученным данным, применение СМ на основе ШП позволяет не

только удалить пленку нефти с поверхности воды, снизить токсичность вод, но и может являться частью плана действий при возникновении аварийной ситуации, что в свою очередь обеспечивает реализацию наилучших доступных технологий по добыче нефти.

Таким образом, применение таких отходов сельскохозяйственной продукции как ШП в качестве сорбентов позволяет не только сократить количество отходов и снизить негативное воздействие на окружающую среду, но также создать возможности для вторичного использования и переработки сельскохозяйственных материалов. Этот подход способствует сотрудничеству циркулярной экономике и устойчивому использованию природных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Michel J., Fingas M. World Scientific Series in Current Energy Issues / Fossil Fuels. Chapter 7: Oil Spills: Causes, Consequences, Prevention, and Countermeasures. 2016. pp. 159-201. DOI: 10.1142/9789814699983_0007
2. Бурматова О. П. Регионы Сибири с напряженной экологической ситуацией: причины и решения //Развитие территорий. 2023. №.4 (34). С. 28-39. DOI: 10.32324/2412-8945-2023-4-28-39.
3. Cheremisinoff, N. P., Davletshin, A. Emergency Response Management of Offshore Oil Spills: Guidelines for Emergency Responders. Germany: Wiley. 2020 p. 261
4. Исмагилова Р. С. Обзор работ, посвященных методам и способам очистки сточных вод от нефтепродуктов //Modern Science. 2020. №. 12-5. С. 376-381.
5. Alekseeva, A.A. Stepanova, S.V. Effect of Plasma Surface Modification of Mixed Leaf Litter on the Mechanism of Oil Film Removal from Water Bodies. Russian Journal of General Chemistry, 2019, 89(13), pp 2763-2768 / DOI: 10.1134/S107036321913005X
6. Тунакова Ю. А., Валиев В. С., Габдрахманова Г. Н. Использование природного цеолита для очистки вод //Ползуновский вестник. 2024. № 1. С. 179–185. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.021
7. Stepanova, S & Alekseeva, A & Khafizova, L. Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 791. pp.73 – 83. DOI:10.1088/1757-899X/791/1/012076
8. Jonoobi, M.; Mekonnen, T.H. Adsorption of oil by 3-(triethoxysilyl) propyl isocyanate-modified cellulose nanocrystals. Processes. 2022, p. 2154. DOI: 10.3390/pr10102154.
9. Тюляев В. С., Васильева Ж. В. Исследование эффективности применения органических сорбентов нефти и нефтепродуктов при ликвидации аварийных разливов в морях арктического региона //Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2021. №. 2. С. 125–136.

10. Loh, J.W.; Goh, X.Y.; Phuc, T.T.N.; Quoc, B.T.; Ong, Z.Y.; Hai, M.D. Advanced aerogels from wool waste fibers for oil spill cleaning applications. *J. Polym. Environ.* 2021, pp. 681–694. DOI: 10.1007/s10924-021-02234-y.

11. Bazargan, A., Tan, J., Hui, C. W., & McKay, G. Utilization of rice husks for the production of oil sorbent materials. *Cellulose*, 21(3), 2014, pp. 1679–1688. DOI: 10.1007/s10570-014-0203-9.

12. Хисамова, А. Ш. Способ ликвидации аварийных разливов нефти на поверхности воды отходами сельского хозяйства / А. Ш. Хисамова, С. В. Степанова, А. А. Алексеева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2024. Т. 13, № 4(68). С. 217–223.

13. Stepanova, S. V. Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface / S. V. Stepanova, A. A. Alekseeva, L. Y. Khafizova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod, 31 октября – 01 2019 года. Vol. 791. – Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012076.

14. Trinh Trong, Nguyen & Loc, Nguyen & Huy, Ba & Thai, Van. Efficient oil removal from water using carbonized rambutan peel: Isotherm and kinetic studies. *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, 3, 2023, pp. 1-18. DOI: 10.36335/VNJHM.2023(17).1-18.

15. Золотов Ю.А., Цизин Г.И., Моросанова Е.И., Дмитриенко С.Г. Сорбционное концентрирование микрокомпонентов для целей химического анализа // Успехи химии. 2005. Т.74, № 1. С. 41-66.

Информация об авторах

А. Ш. Хисамова, аспирант кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

С. В. Степанова, д. т. н., доцент кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

А. А. Алексеева, к. т. н., доцент кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

REFERENCES

1. Michel J., Fingas M. World Scientific Series in Current Energy Issues / Fossil Fuels. Chapter 7: Oil Spills: Causes, Consequences, Prevention, and Countermeasures. 2016. pp. 159–201. DOI: 10.1142/9789814699983_00072.
2. Burmatova O. P. (2023). Siberian regions with a tense environmental situation: causes and solutions // *Development of territories*, (4-34), 28-39. (In Russ). DOI: 10.32324/2412-8945-2023-4-28-39.
3. Cheremisinoff, N. P., Davletshin, A. Emergency Response Management of Offshore Oil Spills: Guidelines for Emergency Responders. Germany: Wiley. 2020 p. 261
4. Ismagilova R. S. (2020). Review of works devoted to methods and ways of wastewater treatment from oil products // *Modern Science*, (12-5), 376-381. (In Russ).
5. Alekseeva, A.A. Stepanova, S.V. Effect of Plasma Surface Modification of Mixed Leaf Litter on the Mechanism of Oil Film Removal from Water Bodies. *Russian Journal of General Chemistry*, 2019, 89(13), pp. 2763-2768 / DOI: 10.1134/S107036321913005X
6. Tunakova Y. A., Valiev V. V. S., Gabdrakhmanova G. N. (2024). Use of natural zeolite for water purification // *Polzunovskiy vestnik*, (1), 179-185. (In Russ DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.021.).
7. Stepanova, S & Alekseeva, A & Khafizova, L. Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 791. pp.73 – 83. DOI:10.1088/1757-899X/791/1/012076
8. Jonoobi, M.; Mekonnen, T.H. Adsorption of oil by 3-(triethoxysilyl) propyl isocyanate-modified cellulose nanocrystals. *Processes*. 2022, p. 2154. DOI: 10.3390/pr10102154.
9. Tyulyaev V. S., Vasilieva Zh. V. (2021). Investigation of the efficiency of the use of organic sorbents of oil and oil products in emergency spill response in the seas of the Arctic region // *Socio-economic and technical systems: research, design, optimization*, (2), 125-136. (In Russ).
10. Loh, J.W.; Goh, X.Y.; Phuc, T.T.N.; Quoc, B.T.; Ong, Z.Y.; Hai, M.D. Advanced aerogels from wool waste fibers for oil spill cleaning applications. *J. Polym. Environ.* 2021, pp. 681–694. DOI: 10.1007/s10924-021-02234-y.
11. Bazargan, A., Tan, J., Hui, C. W., & McKay, G. Utilization of rice husks for the production of oil sorbent materials. *Cellulose*, 21(3), 2014, pp. 1679–1688. DOI: 10.1007/s10570-014-0203-9.
12. Khisamova, A. Sh. Stepanova S. V., Alekseeva A.A. Method of liquidation of emergency oil spills on the water surface by agricultural wastes XXI century: results of the past and problems of the present plus, (4-68), 217-223. (In Russ).
13. Stepanova, S. V. Alekseeva, A. A., Khafizova L. Y. Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod*, Vol. 791. – Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012076.
14. Trinh Trong, Nguyen & Loc, Nguyen & Huy, Ba & Thai, Van. Efficient oil removal from water using carbonized rambutan peel: Isotherm and kinetic studies. *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, 3, 2023, pp. 1-18. DOI: 10.36335/VNJHM.2023(17).1-18.
15. Zolotov Yu.A., Tsizin G.I., Morosanova E.I., Dmitrienko S.G. (2025) Sorption concentration of microcomponents for chemical analysis. *Uspekhi chemii*, (1), 41-66. (In Russ).

Information about the authors

А. Ш. Хисамова, постградуатант кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

С. В. Степанова, кандидат технических наук, профессор кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

А. А. Алексеева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 21 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 66.047

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.030

EDN: SSTLMK

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПОЛИКАПРОАМИДА

Алёна Павловна Федорова¹, Даниил Романович Юдин²

^{1,2}Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) Москва, Россия

¹alenka.savostina@yandex.ru

²21nirvana12@mail.ru

Аннотация. В статье приводится обзор работ расчета кинетики процесса сушки поликарбоната. Поликарбонат – востребованный производственный материал, отличающийся высокими эксплуатационными свойствами. После экстрагирования показатель влажности поликарбоната составляет 13-15 %, однако для дальнейшего использования в производстве этот параметр должен быть не более 0,05 %, что обуславливает важность обеспечения качественной сушки материала. Особенностями процесса сушки поликарбоната являются высокий уровень водопоглощения – 2-3 % влаги по массе на воздухе и 6-8 % в воде, а также резкое замедление процесса сушки при низких значениях влажности, что приводит к неравномерному распределению влаги. Для обеспечения тщательной просушки материала требуется расчёт кинетики обезвоживания гранул поликарбоната. Для достижения цели исследования были использованы аналитический и синтетический методы изучения вторичных материалов по кинетике процесса сушки поликарбоната, использован системно-структурный подход. Сушка выступает типичным тепло- и массообменным процессом, поэтому её кинетика зависит от формы связи влаги с материалом. Сушка является последним этапом технологического процесса производства поликарбоната непрерывным способом – гидролитической полимеризацией ϵ -капролактама в расплаве. Процесс осуществляется в сушильной колонне, в которой поддерживается азотная среда температурой +120-140°C, на протяжении 10-14 часов. Экспериментальные кривые кинетики сушки гранул поликарбоната показывают, что величина коэффициента массопроводности имеет высокую зависимость от влагосодержания и температуры высушиваемого материала. Показатель итогового влагосодержания обратно пропорционален величинам стартовой температуры и расхода азота. Значительное всего на итоговое влагосодержание влияет величина гранул поликарбоната.

Ключевые слова: поликарбонат, полимеризация, производство непрерывным способом, сушильная колонна, сушка, влагосодержание, грануляция, кинетика, массообмен, массопроводность.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования: Федорова А. П., Юдин Д. Р. Изучение кинетики процесса сушки поликарбоната // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 193–198. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.030. EDN: <https://elibrary.ru/SSTLMK>.

Original article

STUDYING KINETICS OF POLYCAPRAMIDE DRYING PROCESS

Alena P. Fedorova¹, Daniil R. Yudin²

^{1,2}Russian State University named after A. N. Kosygin (Technology. Design. Art) Moscow, Russia

¹alenka.savostina@yandex.ru

²21nirvana12@mail.ru

Abstract. The article analyzes the kinetics of the polycaprolactam drying process. Polycaprolactam is a popular production material with high performance properties. After extraction, the moisture content of polycaprolactam is 13-15%, but for further use in production this parameter should be no more than 0.05%, which determines the importance of ensuring high-quality drying of the material. The features of the polycaprolactam drying process are a high level of water absorption - 2-3% moisture by weight in air and 6-8% in water, as well as a sharp slowdown in the drying process at low humidity values, which leads to uneven distribution of moisture. To ensure thorough drying of the material, it is necessary to calculate the kinetics of dehydration of polycaprolactam granules. To achieve the goal of the study, analytical and synthetic methods were used to study secondary materials on the kinetics of the polycaprolactam drying process, and a systemic-structural approach was used. Drying is a typical heat and mass exchange process, so its kinetics depends on the form of moisture bond with the material. Drying is the last stage of the technological process of polycaprolactam production by a continuous method - hydrolytic polymerization of ϵ -caprolactam in the melt. The process is carried out in a drying column, in which a nitrogen environment is maintained at a temperature of + 120-140 ° C, for 10-14 hours. Experimental curves of the kinetics of drying polycaprolactam granules show that the value of the mass conductivity coefficient has a high dependence on the moisture content and temperature of the dried material. The indicator of the final moisture content is inversely proportional to the values of the starting temperature and nitrogen consumption. The size of the polycaprolactam granules has the greatest effect on the final moisture content.

© Федорова А. П., Юдин Д. Р., 2025

Keywords: polycaproamide, polymerization, continuous production, drying column, drying, moisture content, granulate, kinetics, mass transfer, mass conductivity.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to his / her colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.

For citation: Fedorova A.P., Yudin D. R (2024). Studying kinetics of ppolyacramide drying process. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 193-198. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.030. EDN: <https://elibrary.ru/SSTLMK>.

ВВЕДЕНИЕ

Поликапроамид (полиамид-6, ПА 6, капрон, найлон-6) – алифатический полиамид, нетоксичный конструкционный высокомолекулярный полимер, обладающий высокой твёрдостью и механической прочностью, диэлектрическими и антифрикционными свойствами, износостойкостью, деформационной стабильностью, малой плотностью и низким коэффициентом трения [1]. Вещество физиологически безвредно, отличается химической стойкостью и устойчивостью к влиянию большей части растворителей, растворяясь только во фторированных спиртах, концентрированной серной и муравьиной кислотах.

Поликапроамид используется для производства деталей, которые работают в условиях повышенных механических нагрузок, изоляционных и уплотнительных материалов, полимерных термостабилизаторов и концентратов красителей, а также композиционных материалов, которые отличаются ударопрочностью, трудногорючностью, морозо- и водостойкостью [2]. В промышленности полиамид-6 получают преимущественно путём гидролитической полимеризации ϵ -капролактама в расплаве. Итоговая стадия процесса – сушка гранулята – имеет большое значение для получения продукции высокого качества, поскольку после экстрагирования показатель влажности поликапроамида составляет 13-15 %, однако для дальнейшего использования в производстве этот параметр должен быть не более 0,05 %.

Особенностями процесса сушки поликапроамида являются высокий уровень водопоглощения – 2-3 % влаги по массе на воздухе и 6-8 % в воде, а также резкое замедление процесса сушки при низких значениях влажности, что приводит к неравномерному распределению влаги [3]. Для обеспечения высокого качества готовой продукции важной задачей является тщательная просушка материала, требующая расчёта кинетики обезвоживания гранул полиамида-6.

Целью работы является изучение кинетики процесса сушки поликапроамида непрерывным способом.

Для её достижения были поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть специфику процесса сушки влажных материалов.
2. Рассмотреть технологический процесс производства поликапроамида непрерывным способом.
3. Составить материальный баланс процесса сушки поликапроамида
4. Определить ключевые параметры зависимости конечного влагосодержания гранул поликапроамида.

МЕТОДЫ

Для достижения цели исследования были использованы аналитический и синтетический методы изучения вторичных материалов по кинетике процесса сушки поликапроамида, использован системно-структурный подход.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кинетика процесса сушки представляет собой

изменение средних показателей влажности и температуры, рассматриваемых относительно объёма высушенного материала, с течением времени [4]. На основе данного процесса подбираются параметры сушильного агента, тип и габариты сушильного аппарата. Сушка выступает типичным массо- и теплообменным процессом, поэтому её кинетика зависит от формы связи влаги с материалом.

Количественное содержание влаги в материале выражается показателями относительной (ω) и абсолютной (ω^c) влажности. В процессе исследования кинетики процесса осушения обычно используется показатель абсолютной влажности, поскольку объём сухого вещества стабилен при изменении внешних условий. Значения показателей содержания влаги связаны следующими зависимостями:

$$\omega^c = \frac{\omega}{1 - \omega},$$
$$\omega = \frac{\omega^c}{1 + \omega^c}.$$

Скорость процесса осушения определяется сокращением показателя влажности материала $d\omega^c$ за некоторый отрезок времени $d\tau$:

$$\vartheta = \frac{d\omega^c}{d\tau}.$$

При рассмотрении конечных временных параметров средняя скорость осушения соответствует количеству влаги ($\Delta\omega$), удалённой по отношению к сухому веществу (G_{ac}) за единицу времени ($\Delta\tau$):

$$\vartheta_{cp} = \frac{\Delta W}{G_{ac} \Delta \tau} = \frac{\Delta \omega^c}{\Delta \tau}.$$

При исследовании кинетики процесса осушения влагосодержащих материалов обычно применяется параметр скорости, а не интенсивности, поскольку для расчёта последнего требуется установить массу влаги, извлечённой с единицы поверхности образца за единицу времени, и на практике определение истинной поверхности материала – сложная задача. Помимо этого, для материалов, склонных к усадке, в процессе сушки поверхность уменьшается.

Отдельные компоненты процесса влаго- и теплопереноса внутри влажных материалов не рассчитываются аналитическими методами [5]. Это обусловлено его высокой сложностью, связанной с влиянием множества внутренних и внешних факторов – составом и структурой материала, характеристиками процесса осушения и спецификой выбранного сушильного агента. По этой причине кинетика процесса сушки обычно изучается экспериментальным путём, позволяющим вывести зависимости между температурой прогрева материала, кривой и скорости сушки. На основании этих зависимостей оцениваются формы связи влаги с материалом, рассчитывается время сушки, подбирается оптимальный режим сушки, проектируются и рассчитываются промышленные сушильные аппараты.

Сушка является заключительным этапом производства поликапроамида непрерывным способом, следующим за стадиями подготовки сырья, полиме-

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПОЛИКАПРОАМИДА

ризации ϵ -капролактама, охлаждения, размельчения и экстрагирования [6]. Технологическая схема получения поликапроамида представлена на рис. 1.

До транспортировки в установку ϵ -капролактам в кристаллической форме находится в хранилище 1 под азотной подушкой при температуре $+95^{\circ}\text{C}$ [7]. Из хранилища винтовым питателем-дозатором он перемещается в плавильную колонну 2, где в азотной среде (содержание $\text{O}_2 \leq 0,0005\%$) плавится при перемешивании с подогревом до $+90\text{--}100^{\circ}\text{C}$ на протяжении 40-50 минут, после чего подвергается стабилизации.

Через фильтр 3 посредством сжатого азота осуществляется непрерывное перемещение вещества в колонну полимеризации 4.

Чтобы сдерживать процесс кристаллизации расплава, фильтр и трубы подвергаются постоянному прогреву парами даутерма А температурой $+270^{\circ}\text{C}$. В аппарате 5 при перемешивании с подогревом готовится 40%-ный раствор адипината, использующийся в качестве активационного агента. Готовый раствор безостановочно транспортируется в колонну полимеризации, в которой поддерживается температура $+250\text{--}270^{\circ}\text{C}$.

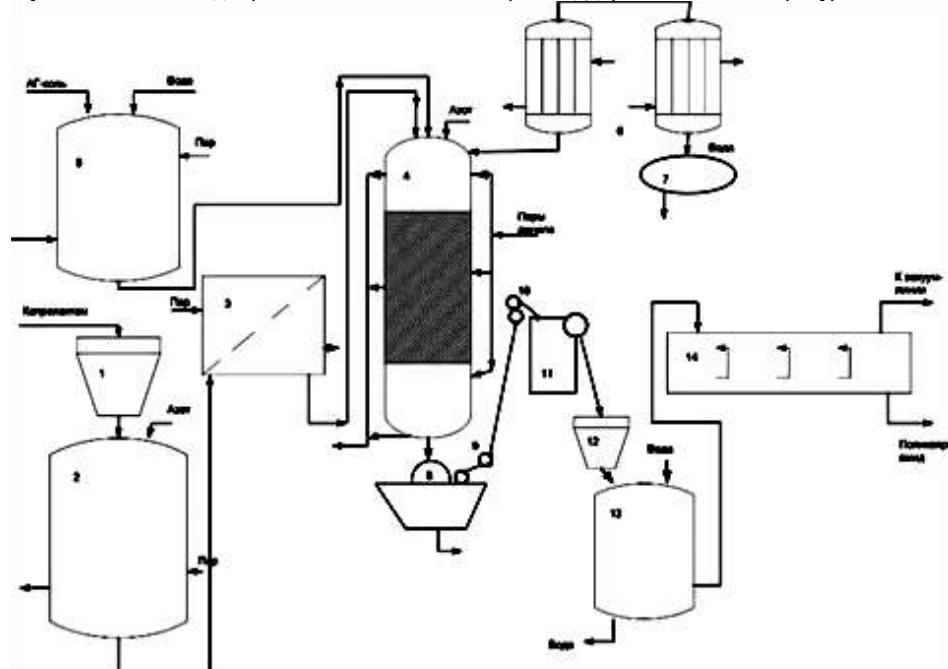


Рисунок 1 – Технологическая схема получения поликапроамида гидролитической полимеризацией ϵ -капролактама в расплаве:

1 – расходный бак для реакционной смеси; 2 – плавильная колонна; 3 – фильтр; 4 – колонна полимеризации; 5 – аппарат для изготавления раствора адипината; 6 – вакуумный эвакуатор; 7 – водосборник; 8 – поливочный барабан; 9 – ориентирующие вилки; 10 – вытягивающие вилки; 11 – резочный станок; 12 – хранилище крошки; 13 – экстракционный аппарат; 14 – вакуумная сушилка

Figure 1 – Technological scheme for the production of polycaproamide by hydrolytic polymerization of ϵ -caprolactam in the melt:
 1 – supply tank for reaction mixture; 2 – melting column; 3 – filter; 4 – polymerization column; 5 – apparatus for producing adipate solution; 6 – vacuum tow truck; 7 – water collector; 8 – watering drum; 9 – orienting forks; 10 – pulling forks; 11 – cutting machine; 12 – crumb storage; 13 – extraction apparatus; 14 – vacuum dryer

На внутренней стороне колонны в интервале 300 мм размещены горизонтальные перфорированные тарелки, предназначенные для турбулизации и перемешивания реакционной массы, спускающейся вниз. Наиболее высокий температурный режим поддерживается в середине аппарата.

Побочным продуктом полимеризации является вода, пары которой на выходе из аппарата утягивают за собой пары ϵ -капролактама. Чтобы вернуть вещество в зону активной реакции и запустить дополнительную поликонденсацию, паровая смесь транспортируется в вакуумный эвакуатор 6, в которых ϵ -капролактам конденсируется в колонну, а отделённая вода собирается в водосборник 7. На этом этапе содержание низкомолекулярных соединений оставляет 6-8 %.

Жидкий полимер из аппарата направляется либо на гранулирование в подводный гранулятор, либо, в соответствии с классической схемой, в экструзионную головку, из которой выдавливается струями сквозь щель на поверхность поливочного барабана 8 с водой,

POLZUNOVSKIY VESTNIK № 2 2025

прошёдшей удаление ионов кальция и магния [8]. На барабан подаётся вода температурой $+20\text{--}25^{\circ}\text{C}$, отводится $+25\text{--}35^{\circ}\text{C}$. На барабане осуществляется охлаждение и затвердевание полимера, который посредством ориентирующих и вытягивающих вилок 9 и 10 поступает в резочный станок 11. Полимер фрагментируется в крошку, которая накапливается в хранилище 12 и передаётся массонасосом в экстракционный аппарат непрерывного действия 13 на многократную промывку водой температурой $\geq +110^{\circ}\text{C}$ для удаления не вступившего в реакцию ϵ -капролактама. Процесс экстракции длится 4-5 часов. После экстракции гранулы поликапроамида содержат большое количество влаги, для удаления которой они направляются в вакуумную сушилку непрерывного действия 14, в которой поддерживается азотная среда температурой $+120\text{--}140^{\circ}\text{C}$. Продолжительность сушки составляет 10-14 часов. За это время остаточное содержание влаги в гранулах снижается до 0,05 %.

На основе технологической схемы получения

поликарбамида можно рассчитать материальный баланс стадии сушки [9]. Часовая производительность по полиамиду-6 $G_0 = \frac{N}{T_{\text{зф}}} = 2424,25 \text{ кг/ч}$. Показатель $G_{\text{вых}}$ включает:

- полиамид-6 гранулированный = 87,01 %;
- низкомолекулярные соединения (HMC) = 0,5 %;
- остатки воды = 0,03 %;
- отводящаяся вода = 12,97 %;
- отходы поликарбамида = 0,02 %.

Массовый расход поликарбамида составляет

$$G_{\text{МП сушки}} = \frac{G_{\text{ПКА}}}{\omega_{\text{ПКА}}} \cdot 100 = \frac{2424,25}{87,01} \cdot 100 = 2786,17 \text{ кг/ч},$$

где $\omega_{\text{ПКА}}$ – содержание поликарбамида (%); $G_{\text{ПКА}}$ – выход поликарбамида-6 (кг/ч).

Выход воды составляет

$$G_{H_2O\text{в}} = \frac{G_{\text{МП сушки}}}{100} \cdot \omega_{H_2Oy} = \frac{2786,17}{100} \cdot 12,97 = 361,36 \text{ кг/ч},$$

где ω_{H_2Oy} – содержание удаляемой воды (%); $G_{H_2O\text{в}}$ – выход воды (кг/ч).

Выход отходов гранулята составляет

$$G_{\text{отходы}} = \frac{G_{\text{МП сушки}}}{100} \cdot \omega_{\text{отходы}} = \frac{2786,17}{100} \cdot 0,02 = 0,56 \text{ кг/ч},$$

где $\omega_{\text{отходы}}$ – содержание отходов гранулята (%); $G_{\text{отходы}}$ – выход отходов гранулята (кг/ч).

Выход поликарбамида после экстрагирования с содержанием HMC составляет

$$G_{\text{гранулы с HMC}} = \frac{G_{\text{МП сушки}}}{100} \cdot \omega_{\text{ПКА}} = \frac{2786,17}{100} \cdot 87,01 = 2424,25 \text{ кг/ч}.$$

Расход воды на стадии сушки составляет

$$G_{H_2O\text{р}} = \frac{G_{\text{ПКА}}}{100} \cdot \omega_{H_2Oo} = \frac{2786,17}{100} \cdot 0,03 = 0,84 \text{ кг/ч},$$

где ω_{H_2Oo} – содержание остаточной воды (%); $G_{H_2O\text{р}}$ – расход воды (кг/ч).

Рассмотрим строение сушильной колонны. Она представляет собой вертикальный аппарат высотой с конусным днищем и сферообразной крышкой [10]. В крышке расположены штуцеры, через которые осуществляется подача гранул поликарбамида и выход отработанного азота (рис. 2).

Колонна состоит из двух зон: предварительной и финальной сушки [11]. В обеих зонах установлены распределительные кольца для азота. Для подачи потоков азота в нужном направлении, усиления их действия и обеспечения эффективной сушки поликарбамида в распределительных кольцах, фиксаторах колец и частях кожуха, расположенных около штуцеров, через которые подаётся азот, предусмотрена круговая перфорация диаметром 1,6 мм.

В процессе работы сушильная колонна полностью заполнена гранулами поликарбамида. Для поддержания равного уровня заполненности используется механизм автоматического регулирования оборотов роторного шлюзового затвора-дозатора, который установлен на пути транспортировки сухих гранул из колонны.

Продолжительность процесса осушения поликарбамида τ (ч) составляет

$$\tau = -\frac{r^2}{\pi^2} \cdot \frac{1}{D} \cdot \ln\left(\frac{X_{m,\tau}}{X_{m,0}} \cdot \frac{\pi^2}{6}\right),$$

где r – молекулярный радиус (м); $X_{m,\tau}$ – содержание влаги в гранулах в момент времени τ (кг/кг); $X_{m,0}$ – содержание влаги в гранулах в момент начала осушения (кг/кг); D – коэффициент диффузии воды в твёрдом поликарбамиде ($\text{м}^2/\text{ч}$) [12].



Рисунок 2 – Сушильная колонна
Figure 2 – Drying column

Экспериментальные кривые кинетики сушки гранул поликарбамида зональным методом позволяют определить концентрационные зависимости коэффициента массопроводности при различных температурах сушильного агента и осушаемого материала [13]. Анализ концентрационных зависимостей коэффициента массопроводности гранул поликарбамида демонстрирует их типичный для полимеров вид. Процесс массопереноса при осушении полимеров имеет существенные отличия от капиллярно-пористых дисперсных материалов: резкий переход процесса массопереноса из экзогенной области в эндогенную; полный контроль скорости протекания процесса во втором периоде диффузии молекул внутренней влаги; значительное влияние равновесной влажности материала на кинетику осушения; стремительный прогрев материала до выравнивания температуры с сушильным агентом, что приводит к протеканию процесса в условиях почти полного равенства температур находящихся во взаимодействии фаз.

Микрокинетика осушения гранул поликарбамида определяется его диффузионными свойствами и значением равновесного влагосодержания. Показатель энергии активации диффузии обратно пропорционален влагосодержанию материала.

Сушка гранул поликарбамида может осуществляться в гребковых вакуум-сушилках либо при атмосферном давлении под азотной подушкой в плотном, кипящем или виброкипящем слоях [14]. Экзогенная либо переходная задача повышения скорости процесса осушения решается путём перехода от плотного к виброкипящему либо кипящему слоям, эндогенная – увеличением площади массообмена (экранировкой поверхности гранулята).

В процессе приведения слоя гранул поликарбамида в кипящее или виброкипящее состояние активизируется гидродинамический режим сушки, вследствие чего возможно добиться значительного повышения температуры без слипания частиц [15]. Так, при увеличении температуры от +90 до +150°C коэффициент массопроводности возрастает в восемь раз в интервале влагосодержания полимера от 2 до 0,05 %, в результате чего продолжительность процесса сушки сокращается в шесть раз (рис. 3).

Расчётные данные показывают, что оптимально поддержание небольших скоростей движения сушильного агента. Для устранения экранирования поверхности гранулята и поддержания равномерного нагрева могут

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПОЛИКАПРОАМИДА

применяться малые числа кипения либо специальные мешалки, устанавливаемые в неподвижном слое. Также повысить показатели скорости процесса осушения можно путём фокусированного воздействия на структуру материала с целью увеличения коэффициента массопроводности, посредством увеличения фрагментации гранул и изменения их формы.

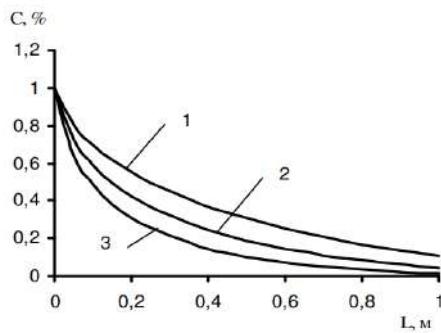


Рисунок 3 – Кривые сушки гранул поликапроамида при различных температурах: 1 – 90°C, 2 – 120°C, 3 – 150°C

Figure 3 – Drying curves of polycaproamide granules at different temperatures: 1 – 90°C, 2 – 120°C, 3 – 150°C

В наибольшей степени замедление процесса сушки при увеличении радиуса или длины частиц зависит не от не формы гранулы, а от её объёма, который также возрастает [16]. Влагоперенос в процессе осушения представляет собой перенос жидкой фазы, осуществляемый за счёт градиента дифференцирующего давления в периферийных слоях воды, если влажность материала ниже максимальной гигроскопической влажности, а также как перенос паровой составляющей, образования которой происходит во всём объёме. Изменение средней объёмной влажности гранулы поликапроамида во времени представлено на рисунке 4.

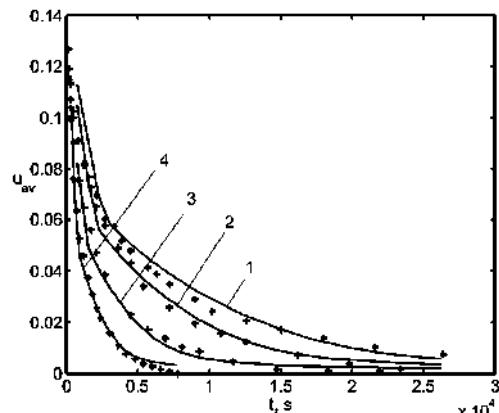


Рисунок 4 – Изменение во времени среднего объёма влажности гранулы поликапроамида с радиусом $R_{gr} = 1,375 \cdot 10^{-3}$ м, длиной $L_{gr} = 0,04$ м, при относительной влажности $\omega_c = 0,03$ и температуре $T_c = 373$ К – 1, 383 – 2, 403 – 3, 423 – 4

Figure 4 – The change in time with the average volume of moisture content of the polycaproamide granule with radius $R_{gr} = 1,375 \cdot 10^{-3}$ m, length $L_{gr} = 0,04$ m at relative humidity $\omega_c = 0,03$ for temperature $T_c = 373$ K – 1, 383 – 2, 403 – 3, 423 – 4

Важно учитывать, что в непрерывно действующей колонне кипящего слоя гранулы поликапроамида

продольно перемешиваются, вследствие чего отдельные влажные гранулы проскальзывают на выход аппарата. Данный эффект нежелателен при осуществлении глубокого осушения материала непосредственно перед переработкой, поскольку даже незначительное наличие влаги в расплаве полимера приводит к серьезным последствиям: гидролизу и деструкции расплава, вспениванию массы, уменьшению показателя кристалличности, снижению прочностных свойств и качества поверхности изделий, неоднородности светопроницания и локальным колебаниям цветности.

Для исключения данных последствий требуется сформировать и поддерживать режим идеального вытеснения твёрдой фазы в сушильных аппаратах кипящего слоя, чего можно достичнуть при применении аппарата, имеющего лотковую конструкцию, и устанавливая горизонтальные либо вертикальные дифференцирующие перегородки.

ВЫВОДЫ

В процессе сушки поликапроамида на конечное влагосодержание влияют начальная температура и расход азота: с повышением этих параметров конечное влагосодержание сокращается. Значительнее всего на итоговое влагосодержание влияет величина гранул. В случае фиксированного диаметра частиц рационально использовать температуру азота в качестве управляющего параметра. В целях экономии энергозатрат сушку гранул поликапроамида в атмосферных сушилках целесообразно проводить без применения активных гидродинамических режимов, полагаясь только на процесс эндогенного массопереноса. Интенсифицировать процесс сушки можно путём уменьшения величины гранул, проведения процесса в аппаратах виброкипящего или кипящего слоя при поддержании малых параметров кипения и максимально допустимой температуре. При этом важно учитывать, что в непрерывно функционирующих аппаратах кипящего слоя требуется обеспечивать гидродинамическую структуру потока гранул поликапроамида, приближенную к режиму идеального вытеснения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кадыров А.Р., Кузьмин В.В. Поликапроамид, свойства, области применения и способы получения // Студенческий. 2021. № 16-4 (144). С. 60-62.
- Имитационное моделирование стадии синтеза поликапроамида для управления процессом его промышленного получения / Е.А. Алексеев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2014. № 4 (22). С. 108-112.
- Расчетно-экспериментальное исследование совмещённого процесса сушки и демономеризации полиамида-6 в аппарате периодического действия / А.А. Липин [и др.] // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51, № 3. С. 315-322. DOI: 10.7868/S0040357117030095
- Изучение кинетики процесса сушки влажных материалов // Ивановский государственный химико-технологический университет. URL: <https://www.isuct.ru/dept/chemkiber/piaht/metodwork/drying/drying2.htm#1> (дата обращения: 06.07.2024).
- Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. Ленинград: Химия, Ленинградское отделение, 1987. 207 с.
- Способ получения полиамида-6 Пат. 2471816 Российская Федерация, МПК C10 С08 G69/16 / А.С. Колобков [и др.]; заявитель и патентообладатель Ивановский гос. химико-технологич. ун-т - № 2471816; заявл. 10.01.2012; опубл. 10.01.2013; Бюл. №1.

7. Барвинский И.А., Барвинская И.Е. Полиамид 6 (PA 6) // Справочник по литьевым термопластичным материалам. – 2020. – URL: http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials_PA6.htm (дата обращения: 06.07.2024).

8. Полиамиды: их классификация, сырье и основные методы получения. Лекция 25. Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2019. 8 с.

9. Технологический регламент производства гранулята поликарбоната ПА6. ОАО «Щекиноазот», Р-14-29-01-2007, 2007. 196 с.

10. Полиамиды. Технология и оборудование // Современные технологии производства. – URL: <https://extxe.com/6899/poliamid-tehnologija-i-oborudovanie/> (дата обращения: 06.07.2024).

11. Тихонов Н.Н., Шерышев М.А. Оборудование подготовительных процессов заводов пластмасс : учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Москва : Юрайт, 2024. 302 с.

12. Талипова И.П., Арсланов И.М. Расчет сушильных установок : учебно-методическое пособие / под ред. И.П. Талиповой. Набережные Челны : Изд.-полиграфич. центр НЧИ КФУ, 2019. 69 с.

13. Кошельева М.К., Дорняк О.Р., Фёдорова А.П. Массопроводность поликарбоната при конвективной сушке // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и лёгкой промышленности (ИНОВАЦИИ-2022): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 87-89.

14. Расчёт процесса сушки гранул поликарбоната / С.П. Рудобашта [и др.] // Основные процессы и техника промышленных технологий: сборник научных трудов кафедры кафедры ПАХТ и БЖД. Москва, 2014. С. 88-95.

15. Липин А.А., Липин А.Г., Кириллов Д.В. Прогнозирование рациональных режимно-технологических параметров процесса сушки гранулированного поликарбоната // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 4, № 4 (62). С. 106-109.

16. Kosheleva, M., Dorniak, O., Maklusova, M. (2018). Modeling of kinetics of drying process of polycaprolactam granules considering its sorption properties. *21st International Drying Symposium Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València, 387-394. DOI: 10.4995/IDS2018.2018.7553.

Информация об авторах

А. П. Федорова – аспирант кафедры «Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности» Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство).

Д. Р. Юдин - аспирант кафедры «Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности» Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство).

REFERENCES

1. Kadyrov, A.R., Kuz'min, V.V. (2021). Polycaprolactam, properties, applications and methods of production. *Studencheskii*, (16-4 (144)), 60-62. (In Russ.).
2. Alekseev, E.A., Golovushkin, B.A., Labutin, A.N., Erofeeva, E.V. (2014). Simulation modeling of the stage of polycaprolactam synthesis to control the process of its industrial production. *News of higher educational institutions. Series: Economics, finance and production management*, (4 (22)), 108-112. (In Russ.).
3. Lipin, A.A., Lipin, A.G., Bazarov, Yu.M., Barannikov, M.V.,

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 21 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

Mizerovsky, L.N. (2017). Calculation and experimental study of the combined process of drying and demonomerization of polyamide-6 in a batch apparatus. *Theoretical foundations of chemical technology*, (51 (3)), 315-322. (In Russ.). DOI: 10.7868/S0040357117030095

4. Study of the kinetics of the drying process of wet materials. Ivanovo State University of Chemical Technology. Retrieved from <https://www.isuct.ru/dept/chemkibera/plate/metodwork/drying/drying2.htm#1> (In Russ.).

5. Frolov V.F. *Modeling of drying of dispersed materials*. Leningrad : Chemistry, Leningrad branch. (In Russ.).

6. Bazarov, Yu.M., Mizerovsky, L.N., Kolobkov, A.S., Silantyeva, V.G. (2013). Method of producing polyamide-6. Pat. 2471816. *Russian Federation, published on 10.01.2013; Bull. No. 1*. (In Russ.).

7. Barvinskii, I.A., Barvinskaya, I.E. Poliamid 6 (PA 6) (2020). Handbook of injection molded thermoplastic materials. Retrieved from http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials_PA6.htm (In Russ.).

8. Polyamides: their classification, raw materials and main methods of production. Lecture 25. Minsk: Belarusian State Technological University, 2019. (In Russ.).

9. Technological regulations for the production of PA6 polycaprolactam granulate (2007). JSC «Shchokinoazot», R-14-29-01-2007 (In Russ.).

10. Polyamides. Technology and equipment. Modern production technologies. Retrieved from <https://extxe.com/6899/poliamid-tehnologija-i-oborudovanie/> (In Russ.).

11. Tikhonov, N.N., SHeryshev, M.A. (2024). *Equipment for preparatory processes of plastics factories: a textbook for universities*. 2nd ed., rev. and additional Moscow: Yurayt. (In Russ.).

12. Talipova, I.P., Arslanov, I.M. (2019). *Calculation of drying installations: educational manual*. Naberezhnye Chelny : Publishing and printing center of NChI KFU. (In Russ.).

13. Kosheleva, M.K., Dorniak, O.R., Fedorova, A.P. (2022). Mass conductivity of polycaprolactam during convective drying. *Design, technologies and innovations in the textile and light industry (INNOVATIONS-2022): collection of materials of the International Scientific and Technical Conference*, Moscow, 87-89. (In Russ.).

14. Rudobashita, S.P., Kosheleva, M.K., Razumeev, K.E., Pichugin, A.V. (2014). Calculation of the drying process of polycaprolactam granules. *Basic processes and equipment of industrial technologies: collection of scientific works of the department of the department of PACT and BZD*, Moscow, 88-95. (In Russ.).

15. Lipin, A.A., Lipin, A.G., Kirillov, D.V. (2011). Forecasting rational regime-technological parameters of the drying process of granulated polycaprolactam. *Bulletin of the Saratov State Technical University*, (4, (62)), 106-109. (In Russ.).

16. Kosheleva, M., Dorniak, O., Maklusova, M. (2018). Modeling of kinetics of drying process of polycaprolactam granules considering its sorption properties. *21st International Drying Symposium Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València, 387-394. DOI: 10.4995/IDS2018.2018.7553

Information about the authors

A.P. Fedorova – postgraduate student of the Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety Russian State University named after A. N. Kosygin (Technology. Design. Art).

D.R. Yudin - postgraduate student of the Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety Russian State University named after A. N. Kosygin (Technology. Design. Art).



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 669.58
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.031

EDN: JKHFNN

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ЦИНКОВАНИЕ КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Ольга Сергеевна Бондарева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия
osbondareva@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4273-2483>

Аннотация. Высокотемпературное цинкование подразумевает собой погружение стальных изделий в расплав цинка при температуре выше 500°C. Есть данные об особенностях фазового строения цинкового покрытия, полученного при таких температурах, обеспечивающих более низкую толщину покрытия. Крепежные изделия с резьбой требуют минимальной толщины покрытия для обеспечения удовлетворительной свинчиваемости изделий. Однако необходимо также обеспечить высокий уровень эксплуатационных свойств покрытия на крепеже, таких как твердость стальной основы, твердость покрытия, коэффициент трения, коррозионная стойкость. В связи с этим целью работы было исследование структуры и свойств цинковых покрытий, образующихся в расплаве при температуре 450–560°C, на крепежных изделиях с резьбой. Установлено, что воздействие высокой температуры расплава приводит к снижению твердости стали болтов, однако твердость остается в пределах нормы. Показано, что минимальная толщина покрытия на всех исследуемых сталях образуется в интервале температур цинкования 530–560°C. Совместный анализ данных рентгенофазового анализа и энергодисперсионного микроанализа показал, что покрытие, образующееся в расплаве при температуре 530°C, практически не содержит ζ -фазу, которая отвечает за интенсивный рост покрытия. Свойства цинковых покрытий, образующихся в расплаве в высокотемпературном диапазоне, отвечают эксплуатационным требованиям для крепежа. Покрытия имеют в 1,5–2 раза большую твердость, большую шероховатость поверхности, меньший коэффициент трения по сравнению со стандартным цинковым покрытием, образующимся в расплаве при 450°C. Покрытие, образующееся в расплаве при 530°C, в гальванической паре более коррозионностойкое по сравнению со стандартным цинковым покрытием.

Ключевые слова: горячее цинкование, высокотемпературное цинкование, цинковое покрытие, температура цинкования, цинкование крепежа, структура покрытия, толщина покрытия.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь.

Для цитирования: Бондарева О.С. Высокотемпературное цинкование крепежных изделий // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 199–206. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.031. EDN: <https://elibrary.ru/JKHFNN>.

Original article

HIGH TEMPERATURE HOT-DIP GALVANIZING OF FASTENERS Olga S. Bondareva

¹ Samara National Research University, Samara, Russia
¹ osbondareva@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4273-2483>

Abstract. High-temperature hot-dip galvanizing involves immersing steel products in molten zinc at temperatures above 500°C. There is data on the peculiarities of the phase structure of zinc coating obtained at such temperatures that provide a lower coating thickness. Threaded fasteners require a minimum coating thickness to ensure satisfactory product make-up. However, it is also necessary to ensure a high level of performance properties of the coating on the fastener, such as the hardness of the steel base, coating hardness, coefficient of friction, and corrosion resistance. In this regard, the goal of the work was to study the structure and properties of zinc coatings formed in the melt at a temperature of 450–560°C on threaded fasteners. It has been established that exposure to high melt temperatures leads to a decrease in the hardness of steel bolts, but the hardness remains within normal limits. It has been shown that the minimum coating thickness on all steels under study is formed in the galvanizing temperature range of 530–560°C. A joint analysis of X-ray phase analysis and energy-dispersive microanalysis data showed that the coating formed in the melt at a temperature of 530°C practically does not contain the ζ -phase, which is responsible for the intensive growth of the coating. The properties of zinc coatings formed in the melt in the high temperature range meet the operational requirements for fasteners. The coatings have 1.5–2 times greater hardness, greater surface roughness, and a lower coefficient of friction compared to standard zinc coatings formed in the melt at 450°C. The coating formed in the melt at 530°C is more chemically resistant compared to standard zinc coating.

Keywords: hot-dip galvanizing, high temperature hot-dip galvanizing, zinc coating, temperature galvanizing, galvanizing of fasteners, structural coatings, coating coatings.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to her colleagues for their help.

For citation: Bondareva, O. S. (2025). High temperature hot-dip galvanizing of fasteners. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 199-206. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.031. EDN: <https://elibrary.ru/JKHFNN>.

ВВЕДЕНИЕ

Горячее цинкование является одним из основных способов нанесения цинкового покрытия на крепеж и распространено шире, чем термодиффузионное цинкование и гальваническое цинкование из-за таких преимуществ как высокая прочность сцепления с основой и превосходная коррозионная стойкость [1, 2]. При обычных температурах горячего цинкования (450°C) толщина цинкового покрытия зависит от химического состава стали [3], особенно от содержания кремния [4]. Кремний является раскислителем и популярным легирующим элементом в сталях, применяемых для изготовления крепежа, таких как Ст3, 20, 40Х, 30ХГСА, 09Г2С и др. Известно, что на сталях, содержащих кремний до 0,08 вес.%, образуются покрытия, состоящие из тонких, плохо различимых слоев Γ (Fe_3Zn_{10} , $FeZn_3$, Fe_4Zn_9) и Γ_1 ($Fe_5Zn_{21}/FeZn_4/Fe_{11}Zn_{40}$), а также слоев δ_{1p}/δ_{1k} ($FeZn_{10}/Fe_{13}Zn_{126}/FeZn_7$), ζ ($FeZn_{13}$) и η (Zn) - фаз примерно одинаковой толщины [5]. При содержании кремния 0,08-0,12 вес.% наблюдаются локальные утолщения ζ -фазы, приводящие к значительной разнотолщинности покрытия, получившей название «эффект Санделина» [6]. На сталях, содержащих кремний 0,15-0,35 вес.%, цинковое покрытие имеет минимальную толщину и состоит в основном из слоев δ и ζ -фаз. Дальнейшее увеличение содержания кремния в стали более 0,4 вес.% приводит к интенсивному росту покрытия за счет роста ζ -фазы, что является недостатком, т.к. приводит к перерасходу цинка и риску отслоения покрытия [7]. Sánchez показал, что ζ -фаза формируется первая при образовании покрытия и ее рост и строение особо чувствительны к содержанию кремния в стали [8]. В двойной системе Fe-Zn показано, что ζ -фаза образуется по перитектической реакции при температуре около 530°C, следовательно при более высоких температурах фазовый состав покрытия не должен содержать ζ -фазу [9]. Поэтому повышение температуры процесса цинкования выше 530°C может быть возможным решением этой проблемы цинкования кремнийсодержащих сталей, которое позволит лучше контролировать толщину и состав покрытия. Такой процесс рассматривался ранее и получил название высокотемпературное цинкование (high temperature hot-dip galvanizing (HT-HDG)), однако опубликованные исследования недостаточно полные. Chidambaram и др. (1991г) показал, что на пластинах из бескремнистых и раскисленных кремнием сталях при температуре расплава 560°C образуются покрытия, микроструктура которых представлена δ - Fe_5Zn_{21} и ζ - $FeZn_{13}$ фазами [10]. Verma изучал покрытия, полученные при температуре расплава 560°C на плоских образцах, уголках и трубах из сталей, раскисленных кремнием. Он отмечал, что толщина и распределение фаз в покрытиях не значительно зависели от времени погружения от 3 до 15 минут. Покрытие состояло в основном из δ -фазы с меньшим количеством ζ -фазы и Γ -фазы. Были получены данные по повышенной коррозионной стойкости, а также более высокой твердости этих покрытий по сравнению с традиционными [11]. В продолжении своей работы Verma показал, что в покрытии на пластинах из бескремнистой стали толщина покрытия изменялась от примерно 80 мкм при 520°C до примерно 20 мкм при 555°C за счет уменьшения количества ζ фазы [12]. Wang изучал влияние темпе-

ратуры цинковой ванны в диапазоне 450–530°C на морфологию и толщину покрытий на модельном сплаве Fe–0,1 вес.% Si. Было установлено, что толщина покрытия достигает максимума при температуре расплава 470°C и минимума при температуре расплава 500°C соответственно. Показано, что при температуре 500°C ζ -фаза исчезает, и покрытие состоит из δ -фазы [13]. Bicao также рассматривал влияние температуры цинковой ванны в диапазоне 450–530°C на морфологию и толщину покрытия на чистом железе. Установлено, что при температуре цинкования от 450 до 470°C покрытие состоит из плотного ζ -($FeZn_{13}$)-слоя поверх δ -(Fe_5Zn_{21})-слоя. Толщина покрытия максимальна при 480°C. Структура такого покрытия представлена в основном ζ -фазой, соседствующей с областями чистого цинка. Покрытие, образующееся при температуре расплава 500°C, состоит в основном из δ -фазы [14]. Высокотемпературное цинкование (535–565°C) высококремнистых сталей типа 09Г2С исследовалось в моей более ранней работе [15]. Было установлено, что толщина покрытия уменьшается и достигает минимума при температуре расплава 555°C. Структура данного покрытия не содержит ζ -фазу в чистом виде [15]. Таким образом, все исследователи отмечают, что высокотемпературное цинкование позволяет получать тонкие покрытия, как на реактивных, так и на высококремнистых сталях. Также важно отметить ряд ограничений данной технологии. Во-первых, при таких температурах приходится использовать дорогую керамическую футеровку ванн цинкования. Во-вторых, установлено, что высокотемпературные покрытия более хрупкие при испытании на трехточечный изгиб, чем традиционные покрытия, однако более твердые и износостойкие [16]. Исходя из сказанного, перспективным направлением представляется использование высокотемпературного цинкования для получения цинковых покрытий на крепеже. Основной проблемой при горячем цинковании изделий с резьбой является образование наплывов, неравномерное или слишком толстое покрытие, не обеспечивающее удовлетворительную свинчиваемость деталей. Цинкование крепежа обычно проводится на малых линиях с керамическими ваннами, что делает возможным использование высокотемпературного диапазона. Повышенная твердость и износостойкость высокотемпературного цинкового покрытия могут стать преимуществом для крепежа. Следует отметить, что воздействие высокой температуры при горячем цинковании снижает предел текучести, предел прочности и твердость высокопрочных сталей [17, 18]. Поэтому высокотемпературное цинкование стоит рассматривать только применительно для крепежа класса прочности 5.8. На сегодняшний день недостаточно данных о возможности применения высокотемпературного горячего цинкования для изделий с резьбой.

Целью данной работы было исследование структуры и свойств цинковых покрытий, образующихся в расплаве при температуре 450–560°C, на крепежных изделиях с резьбой.

МЕТОДЫ

Образцы для исследования представляли собой болты из наиболее распространенных марок сталей, класс прочности 5.8. Особое значение имеет

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ЦИНКОВАНИЕ КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

содержание кремния в сталях, стали Ст3 и 20 содержит кремний в следствие раскисления, сталь 09Г2С в качестве упрочняющего легирующего элемента. Поэтому химический состав сталей уточняли с помощью оптико-эмиссионного анализатора Foundry-Master XPR. Результаты представлены в таблице 1. Измерение твердости стальной основы до и после цинкования проводили на твердомере Роквелла по шкале HRB и переводили в единицы по шкале HB. Для обеспечения смачивания поверхности стали горячим цинковым расплавом образцы прошли стандартные операции химической подготовки поверхности. Они включали в себя последовательное погружение в ванны обезжиривания (20%NaOH), промывки в воде, травления (10% HCl), промывки в воде, флюсования в растворе солей $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{ZnCl}_2$. После этого образцы сушили при 100°C и погружали в расплав цинка с добавкой 0,1% алюминия. Температурный диапазон горячего цинкования составил 450-550°C с шагом 10°C. Время выдержки образцов в расплаве - 80 сек. После извлечения образцы

Таблица 1 - Химический состав стали болтов, вес.% / Table 1 – Chemical composition of steel, wt. %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Fe
Ст3кп	0,172	0,01	0,321	0,081	0,0550	0,0037	0,0130	основа
Ст3сп	0,175	0,08	0,404	0,033	0,0270	0,0060	0,0021	основа
20	0,23	0,37	1,26	0,282	0,0279	0,0030	0,0021	основа
09Г2С	0,122	0,72	1,51	0,031	0,0562	0,0091	0,0090	основа

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что воздействие высокой температуры расплава приводит к снижению твердости стали болтов, однако твердость остается в пределах нормы 152-238 HB для класса прочности 5.8 по ГОСТ 1759.4-87 (рис.1).

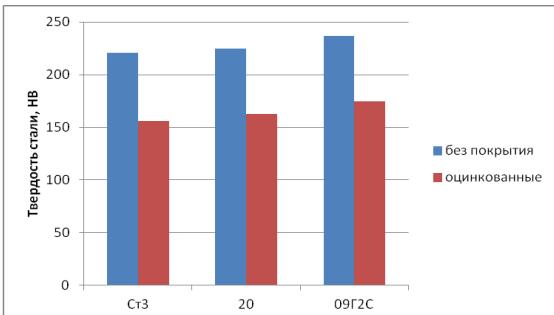


Рисунок 1 – Изменение твердости стали болтов в результате горячего цинкования, HB

Figure 1 – Change in the hardness of the steel of bolts as a result of hot-dip galvanizing, HB

Влияние температуры цинкования на толщину покрытия показано на рисунке 2.

Анализ полученных зависимостей показал, что для каждой стали в исследуемом диапазоне наблюдается максимум толщины покрытия. Для бескремнистой стали Ст3кп толщина покрытия возрастает незначительно с 40 до 60 мкм при температуре цинкования 500°C и затем стабилизируется и составляет 50 мкм при температуре цинкования 510-540°C. Для реактивной «санделиновой» стали Ст3сп (Si=0,08 вес.%) наибольшая толщина покрытия образуется при температуре расплава 470°C, при температуре расплава 510-540°C толщина образующегося покрытия минимальна и составляет около 70 мкм. Толщина покрытия на стали 20 (Si=0,37 вес.%) плавно увеличивается до 100 мкм при температуре расплава 470-510°C и затем уменьшается до минимального значе-

ния в 60-70 мкм при температуре расплава 530-550°C. Толщина покрытия на стали 09Г2С (Si=0,72 вес.%) интенсивно возрастает с увеличением температуры цинкования и достигает максимума в 240 мкм в интервале 470-520°C, затем резко снижается и при температуре цинкования 540°C составляет 100 мкм, а при температуре 560°C – 60 мкм. Таким образом, в высокотемпературном диапазоне толщина цинкового покрытия имеет минимальные значения в интервале температур цинкования 530-560°C для всех исследуемых марок сталей.

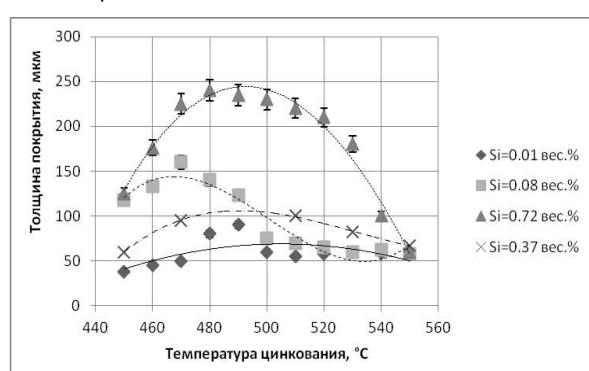


Рисунок 2 – Зависимость толщины покрытия от температуры цинкования

Figure 2 – Dependence of coating thickness on galvanizing temperature

Фотографии микроструктуры покрытий, образующихся на разных сталях при температуре расплава 450°C, показаны на рисунке 3. Исследования показали, что на бескремнистой стали Ст3кп (Si=0,01 вес.%) покрытие состоит из трех фазовых слоев δ , ζ и η равномерной толщины (рис.3а). В покрытии на реактивной стали Ст3сп (Si=0,08 вес.%) ζ -фаза имеет разветвленную структуру неодинаковой толщины, в некоторых местах кристаллиты ζ -фазы выходят на поверхность покрытия (рис. 3б). Покрытие на стали 20

(Si=0,37 вес.%) на половину состоит из ζ -фазы, которая меняет свою структуру на крупнокристаллическую (рис.3в). На стали с высоким содержанием кремния 09Г2С (Si=0,72 вес.%) покрытие почти полностью представлено крупными кристаллами ζ -фазы, поверхностная η -фаза отсутствует (рис.3г).

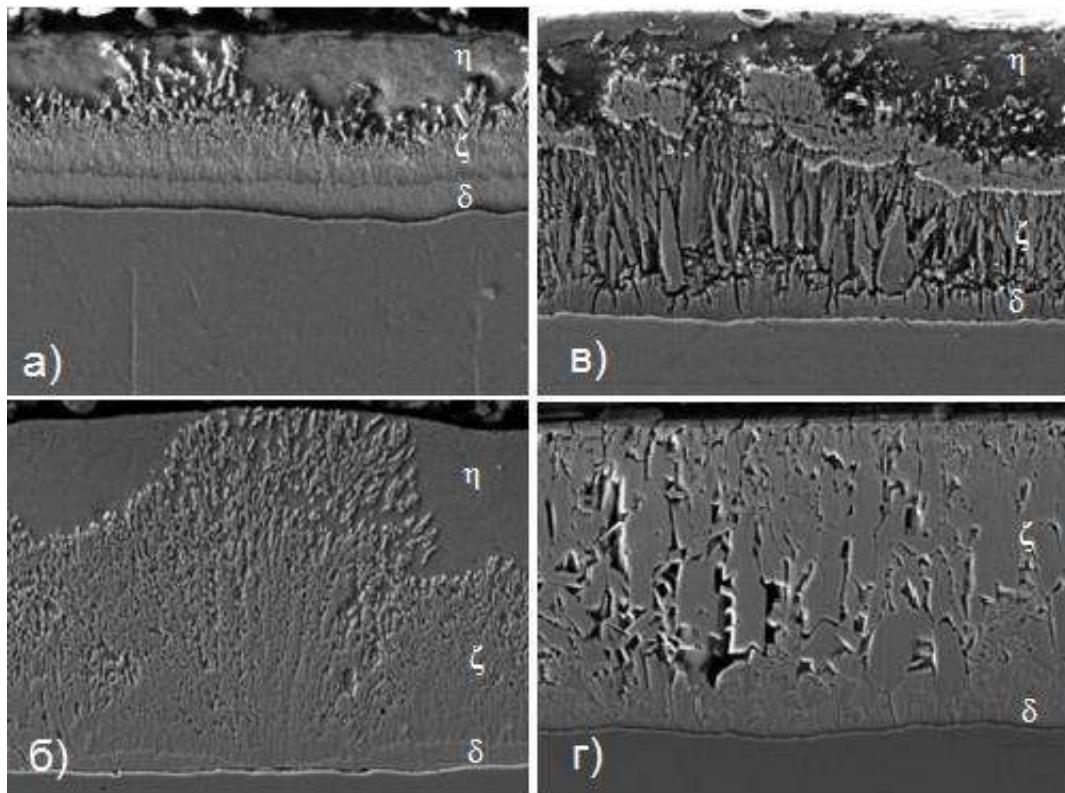


Рисунок 3- Микроструктура покрытий, образующихся при $T=450^{\circ}\text{C}$, $t=80$ сек, $\times 1000$:
 а) Ст3kp (Si=0,01 вес.%); б) Ст3 пс (Si=0,08 вес.%);
 в) сталь 20 (Si=0,37 вес.%); г) 09Г2С (Si=0,72 вес.%)

Figure 3 - Microstructure of coatings formed at $T=450^{\circ}\text{C}$, $t=80$ sec, $\times 1000$:
 a) St3kp (Si=0.01 wt%); b) St3 ps (Si=0.08 wt%);
 c) steel 20 (Si=0.37 wt%); d) 09G2S (Si=0.72 wt.%)

Анализ микроструктуры покрытия показал, что с повышением температуры меняется фазовое строение покрытия. Наплывы чистого цинка во впадинах резьбы отсутствуют на всех образцах. Для идентификации фаз был проведен рентгенофазовый анализ поверхности покрытия и энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ фазовых слоев в

Микроструктура покрытия, полученного в высокотемпературном диапазоне, на всех сталях имеет схожее строение. Для наглядного сравнения показана поверхность и поперечное сечение покрытия, полученного при температуре цинкования 480°C , 530°C и 560°C , на резьбе болтов из стали 20 (рис.4).

Таблица 2 – Области гомогенности некоторых фазовых составляющих в Fe-Zn сплавах [5]

Table 2 – Areas of homogeneity of some phase components in Fe-Zn alloys [5]

Фаза	Соединение	Fe (вес.%)
η	Zn	0,03
ζ	FeZn ₁₃	6,17
δ_{1p}	FeZn10 /Fe ₁₃ Zn ₁₂₆	7,87/8,09
δ_{1k}	FeZn ₇	10,87
Γ_1	Fe ₅ Zn ₂₁ FeZn ₄ Fe ₁₁ Zn ₄₀	16,9 17,6 19,02
Γ	Fe ₃ Zn ₁₀ FeZn ₃ Fe ₄ Zn ₉	20,4 22,16 27,52

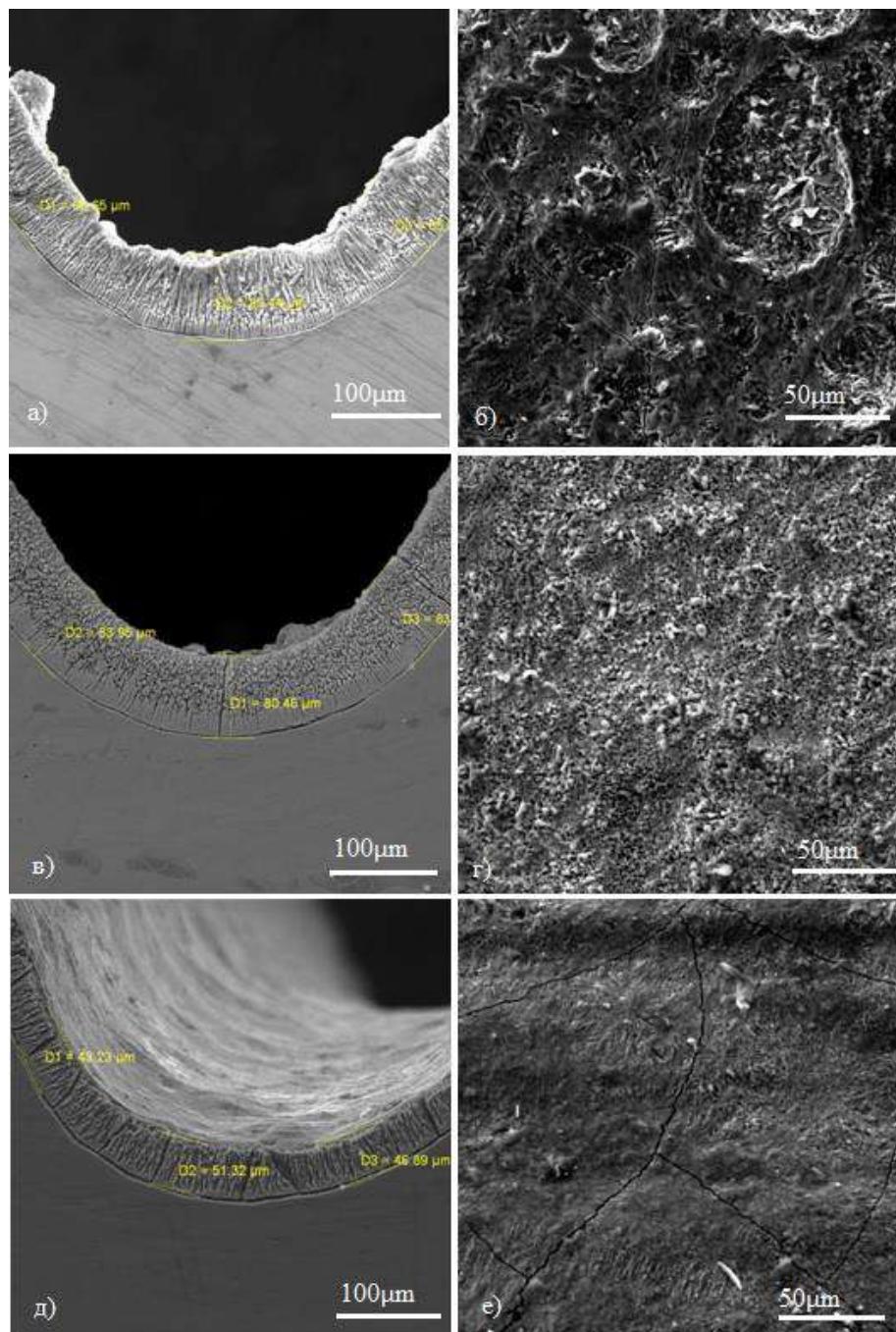


Рисунок 4 – Цинковое покрытие, полученное на стали 20, время выдержки в расплаве 80 сек:
 а) микроструктура покрытия на резьбе, $T=480^{\circ}\text{C}$; б) поверхность, $T=480^{\circ}\text{C}$;
 в) микроструктура покрытия на резьбе, $T=530^{\circ}\text{C}$; г) поверхность, $T=530^{\circ}\text{C}$;
 д) микроструктура покрытия на резьбе, $T=560^{\circ}\text{C}$; е) поверхность, $T=560^{\circ}\text{C}$.

Figure 4 - Zinc coating obtained on steel 20, holding time in the melt for 80 seconds:
 a) microstructure of the coating on the thread, $T=480^{\circ}\text{C}$; b) surface, $T=480^{\circ}\text{C}$;
 c) microstructure of the coating on the thread, $T=530^{\circ}\text{C}$; d) surface, $T=530^{\circ}\text{C}$;
 d) microstructure of the coating on the thread, $T=560^{\circ}\text{C}$; e) surface, $T=560^{\circ}\text{C}$.

Результаты рентгенофазового анализа приведены на рисунке 5. Результаты энергодисперсионного

рентгеноспектрального микроанализа приведены в таблице 3 и 4.

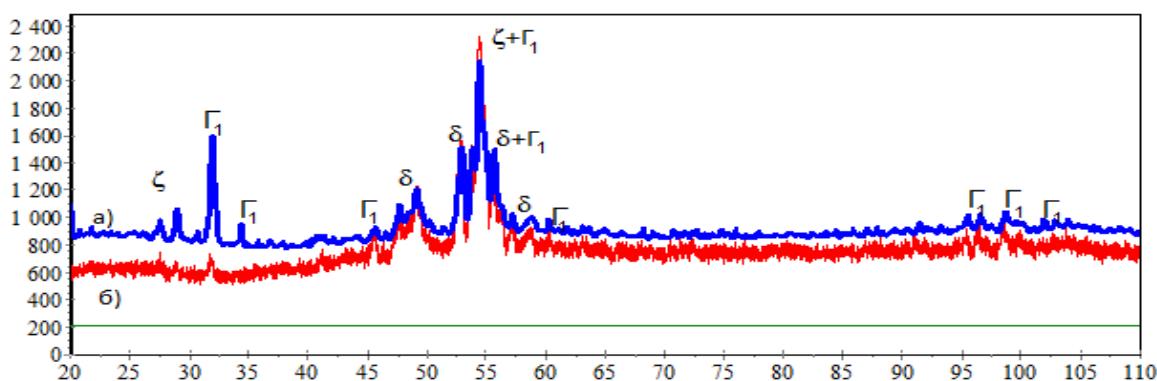


Рисунок 5 – Дифрактограммы с поверхности покрытия:
а) температура цинкования 560°C; б) температура цинкования 480°C

Figure 5 – Diffraction patterns from the coating surface:

a) galvanizing temperature 560°C; b) galvanizing temperature 480°C

Рентгенофазовый анализ показал, что при температуре 560°C в покрытии увеличивается содержание Γ_1 -фазы, практически исчезает ζ -фаза. Энерго-

дисперсионный рентгеноспектральный микроанализ позволяет идентифицировать наличие железоцинковых фаз в слоях по сечению покрытия.

Таблица 3 – Энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ фазовых слоев в поперечном сечении покрытия, полученного в расплаве при температуре цинкования 480°C

Table 3 – Energy-dispersive X-ray spectral microanalysis of phase layers in the cross section of the coating obtained in the melt at a galvanizing temperature of 480°C

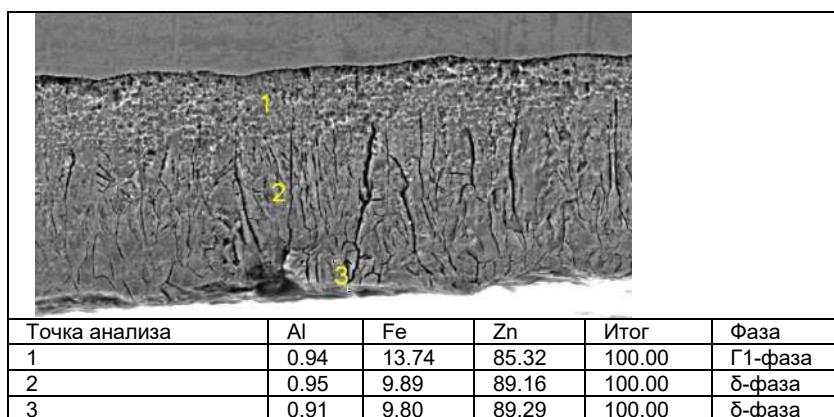
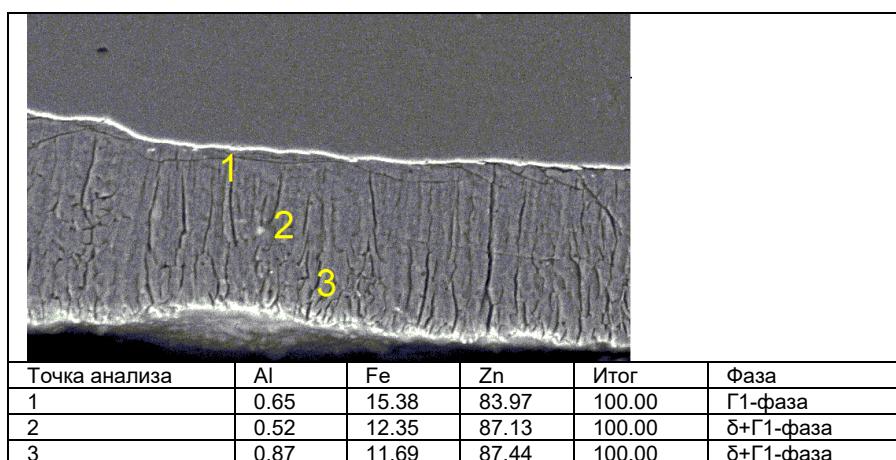


Таблица 4 – Энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ фазовых слоев в поперечном сечении покрытия, полученного в расплаве при температуре цинкования 530°C

Table 4 – Energy-dispersive X-ray spectral microanalysis of phase layers in the cross section of the coating obtained in the melt at a galvanizing temperature of 530°C



Таким образом, совместный анализ данных рентгенофазового анализа и энергодисперсионного микронализа показал, что с увеличением температуры расплава с 480°C до 530°C поверхностный слой покрытия состоит из смеси δ + Γ_1 -фаз. Это объясняется тем, что при температуре выше 530°C ζ -фаза не образуется.

Условия эксплуатации крепежных изделий с резьбами

Таблица 5. Свойства цинковых покрытий, полученных при температурах 450°C и 530°C

Table 5. Properties of zinc coatings obtained at temperatures of 450°C and 530°C

Свойство	Горячее цинкование, 450°C	Горячее цинкование, 530°C
Микротвердость поверхности, HV ₂₀	30-36	45-60
Шероховатость, Ra, мкм	0,84	1,2
Коэффициент трения	0,171	0,134
Стандартный электродный потенциал, В	-0,726	-0,630

Исследования показали, что цинковые покрытия, полученные при высокотемпературном горячем цинковании, имеют в 1,5-2 раза большую твердость, что косвенно свидетельствует о более высокой прочности и износостойкости. Также высокотемпературные цинковые покрытия имеют несколько большую шероховатость поверхности, и меньший коэффициент трения по сравнению со стандартным цинковым покрытием, полученным при 450°C, что благоприятно сказывается на моменте затяжки болта. Стандартный электродный потенциал характеризует химическую активность металла при образовании гальванических пар. Более электроотрицательный металл в паре корродирует в первую очередь. Покрытие, образующееся в расплаве при 530°C, более химически устойчиво по сравнению со стандартным цинковым покрытием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что воздействие высокой температуры расплава приводит к снижению твердости стали болтов, однако твердость остается в пределах нормы 152-238 НВ по ГОСТ 1759.4-87.

Показано, что для всех исследуемых сталей при цинковании в интервале 450-560°C наблюдается возрастание толщины покрытия до максимума и затем снижение толщины. Для обеспечения минимальной толщины покрытия 50-70 мкм на сталь с различным содержанием кремния необходимо выдерживать температурный диапазон расплава 530-560°C.

Определено, что с повышением температуры меняется фазовое строение покрытия. Совместный анализ данных рентгенофазового анализа и энергодисперсионного микронализа показал, что с увеличением температуры расплава с 480°C до 530°C поверхностный слой покрытия состоит из смеси δ + Γ_1 -фаз. Фаза ζ в покрытии не обнаруживается. Наплывы цинка во впадинах резьбы отсутствуют.

Сравнительный анализ эксплуатационных свойств показал, что цинковые покрытия, полученные в расплаве при температуре выше 530°C, имеют в 1,5-2 раза большую твердость, несколько большую шероховатость поверхности Ra 1,2 мкм, меньший коэффициент трения 0,134 по сравнению со стандартным цинковым покрытием, полученным при 450°C. Покрытие, образующееся в расплаве при 530°C, имеет стандартный электродный потенциал -0,63 В, что говорит о его большей химической устойчивости по сравнению со стандартным цинковым покрытием.

бай накладывают ряд требований к наносимым покрытиям. Большое значение имеют такие свойства как твердость, шероховатость поверхности, коэффициент трения и стойкость к контактной гальванической коррозии. Сравнительные характеристики данных свойств для покрытий, полученных погружением в расплав температурой 450°C и при 530°C приведены в таблице 5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chung P.P., Wang J., Durandet Y. Deposition processes and properties of coatings on steel fasteners — A review // Friction. 2019. Vol. 7, № 5. P. 389–416. doi: 10.1007/s40544-019-0304-4
2. Сравнительный анализ структуры и электрохимических свойств цинковых покрытий для прогнозирования возникновения контактной коррозии на крепеже / О. С. Бондарева, О. С. Добычина, М. О. Дмитриева, С. В. Коновалов // Черные металлы. 2023. № 10. С. 35-41. doi: 10.17580/chm.2023.10.06.
3. Effect of chemical composition of steel on the structure of hot – Dip galvanized coating / P. Pokorný, J. Kolisko, L. Balík, P. Novák // Metalurgija. 2016. Vol. 55. P. 115–118.
4. Role of silicon on formation and growth of intermetallic phases during rapid Fe–Zn alloying reaction / S.-Ch. Han, D. F. Sanchez, D. Grolimund, S. Uhm, D.-Y. Choi, H.-Ch. Jeong, T.-S. Jun // Mater. Today Adv. 2023. Vol. 18. P. 100368. doi: 10.1016/j.mtadv.2023.100368
5. Reaction kinetics of the formation of intermetallic Fe – Zn during hot - Dip galvanizing of steel / P. Pokorný, J. Kolisko, L. Balík, P. Novák // Metalurgija. 2016. Vol. 55. P. 111–114.
6. Sandelin R.W. Galvanizing characteristic of different types of steel // Wire Wire Prod. 1940. Vol. 15. P. 655–660.
7. The role of silicon in the hot dip galvanizing process / S. Sepper, P. Peetsalu, P. Kulu, M. Saarna, V. Mikli // Proc. Est. Acad. Sci. 2016. Vol. 65, № 2. P. 159. doi: 10.3176/proc.2016.2.11
8. Sánchez C. et al. Silicon Effect and Microstructural Evolution of Hot Dip Galvanized Coating of Structural Steels / Ch. Sánchez, O. Bustos, A. Artigas, H. Bruna // Metals. 2023. Vol. 13, № 11. P. 1892. doi: 10.3390/met13111892
9. Marder A.R., Goodwin F.E. Zn coating phase equilibria // The Metallurgy of Zinc Coated Steels. Elsevier, 2023. P. 35–48.
10. Chidambaram P.R., Rangarajan V., Van Ooij W.J. Characterization of high temperature hot dip galvanized coatings // Surf. Coat. Technol. 1991. Vol. 46, № 3. P. 245–253. doi: 10.1016/0257-8972(91)90167-U
11. Verma A.R.B., Van Ooij W.J. High-temperature batch hot-dip galvanizing. Part 1. General description of coatings formed at 560 °C // Surf. Coat. Technol. 1997. Vol. 89, № 1–2. P. 132–142. doi: 10.1016/S0257-8972(96)02941-6.
12. Verma A.R.B., Van Ooij W.J. High-temperature batch hot-dip galvanizing. Part 2. Comparison of coatings formed in the temperature range 520–555 °C // Surf. Coat. Technol. 1997. Vol. 89, № 1–2. P. 143–150. doi: 10.1016/S0257-8972(96)02940-4
13. The effects of zinc bath temperature on the coating growth behavior of reactive steel / J. Wang, H. Tu, B. Peng, X. Wang, F. Yin, X. Su // Mater. Charact. 2009. Vol. 60,

№ 11. Р. 1276–1279. doi: 10.1016/j.matchar.2009.05.010
14. Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing / P. Bicão, W. Jianhua, S. Xuping, L. Zhi, Y. Fucheng // Surf. Coat. Technol. 2008. Vol. 202, № 9. Р. 1785–1788. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.07.044

15. Бондарева О., Мельников А. Влияние температуры цинкового расплава на толщину и структуру покрытия при высокотемпературном горячем цинковании сталей с высоким содержанием кремния // Известия Вузов Порошковая Металлургия И Функциональные Покрытия. 2015. № 1. Р. 66–70. doi: 10.17073/1997-308X-2015-1-66-70

16. Tzimas E., Papadimitriou G. Cracking mechanisms in high temperature hot-dip galvanized coatings // Surf. Coat. Technol. 2001. Vol. 145, № 1–3. Р. 176–185. doi: 10.1016/S0257-8972(01)01323-8

17. The Influence of Hot-Dip Galvanizing on the Mechanical Properties of High-Strength Steels / M. Šmak, J. Kubíček, J. Kala, K. Podaný, J. Vanerek // Materials. 2021. Vol. 14, № 18. Р. 5219. doi: 10.3390/ma14185219

18. Prediction of Mechanical Properties for High Strength Low Alloyed Steels in a Commercial Hot Dip Galva-

nizing Line without Soaking Section / Á. García-Martino, C. García, M. Prieto and J. Díaz // Metals. 2020. Vol. 10, № 5. Р. 561. doi: 10.3390/met10050561

Информация об авторах

О. С. Бондарева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии металлов и авиационного материаловедения» Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Information about the authors

O.S. Bondareva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Metal Technologies and Aviation Materials Science», Samara National Research University named after Academician S.P Koroleva.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 12 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 678.073
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.032

EDN: XJHSLF

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ЕГО КОМПОЗИТА В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

Ольга Владимировна Гоголева ¹, Павлина Николаевна Петрова ²,
Андрей Леонидович Федоров ³

^{1, 2, 3} Федеральный исследовательский центр "Якутский научный центр СО РАН", обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677007, г. Якутск, Россия

¹ oli-gogoleva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5425-2295>

² ppavolina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>

³ gelvibr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>

Аннотация. В данной статье приведены результаты исследования свойств образцов СВМПЭ (сверхвысокомолекулярного полиэтилена), композитов с углеродными волокнами и композитов с УВ, модифицированных стабилизатором СО-4, дополненные данными натурного экспонирования до 18 месяцев на открытом стенде полигона климатических испытаний «Якутск».

Выявлено, что у стабилизированных полимерных композиционных материалов (ПКМ) значения степеней кристалличности практически остаются неизменными. По данным ИК-исследований процесс образования винильных групп происходит как на поверхности, так и в подповерхностных слоях композита на глубину до 200 мкм, не затрагивая основной объем полимерной матрицы.

В процессе трения экспонированных образцов СВМПЭ и стабилизированного ПКМ в первую очередь изнашивается деградированный (состаренный) поверхностный слой, причем степень износа зависит от глубины фотохимической деструкции.

Установлено, что добавление стабилизатора марки СО-4 в количестве 0,5 мас. % к композиту СВМПЭ-УВ замедляет процессы старения на открытом воздухе. Это, в свою очередь, положительно сказывается на физико-механических характеристиках и износостойкости материала на протяжении длительного времени при воздействии неблагоприятных климатических условий Якутии.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, стабилизатор, атмосферостойкость, деградированный слой, деструкция, натурная экспозиция.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Гоголева О. В., Петрова П. Н., Федоров А. Л. Исследование изменения свойств и структуры сверхвысокомолекулярного полистилена и его композита в процессе натурной экспозиции в условиях Якутии // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 207–213. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.032. EDN: <https://elibrary.ru/XJHSLF>.

Original article

INVESTIGATION OF CHANGES IN PROPERTIES AND STRUCTURE OF ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE AND ITS COMPOSITE DURING FULL-SCALE EXPOSURE IN YAKUTIA

Olga V. Gogoleva ¹, Pavlina N. Petrova ², Andrey L. Fedorov ³

^{1, 2, 3, 4} Federal Research Center "Yakutsk Scientific Center SB RAS", a separate division of the Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 677007, Yakutsk, Russia

¹ oli-gogoleva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5425-2295>

² ppavolina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>

³ gelvibr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>

Abstract. This article presents the results of a study of the properties of UHMWPE samples, carbon fiber composites and HC composites modified with a CO-4 stabilizer, supplemented with data from full-scale exposure for up to 18 months at the open stand of the Yakutsk climatic testing range.

© Гоголева О. В., Петрова П. Н., Федоров А. Л., 2025

It was found that the crystallinity degrees of stabilized polymer composite materials (PCM) remain virtually unchanged. According to IR studies, the formation of vinyl groups occurs both on the surface and in the subsurface layers of the composite to a depth of 200 μm , without affecting the bulk of the polymer matrix.

During friction of exposed UHMWPE and stabilized PCM samples, the degraded (aged) surface layer wears out first, with the degree of wear depending on the depth of photochemical destruction.

It was found that adding 0.5 wt. % of the CO-4 stabilizer % to the UHMWPE-UV composite slows down the aging process in the open air. This, in turn, has a positive effect on the physical and mechanical characteristics and wear resistance of the material over a long period of time when exposed to the unfavorable climatic conditions of Yakutia.

Keywords: ultrahigh molecular weight polyethylene, stabilizer, weather resistance, degraded layer, destruction, full-scale exposure.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 122011100162-9 using scientific equipment of the Center for Collective Use of the FRC Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Gogoleva, O. V., Petrova, P. N. & Fedorov, A. L. (2025). Investigation of changes in properties and structure of ultra-high molecular weight polyethylene and its composite during full-scale exposure in Yakutia Polzunovskiy vestnik, (2), 207-213. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.032. EDN: <https://elibrary.ru/XJHSLF>.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы на основе СВМПЭ широко применяются в различных отраслях благодаря таким характеристикам, как малая плотность, износостойкость, устойчивость к обледенению, гидрофобность, химическая стойкость и ударопрочность. Композиционные материалы на основе СВМПЭ применяются для облицовки бункеров, кузовов самосвалов, вагонов и конструкций в горнорудной промышленности, в деталях и элементах конструкций, подверженных ударной нагрузке или истиранию в машиностроении. Применяют также в фильтрах для работы в агрессивных средах в пищевой и химической промышленности, в тонкослойных анткоррозионных покрытиях металлических контейнеров и изделий, в морозостойких композиционных материалах для уплотнительных резинотехнических изделий [1–5].

Для успешного применения композиционных материалов на основе СВМПЭ в качестве футеровки, защитных покрытий необходимо изучение не только механических и триботехнических показателей, также следует изучить их атмосферостойкость в регионе возможного применения. Ранее проведенные исследования атмосферостойкости СВМПЭ и композитов на его основе с углеродными волокнами (УВ) марки Белум показали, что при натурной экспозиции в условиях г. Якутска под действием света, кислорода, влажности, перепада температур они подвергаются в основном световому старению, приводящем к фотохимической деструкции полимерных цепей или их нежелательному, неконтролируемому сшиванию, в результате чего в течение 3–6 месяцев они становятся хрупкими и жесткими. Показано, что у образцов СВМПЭ на 135 день экспонирования зарегистрирован резкий спад эластичности, происходит хрупкое разрушение образца. Резкий спад относительного удлинения у нестабилизированного композита зарегистрирован на 105 день экспонирования. Установлено, что относительное удлинение при разрыве композита, дополнительно модифицированного 0,5 мас. % стабилизатора СО-4, после 15 дней экспонирования увеличивается на 10 % и далее это значение сохраняется в течение 9 месяцев [6].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве полимерной матрицы был выбран СВМПЭ марки Gur-4150 (Celanese, Китай). В качестве армирующего наполнителя использованы дискретные углеродные волокна (УВ) марки «Белум» (ОАО «Светлогорск Химволокно», Беларусь). В качестве противостарителя был выбран стабилизатор марки СО-4 (НИОХ СО РАН, Россия).

208

Переработка сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полимерных композиционных материалов на его основе проводилась с использованием технологии компрессионного спекания при режиме: давление 10 МПа, температура 180 °C, время выдержки 20 мин.

Предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве определяли по ГОСТ 11262-2017 на испытательной машине «UTS-20K». Скорость массового изнашивания оценивали по потере массы образцов в единицу времени на машине трения ИИ-5018 по схеме «палец-диск» при нагрузке 200 Н, линейной скорости скольжения 0,5 м/с и времени испытания 3 ч. ИК-спектры образцов регистрировали на спектрометре Varian FTIR 7000 Spectrometr в области частот 400-4000 cm^{-1} с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения. Идентификацию и анализ ИК-спектров осуществляли по известным методикам с использованием библиотеки спектрометра и данных по ИК-спектрам полимеров.

Образцы после определенных периодов экспонирования исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе NETZSCH DSC 204 HP Phoenix. Образцами служили вырезанные из экспонированных образцов, параллелепипеды, размерами примерно 3,5x3,5x1,5 мм, массой 20 ± 1 мг. В качестве тиглей использовали алюминиевые тигли с крышками. Нагрев осуществлялся со скоростью 20°/мин, при постоянной продувке измерительной ячейки калориметра газообразным азотом со скоростью потока 30 мл/мин. Перед измерением образцов была проведена высокоточная (расширенная) калибровка прибора по температуре и теплоте, при вышеперечисленных условиях испытаний с использованием эталонов (индий, олово, цинк, висмут), которая обеспечивает достижение точности по температуре лучше, чем $\pm0,3$ К, по теплоте лучше, чем $\pm0,5\%$, согласно ГОСТ 55134-2012.

Исследование изменения основных свойств композитов при естественном старении в климатических условиях г. Якутска проводили по ГОСТ 9.708-83. Экспонирование выполнялось на открытой площадке испытательного полигона Института проблем нефти и газа СО РАН.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной статье приведены результаты исследования свойств образцов СВМПЭ, композитов с углеродными волокнами и композитов с УВ, модифицированных стабилизатором СО-4, дополненные данными экспонирования до 18 месяцев на открытом стенде полигона климатических испытаний «Якутск». На рисунках 1 и 2 приведены зависимости относительного

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ЕГО КОМПОЗИТА В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

удлинения при разрыве и прочности при растяжении образцов в зависимости от времени экспонирования.

Стабилизация ПКМ противостарителем марки СО-4 приводит к сохранению деформационно-прочностных показателей до 14 мес. экспонирования в отличие от исходных образцов СВМПЭ и ПКМ, однако относительное удлинение при разрыве стабилизированного ПКМ начинает монотонно снижаться, начиная с 14 месяца экспонирования (рисунок 1), а прочность при растяжении начинает снижаться с 13 месяца (рисунок 2).

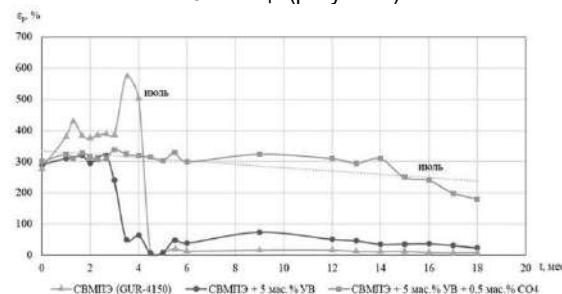


Рисунок 1 – Зависимость относительного удлинения при разрыве образцов от времени экспонирования

Figure 1 – Dependence of relative elongation at break of samples on exposure time

На 18 месяц экспонирования значение относительного удлинения при разрыве и прочности при растяжении стабилизированного ПКМ составляет 180 % и

22,2 МПа соответственно. Это, вероятно, можно объяснить с расходованием стабилизатора на ингибиование радикально-окислительных реакций, протекающих под воздействием кислорода воздуха в начальный период экспонирования образцов.

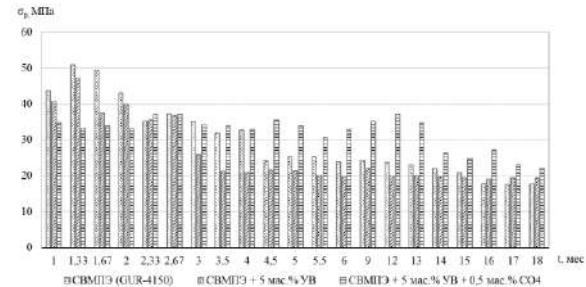


Рисунок 2 – Зависимость прочности при растяжении образцов от времени экспонирования

Figure 2 – Tensile strength of samples as a function of exposure time

Основное влияние на свойства оказывают реакции, приводящие к изменению молекулярной массы и молекулярно-массового распределения полимеров за счет протекания реакций обрыва цепи и сшивания. Эти изменения приводят к значительному увеличению плотности аморфных областей, что отражается на изменении степени кристалличности [7] и соответственно на их деформационно-прочностные характеристики. В связи с этим, исследованы термодинамические характеристики образцов (таблица 1).

Таблица 1 – Термодинамические характеристики образцов / Table 1 – Thermodynamic characteristics of samples

	α, %	T начала плавления, °C	T пика плавления, °C	T конца плавления, °C	ΔH, Дж/г
СВМПЭ исх	52,04	127,5	150,6	160,9	152,5
СВМПЭ 15 мес	62,89	127,2	184,3	161,3	184,3
СВМПЭ 18 мес	72,93	127,1	153,0	163,5	213,7
ПКМ исх	50,05	126,7	141,5	152,0	146,6
ПКМ 15 мес	56,76	123,5	149,5	158,0	166,3
ПКМ 18 мес	57,32	125,4	150,7	159,4	167,9
ПКМ + СО-4 исх	42,02	123,7	142,1	152,9	123,1
ПКМ + СО-4 15 мес	46,68	124,2	146,6	157,5	136,8
ПКМ + СО-4 18 мес	42,02	123,9	145,3	157,6	144,4

Известно, что степень кристалличности, определенная методом ДСК, учитывает тепловые процессы, происходящие при переходе кристаллической фазы в аморфную. При этом энталпия плавления характеризует количество энергии, затрачиваемое на этот процесс. Показано, что при старении материалов резко возрастает степень кристалличности. Повышение степени кристалличности СВМПЭ связано с тем, что в результате разрыва макромолекул при окислении процесс кристаллизации облегчается. Это приводит к вторичной кристаллизации полимерной матрицы, прежде всего в аморфной части, характеризующейся наименее плотной упаковкой, как это показано в работах [8, 9]. Повышение значений энталпии плавления экспонированных образцов свидетельствует, что в результате вторичной кристаллизации формируются большие по размеру структурные элементы.

У стабилизированных ПКМ значения степеней кристалличности практически не меняются, что связано с тем, что противостаритель ингибитирует процессы окисления, в результате чего аморфная фаза практически не претерпевает изменений.

Известно, что световое старение является радикально-цепным процессом и, в силу малой проникающей способности УФ-излучения, окислительная деструкция протекает преимущественно на поверхностных слоях полимера [10]. В связи с этим, с целью обнаружения деградированного слоя исследованы поверхности образцов (рис. 3) после 18 месяцев экспонирования.

После 18 месяцев экспонирования на образцах СВМПЭ и ПКМ обнаружен поврежденный (деградированный) слой. У образцов СВМПЭ глубина деградированного слоя составляет ~500 мкм, у ПКМ ~600 мкм, соответственно. В случае стабилизированного ПКМ поврежденный слой визуально не обнаружен.

Для более детального изучения механизма старения и деградации были проведены ИК-спектроскопические исследования образцов стабилизированного ПКМ, экспонированных в течение 18 месяцев по глубине (рис. 4). Получены спектры образцов на следующих глубинах: 0, 20, 90, 130, 200, 410, 750, 1020 мкм. На ИК-спектрах поверхности образцов независимо от исследованной глубины зарегистрированы полосы поглощения в областях 2914, 2846, 1472, 1462, 729, 719 cm^{-1} , относящиеся к $-\text{CH}_2-$ группам, характерных для СВМПЭ [11].

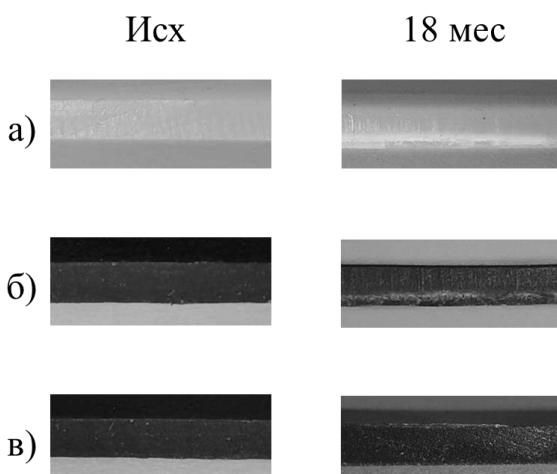


Рисунок 3 – Микрофотографии срезов экспонированных образцов: а) СВМПЭ; б) ПКМ; в) стабилизированного ПКМ

Figure 3 – Microphotographs of sections of exposed samples: a) UHMWPE; b) PCM; c) stabilized PCM

На глубинах исследованных слоев стабилизированного ПКМ в интервале 0–200 мкм зарегистрированы

появление новых пиков в области 909 см^{-1} и 1712 см^{-1} характерных для винильной и карбонильной групп соответственно. В работе авторов [12] показано, что образование карбонильных групп вследствие облучения напрямую связано с деструкцией макромолекул полиэтилена. Количество определение продуктов деструкции СВМПЭ, а именно карбонильных и винильных групп производили с использованием следующих соотношений [13]:

$$I_{\text{карбонил}} = A_{1712}/A_{1368} \quad (1.1)$$

$$I_{\text{винил}} = A_{911}/A_{1368} \quad (1.2),$$

где A_{1712} – оптическая плотность пика при 1712 см^{-1} , соответствующего валентным колебаниям карбонильной группы в кетонах; A_{911} – оптическая плотность пика при 911 см^{-1} , соответствующего неплоским деформационным колебаниям С-Н в концевой винильной группе; A_{1368} – оптическая плотность пика при 1368 см^{-1} , который соответствует деформационным колебаниям метильных групп, связанных с третичным атомом углерода.

Пик при 1368 см^{-1} использован в качестве “внутреннего стандарта” для нормализации спектров, т.к. его интенсивность мало зависит от различных факторов, т.е. даже при протекании процессов деструкции, остается практически постоянной.

В таблице 2 приведены значения этих индексов в зависимости от глубины исследованного слоя ПКМ, рассчитанные по формулам 1.1 и 1.2.

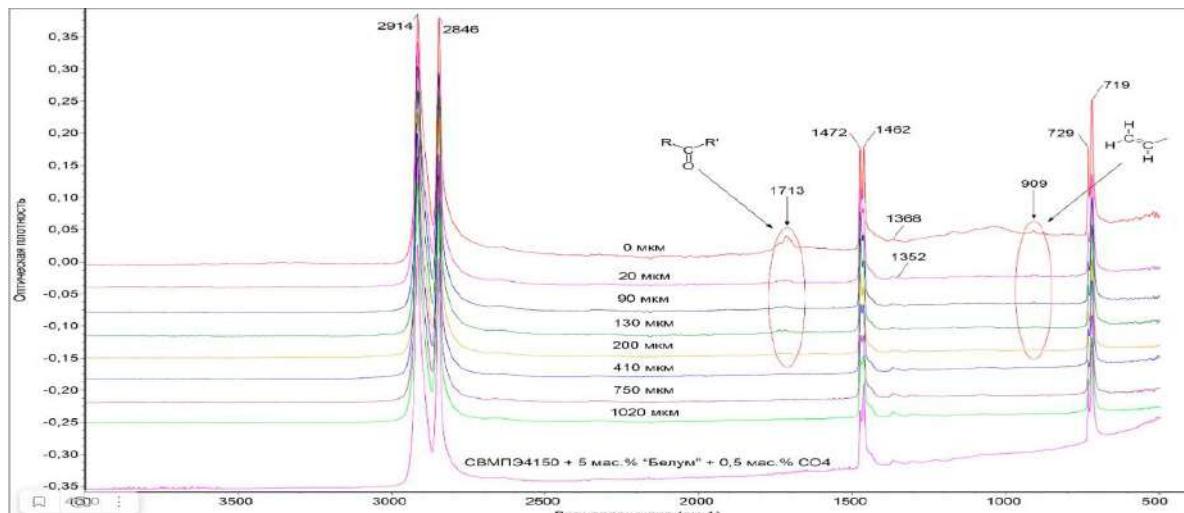


Рисунок 4 – ИК-спектры поверхности стабилизированного ПКМ в зависимости от глубины исследованного слоя

Figure 4 – IR spectra of the surface of stabilized PCM depending on the depth of the studied layer

Таблица 2 – Винильные и карбонильные индексы образцов стабилизированного ПКМ после натурного экспонирования в течение 18 месяцев

Table 2 – Vinyl and carbonyl indices of stabilized PCM samples after natural exposure for 18 months

Глубина поврежденного слоя, мкм	Винильный индекс ($I_{\text{винил}}$)	Карбонильный индекс ($I_{\text{карбонил}}$)
0	3,32	46,74
20	0,65	7,79
90	0,79	9,10
130	0,46	8,90
200	0,40	4,58
410	–	1,85
750	–	1,10
1020	–	0,86
СВМПЭ + 5 мас. % УВ + 0,5 мас. % CO-4 (контрольный)	–	–

Протекание фотохимической деструкции сопровождается на начальном этапе окислением – образо-

ванием карбонильных групп, в свою очередь, карбонильные группы образуют винильные группы. Установ-

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ЕГО КОМПОЗИТА В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

лено, что наибольшие значения винильного и карбонильного индексов зарегистрированы непосредственно на поверхности поврежденного слоя образца. По мере углубления в объем материала значения обоих индексов уменьшаются. На основании результатов ИК-исследований установлено, что процессы образования винильных групп протекают на поверхностном и подповерхностных слоях стабилизированного композита глубиной до 200 мкм, и не затрагивают основной объем полимерной матрицы. Карбонильные группы обнаружены вплоть до глубины 1020 мкм, однако, это может быть связано не только с термоокислительными процессами при атмосферном старении, но и с процессами термомеханической деструкции на

стадии переработки полимера [14].

В работе [15] нами было показано, что протекание окислительных процессов СВМПЭ зарегистрировано вплоть до глубины 600 мкм. Таким образом, выявлено, что дополнительное модифицирование ПКМ стабилизатором приводит к ингибированию окислительных процессов.

Проведены триботехнические испытания экспонированных образцов СВМПЭ и стабилизированного ПКМ (рисунок 5). Испытания проводили на машине трения ИИ-5018 при нагрузке 200 Н и скорости скольжения контроллера 0,5 м/с. Образцы были выставлены в марте 2021 г, этапы выемки – 1, 3, 6, 12, 18 мес.

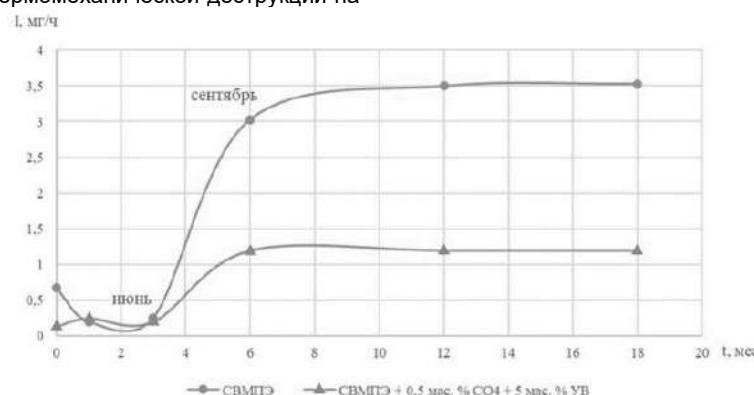


Рисунок 5 – Скорость массового изнашивания образцов

Figure 5 – Mass wear rate of samples

Показано, что у образцов СВМПЭ, экспонированных в течение 1 мес., износостойкость выше по сравнению с контрольными образцами. Это, видимо, связано с повышением деформационно-прочностных показателей образцов при экспонировании в течении 1 месяца на открытом стенде полигона. Увеличение времени экспонирования до 6 месяцев приводит к существенному снижению износостойкости СВМПЭ до 5,2 раз, далее скорость массового изнашивания образцов в зависимости от времени экспонирования начинает снижаться, и начиная с 12 до 18 месяцев экспонирования у образцов скорости массового изнашивания находятся на одном уровне. Это связано с тем, что в процессе трения сначала происходит интенсивный износ состаренного слоя образца, после достижения основного слоя материала скорость изнашивания начинает тормозиться [16].

Износостойкость стабилизированного ПКМ выше в 2,5–3 раза, при этом характер изменения скорости массового изнашивания от времени экспонирования аналогичен для СВМПЭ.

Для объяснения подобного изменения свойств проведены ИК-исследования поверхностей исходных (контрольных) и экспонированных образцов до и после трения. На рисунке 6 приведены ИК-спектры поверхности образцов, экспонированных 1 месяц.

Установлено, что ИК-спектры поверхностей контрольных и экспонированных образцов до трения практически не отличаются, т.е. при экспонировании в течение 1 месяца окислительно-деструктивные процессы не протекают. Появление пика в области 876 cm^{-1} на поверхности экспонированных образцов СВМПЭ связано с протеканием химических реакций между кислородсодержащими группами и кальцитом, содержащимся в уличной

пыли.

На ИК-спектрах поверхностей всех образцов после трения появляются пики в областях $\sim 1713\text{ cm}^{-1}$, 1586 cm^{-1} , 1367 cm^{-1} , 1170 cm^{-1} , соответствующие валентным колебаниям карбонильных, карбоксильных и гидроксильных групп, свидетельствующие о протекании трибохимических процессов в результате трибонаружения. Процессы трибоокисления полимерной матрицы способствуют образованию устойчивой пленки переноса, что благоприятно оказывается на триботехнических свойствах композитов [17].

На рисунке 7 приведены ИК-спектры поверхности образцов, экспонированных 18 месяцев, до и после трения.

На поверхностях образцов до трения зарегистрировано появление пиков карбонильной группы в разных ее проявлениях, более интенсивных, чем после трения ($1712\text{-}1719\text{ cm}^{-1}$). При этом интенсивность пика в области 1712 cm^{-1} на поверхности образцов после трения снижается, что связано с износом состаренного слоя, и с образованием вновь окисленных фрагментов в процессе трения [18–20]. О протекании светового старения (фотохимической деструкции) свидетельствует наличие винильной группы на поверхности образца ($907\text{-}910\text{ cm}^{-1}$). Пики в областях 875 cm^{-1} и 1032 cm^{-1} , зарегистрированные на образцах до трения, относятся к колебаниям кальцита и алюмосиликата (бентонит), что указывает на наличие на поверхности образцов уличной пыли [21, 22].

Таким образом, выявлено, что в процессе трения экспонированных образцов СВМПЭ и стабилизированного ПКМ в первую очередь изнашивается деградированный (состаренный) поверхностный слой, массовый износ зависит от глубины протекания фотохимической деструкции.

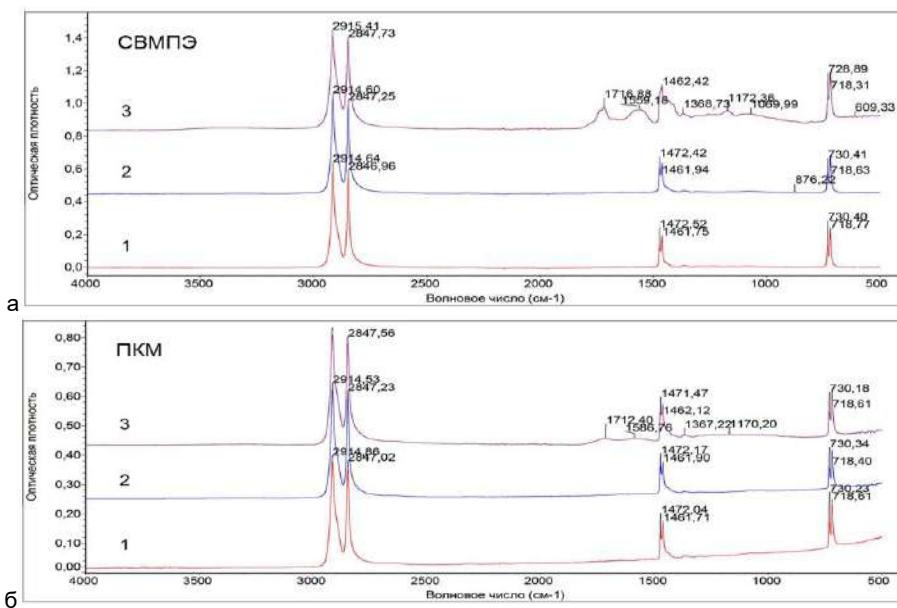


Рисунок 6 – ИК-спектры образцов СВМПЭ (а) и стабилизированного ПКМ (б), экспонированных 1 месяц: 1 – исходный неэкспонированный (контрольный); 2 – до трения; 3 – после трения

Figure 6 – IR spectra of UHMWPE samples (a) and stabilized PCM (b), exposed for 1 month: 1 – initial unexposed (control); 2 – before friction; 3 – after friction

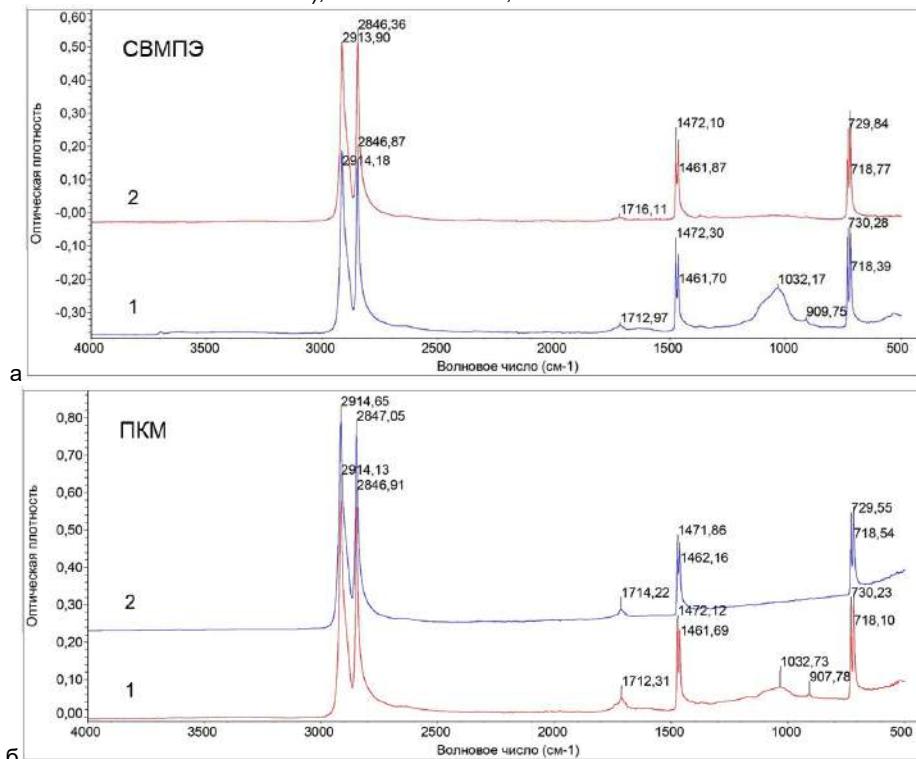


Рисунок 7 – ИК-спектры образцов СВМПЭ (а) и стабилизированного ПКМ (б), экспонированных 18 месяцев: 1 – до трения; 2 – после трения

Figure 7 – IR spectra of UHMWPE samples (a) and stabilized PCM (b), exposed for 18 months: 1 – before friction; 2 – after friction

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено, что у стабилизированных ПКМ значения степеней кристалличности практически не меняется, что связано с тем, что противостаритель ингибирует процессы окислительной деструкции, в результате чего аморфная фаза практически не претерпевает изменений.

На основании результатов ИК-исследований

установлено, что процессы образования винильных групп протекают на поверхностном и подповерхностных слоях композита глубиной до 200 мкм, и не затрагивают основной объем полимерной матрицы.

Установлено, что в процессе трения экспонированных образцов СВМПЭ и стабилизированного ПКМ в

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ЕГО КОМПОЗИТА В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

первую очередь изнашивается деградированный (состаренный) поверхностный слой, массовый износ зависит от глубины протекания фотохимической деструкции.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что дополнительная модификация композита СВМПЭ-УВ стабилизатором марки СО-4 в количестве 0,5 мас. % приводит к замедлению процессов старения композита на открытом воздухе, что положительно сказывается на сохранении физико-механических показателей и износостойкости длительное время в условиях воздействия неблагоприятных климатических факторов Якутии. Однако климатическая стойкость стабилизированного ПКМ после экспонирования в течение 14 месяцев начинает снижаться, что вызывает необходимость корректировки состава композита для обеспечения долгосрочного действия стабилизирующей добавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) market size, share & trends analysis report by product (medical grade & prosthetics, fibers, sheet, r), by application, and segment forecasts, 2019–2025 // Grand View Research, Inc. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/ultra-high-molecular-weight-polyethylene-market> (дата обращения: 11.11.2019).
2. Влияние технологического режима смешения и вулканизующей системы на свойства композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука и сверхвысокомолекулярного полиэтилена / Н.В. Шадринов [и др.]. // Перспективные материалы. 2023. № 2. С. 32–37.
3. Валуева М.И., Колобков А.С., Малаховский С.С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). С. 49–57.
4. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 1) // Полимерные материалы. 2003. № 3. С. 18–21.
5. Модифицированные полимерные и композиционные материалы для северных условий / Аммосова О.А., Аргунова А.Г., Ботвин Г.В. и др.: отв. ред. С.Н. Попов; Рос. акад. наук. Сиб. отд.-ние, Ин-т проблем нефти и газа. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 218 с.
6. Колесова Е.С., Гоголева О.В., Петрова П.Н. Разработка ПКМ на основе СВМПЭ с высокой стабильностью свойств в условиях резко-континентального климата // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 4. С. 122–131.
7. Далинкевич А.А. Кинетика окислительного старения и модификации полиолефинов при воздействии излучений: дис. ... докт. хим. наук: 02.00.06: защищена 18.06.1998: утв. 02.06.1998 / Далинкевич Андрей Александрович. М: Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской Академии Наук. 1998. 405 с.
8. Rodriguez A.K., Mansoor B., Ayoub G., Colin X., Benzerga A.A. Effect of UV-aging on the mechanical and fracture behavior of low density polyethylene // Polymer Degradation and Stability. 2020. Vol. 180. P.109185.
9. Yusuke H., Takumitsu K., Kento T., Toshio I., Kohhei N. // Polymer Degradation and Stability. 2018. Vol.150. P. 67–72.
10. Fontanella S., Bonhomme S., Koutnyc M. et al. Comparison of the biodegradability of various polyethylene films containing pro-oxidant // Polymer Degradation and Stability. 2010. Vol. 95, No 6. P. 1011–1021.
11. Тарасевич Б.Н. ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М.:
- Химический факультет МГУ, 2012. 54 с.
12. Fu Y., Lim L.T. Investigation of multiple-component diffusion through LLDPE film using an FTIR-ATR technique // Polymer Testing. 2008. Vol. 31. P. 56–67.
13. Hsu Yu-Ch., Weir M.P., Truss R.W., et al. A fundamental study on photo-oxidative degradation of linear low density polyethylene films at embrittlement // Polymer. 2012. Vol. 53, No 12. P. 2385– 2393.
14. Смирнова А.И., Осовская И.И. Функциональные материалы в производстве пластмасс: Антиоксиданты: учебное пособие. СПб: СПбГТУРП, 2015. 31 с.
15. Изучение влияния климатических факторов Якутии на структуру и свойства СВМПЭ и ПКМ на его основе / Е.С. Колесова [и др.]. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 6. С. 2–9.
16. Копнов В.А. Оптимальное управление процессами деградации элементов механических систем. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2017. 305 с.
17. Природа первичных актов фрикционного взаимодействия СВМПЭ с поверхностью стали / А.П. Краснов [и др.]. // Трение и износ. 2013. № 2 (34). С. 154–164.
18. Трение и свойства СВМПЭ, обработанного сверхкритическим диоксидом углерода / А.П. Краснов [и др.]. // Трение и износ. 2003. № 4 (24). С. 429–435.
19. Влияниеnanoструктурных наполнителей на структуру и свойства газопламенных покрытий на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена / Панин С.В. [и др.]. // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. С. 141–144.
20. Rocha M., Mansur A., Mansur H. Characterization and accelerated ageing of UHMWPE used in orthopedic prosthesis by peroxide // Materials. 2009. No 2. P. 562–576.
21. Jovanovski G., Stefov V., Šoptrajanov B., Boev B. Minerals from Macedonia. IV. Discrimination between some carbonate minerals by FTIR spectroscopy. // Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen. 2002. Vol. 177. P. 241–253.
22. Masindi V., Gitari M. W., Tutu H., DeBeer M. Efficiency of ball milled South African bentonite clay for remediation of acid mine drainage // Journal of Water Process Engineering. 2015. Vol. 8. P. 227–240.

Информация об авторах

О. В. Гоголева – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН.

П. Н. Петрова – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН.

А. Л. Федоров – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН.

Information about the authors

O. V. Gogoleva, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

P. N. Petrova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

A. L. Fedorov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

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

Статья поступила в редакцию 31 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принятая к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 31 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



ПЛЕОХРОИЗМ БЕСЦВЕТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Владислав Юрьевич Верещагин¹, Александра Юрьевна Погиба²,
Александр Петрович Кондратов³

^{1, 2, 3} Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹ slavaver@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1344-4888>

² pogiba.a@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6550-2892>

³ apkrezerv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Аннотация. Исследуются оптические характеристики светоотражающих поверхностей, двойное лучепреломление и эффект плеохроизма в многослойных покрытиях металлической, стеклянной и пластиковой упаковки, изготовленной из двуосно-ориентированного изотактического полипропилена (ДОПП) отечественного производства. Двойное лучепреломление, порождающее эффект плеохроизма в пленках ДОПП, обуславливает изменение цвета отраженного света при условии поляризации света. Поляризованный свет появляется в результате отражения от зеркальной поверхности естественного или искусственного освещения. Доля поляризованного излучения в отраженном потоке света зависит от угла его падения на объект и свойств зеркальный диэлектрической поверхности. Предложено использовать цветные эффекты в полимерных пленках для создания привлекательного вида упаковки и её защитной маркировки. Защита упаковки товаров от фальсификации является важной социальной и экономической проблемой современного общества. Защитная маркировка в сочетании с кодированием информации обеспечивает безопасность потребителя товаров химической промышленности и едкой бытовой химии, и получение дохода производителями высокотехнологичной и наукоемкой продукции. Кодирование и возможность гарантированного распознавания защитной информации на прозрачной полимерной упаковке зависит от контраста и цветового различия структурных элементов штрихового кода или товарного знака. В статье приведены результаты инструментальных измерений и количественных оценок отраженного излучения. Установлено оптимальное количество слоёв прозрачной полимерной пленки для достижения необходимого контраста защитной маркировки. Необходимые результаты достигаются с использованием пленок крупнотоннажных полимеров, производимых отечественной химической промышленностью и широко применяемых в упаковке товаров.

Ключевые слова: Маркировка товаров химической промышленности, упаковка бытовой химии, полимерные покрытия, полипропилен, анизотропия, плеохроизм, двойное лучепреломление, координаты цвета, светлопла, отражение света

Благодарности: Настоящее исследование проведено при финансовой поддержке Московского Политехнического Университета в рамках гранта имени В.Е. Фортова.

Для цитирования: Верещагин В. Ю., Погиба А. Ю., Кондратов А. П. Плеохроизм бесцветных полимерных покрытий на светоотражающей поверхности // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 214–219. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.033. EDN: <https://elibrary.ru/MSPEYR>.

Original article

PLEOCHROISM OF COLORLESS POLYMER COATINGS ON A REFLECTIVE SURFACE

Vladislav Yu. Vereshchagin¹, Alexandra Yu. Pogiba², Alexander P. Kondratov³

^{1, 2, 3} Moscow Polytechnic University

¹ slavaver@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1344-4888>

² pogiba.a@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6550-2892>

³ apkrezerv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Abstract. The optical characteristics of reflective surfaces, double refraction and pleochroism effect in multilayer coatings of metal, glass and plastic packaging made of biaxially oriented isotactic polypropylene (BOPP) of domestic production are investigated. The double-ray refraction generating pleochroism effect in BOPP films causes the color change of reflected light under the condition of light polarization. Polarized light appears because of reflection from a mirror surface of natural or artificial illumination. The share of polarized radiation in the reflected light flux depends on the

ПЛЕОХРОИЗМ БЕСЦВЕТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

angle of its incidence on the object and the properties of the mirror dielectric surface. It is proposed to use color effects in polymer films to create an attractive appearance of packaging and its protective marking. Protection of goods packaging from adulteration is an important social and economic problem of modern society. Protective labeling in combination with information coding provides consumer safety of goods of chemical industry and caustic household chemicals, in particular income generation by manufacturers of high-tech and knowledge-intensive products. Coding and the possibility of guaranteed recognition of protective information on transparent polymer packaging depends on the contrast and color difference of structural elements of the bar code or trademark. The paper presents the results of instrumental measurements and quantitative estimates of reflected radiation. The optimal number of layers of transparent polymer film to achieve the necessary contrast of protective marking is established. The necessary results are achieved using films of large-tonnage polymers produced by the domestic chemical industry and widely used in the packaging of goods.

Keywords: Chemical labeling, packaging of household chemicals, polymer coatings, polypropylene, anisotropy, pleochroism, double refraction, color coordinates, lightness, light reflection

Acknowledgements: This work was financially supported by the Moscow Polytechnic University within the framework of the grant named after Vladimir Fortov.

For citation: Vereshchagin, V. Yu., Pogiba, A. Yu. & Kondratov, A. P. (2025). Pleochroism of colorless polymer coatings on a reflective surface. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 214-219. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.033. EDN: <https://elibrary.ru/MSPEYR>.

ВВЕДЕНИЕ

Маркировка и защита упаковки товаров от фальсификации является важной социальной и экономической проблемой современного общества. Защитная маркировка промышленных товаров в сочетании с кодированием информации обеспечивает безопасность потребителя и сохранение прибыли производителям брендов - уникальной, высокотехнологичной и наукоемкой продукции. Многоцветные отражающие свет оптические метки на изделиях легко обнаруживаются невооруженным глазом и, по мнению экспертного сообщества, являются наиболее привлекательными для быстрой и надежной идентификации упакованного продукта или изделия [1].

С помощью скрытого знака на изделии или упаковке, который может иметь вид яркой и многоцветной пиктограммы, логотипа, товарного знака, фигуры, графического символа или цифры [2] существенно повышается эффективность борьбы с контрафактным производством и защита от подделки.

Технология маркировки изделий на металлических поверхностях и инструментальной идентификации широко применяется в разных отраслях промышленности. Например, в автомобильной промышленности метки используются для мониторинга деталей и компонентов по всей сборочной линии, что улучшает контроль материальных запасов и облегчает профилактическое обслуживание. Аналогичным образом, в логистике и управлении цепочками поставок метки прикрепляются к товарам, хранящимся в металлических контейнерах, обеспечивая точное управление запасами на этапах транспортировки и хранения [3, 4].

Получить цветные изображения на упаковке или полимерном покрытии изделия без применения пигментов и красителей можно при использовании интерференции при толщине пленки менее длины цуга волн или двойного лучепреломления поляризованного света, образующегося при отражении и распространении в диэлектрических слабо поглощающих (прозрачных) структурах. Интерференция света обуславливает т.н. структурные цвета, распространенные в природе и замечаемые, например, на крыльях и телах насекомых. Структурный цвет является следствием многократных преломлений и отражений солнечного света от многослойных рельефных поверхностей тонких пленок из природных органических полимерных материалов [5, 6]. Изучению, моделированию и воспроизведению структурных цветов с по-

мощью синтетических органических полимерных материалов посвящено множество экспериментальных исследований [7-9].

Цель настоящего исследования обоснование возможности использования пленок двусосторонне-ориентированного изотактического полипропилена для информационной и защитной маркировки товаров массового потребления и продуктов химической промышленности в упаковке (таре) из стекла, металла или пластмасс с зеркальной поверхностью.

МЕТОДЫ

Цветовые координаты CIELAB для оценки окраски пленки получены с помощью фотографирования и обработки цифровых фотографий. Экспериментальная установка состояла из светового короба, держателя объекта, цифровой камеры Canon EOS 500D (рис. 1). Камера настроена на сохранение изображений в формате RAW.

Лентообразные образцы пленок полипропилена в форме стопы Столетова фотографировали через пленочный поляризатор, располагаемый поверх пакета пленок в двух перпендикулярных направлениях оси поляризации света - в закрытом или открытом положении [10]. Фотокамеру установили с возможностью изменения угла обзора и фотографирования цветовых эффектов, возникающих при отражении дневного света от зеркал в различных направлениях.

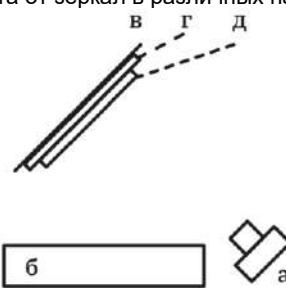


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: а – фотокамера, б – световой короб, в – отражающая поверхность, г – образцы пленок полипропилена, д – пленочный поляризатор

Figure 1 – Experimental setup diagram: a – camera, b – light box, c – reflective surface, d – polypropylene film samples, e – film polarizer

Стабильная цветопередача во всем наборе данных обеспечена калибровкой цвета с использованием

стандартизированной мишенью X- Rite ColorChecker Passport, которая фотографировалась в начале каждого сеанса фотографирования. Объекты для съемки представляли собой полимерные пленки, совмещенные в стопы Столетова, проявляющие плеохроизм при размещении на различных отражающих поверхностях. Все изображения были получены в условиях контролируемого освещения для поддержания постоянства в течение всей экспериментальной процедуры.

Обработка RAW-изображений производилась с помощью программного обеспечения Darktable с открытым исходным кодом, которое обеспечивает точное управление цветом и калибровку рабочих процессов. Пользовательский цветовой профиль был создан с помощью модуля цветовой калибровки (Color Calibration) в Darktable, реализующего стратегию оптимизации, основанную на минимизации среднего ΔE (цветового различия). Этот подход был выбран для обеспечения равномерного распределения цветовых ошибок по всему цветовому охвату при минимизации различий в восприятии цветов. Алгоритм оптимизации вычислял оптимальные параметры путем итеративного уменьшения расхождения между эталонными значениями сцены (ColorChecker Passport) и цветовым откликом камеры в конкретных условиях освещенности.

Полученный цветовой профиль был впоследствии применен ко всем цифровым фотографиям в наборе данных. Обработанные изображения были экспортаны в 16-битные файлы TIFF без сжатия с использованием цветового пространства AdobeRGB для поддержания широкого цветового охвата и сохранения точности цветопередачи. Высокая битовая глубина обеспечивает минимальные ошибки квантования и сохраняет тонкие цветовые вариации, характерные для плеохроичных эффектов.

Для получения цветовых координат L^* , a^* и b^* значения на цифровых фотографиях (рис. 2) брались в области интереса размером 5×5 пикселей, что позволяет усреднить значения и подавить случайный шум, что дает колориметрические данные для последующего анализа плеохроизма многослойных полимерных пленок.

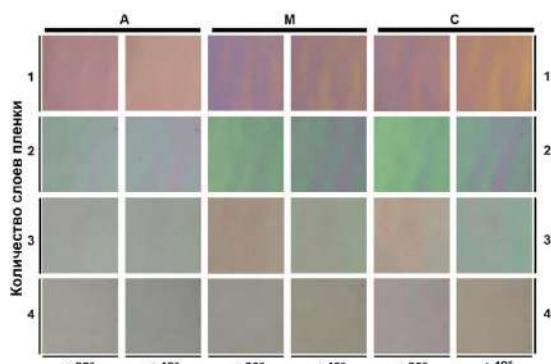


Рисунок 2 – Цвет ДОПП пленок при угле отражения 30° и 40° между источником света и фотокамерой на различных светоотражающих поверхностях: А – акриловая; М – стальная; С – стеклянная поверхность

Figure 2 – The color of BOPP films at a reflection angle of 30° and 40° between the light source and the camera on various reflective surfaces: A – acrylic; M – steel; C – glass surface

Расчет цветового различия пленок проводили по формуле 1:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (1)$$

где L^* – светлота, a^* – координаты красно-зеленого оттенка, b^* – координаты желто-синего оттенка, согласно цветовому пространству CIE1976 $L^*a^*b^*$ [10]. Индексы представляют цветовые значения CIELab двух цветов.

Спектральные характеристики светоотражающих поверхностей, стеклянного акрилового и стального зеркал и ДОПП получали с помощью спектрофотометра X-Rite i1Pro с модулем командной строки spotread из ArgyllCMS версии 2.3.0. Схема измерения спектра отражения света от поверхности образца в спектрофотометре представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема измерения спектра отражения света от поверхности образца (зеркала) в спектрофотометре X-Rite i1Pro

Figure 3 – Measurement scheme of the light reflection spectrum from the sample surface (mirror) in an X-Rite i1Pro spectrophotometer

Спектральные характеристики отражающих поверхностей приведены на рисунке 4.

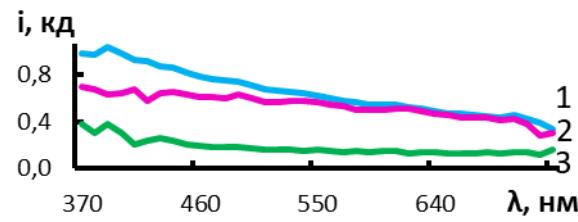


Рисунок 4 – Спектральные характеристики отражающих поверхностей: 1 – акрил, 2 – стекло, 3 – сталь

Figure 4 – Spectral characteristics of reflective surfaces: 1 – acrylic, 2 – glass, 3 – steel

ПЛЕОХРОИЗМ БЕСЦВЕТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Спектральные характеристики ДОПП (рис. 5) получены размещением 4-слойного пакета пленок на различных видах светоотражающих поверхностей: акриловое, стеклянное и металлическое зеркала, и измерения проводились через пленочный поляризатор.

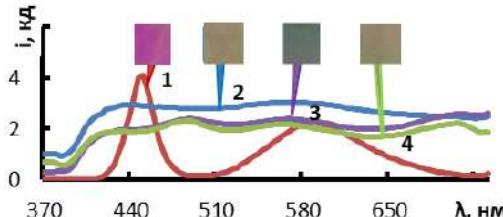


Рисунок 5 – Спектральные характеристики и цвет пакета из 4-х слоев пленки ДОПП в проходящем потоке поляризованного света (1) и на отражающей поверхности акрилового (2), стеклянного (3) и стального (4) зеркал

Figure 5 – Spectral characteristics and color of a package of 4 layers of BOPP film in a passing stream of polarized light (1) and on the reflective surface of acrylic (2), glass (3) and steel (4) mirrors

Таблица 1 – Показатель цветового отличия ΔE между пленкой и фоном

Table 1 – The indicator of the color difference ΔE between the film and the background

Материал поверхности		Акрил		Сталь		Стекло	
Угол отражения ϕ между источником света и фотокамерой		30°	40°	30°	40°	30°	40°
Количество слоев пленки (ДОПП)	1	45	39	47	46	48	47
	2	35	34	44	45	41	45
	3	33	36	37	39	35	34
	4	36	40	41	39	40	37

Наибольшим цветовым отличием между «фоном» (рис. 6) и пленкой при прямом наблюдении обладает однослойное комбинированное полимерное покрытие на поверхности полимерной (акриловой) и стеклянной тары.

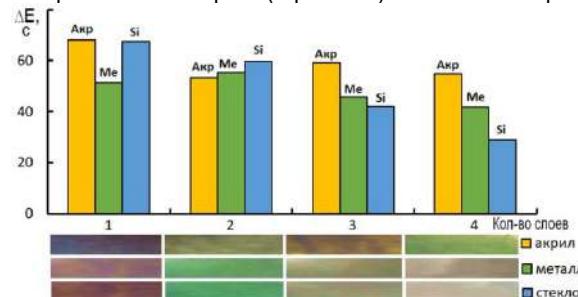


Рисунок 6 – Цветовое отличие от фона (ΔE) многослойного покрытия из пленки полипропилен (ДОПП) на акриловой, стальной и стеклянной таре при нормальном отражении от поверхности

Figure 6 – Color difference of a polypropylene film coating (BOPP) on acrylic, steel and glass surfaces at normal reflection from the surface

Изменение цвета происходит по мере увеличения количества слоев пленки полипропилен. Цветовое отличие ΔE при одинаковом количестве слоев пленки на различных светоотражающих поверхностях имеет разные значения. Отражающие материалы отличаются степенью поляризации излучения и по мере увеличения количества слоев снижается степень поляризации света, что приводит к снижению цветового отличия между многослойными пленками и фоном. Это различие следует учитывать при выборе материала тары для продук-

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для объективной оценки отличия окраски образца и фона (цвет, полученный путем размещения поляризатора на отражающей поверхности) было рассчитано стандартное цветовое различие ΔE – величина, определенная на разности координат цвета двух сравниваемых объектов [11]. Предполагается, если ΔE варьируется в пределах 1,5-2 единиц, то человеческий глаз не может отличать цвета друг от друга [12], а следовательно защитная маркировка полимерной упаковки, металлической или стеклянной тары будет бесполезной при визуальном определении подлинности товара.

Результаты расчета цветового отличия между покрытой поляризатором ДОПП пленкой, размещенной на светоотражающей поверхности и бесцветной прозрачной пленкой при различных углах отражения ϕ между источником света и фотокамерой представлены в таблице 1. Наибольшим цветовым отличием, обусловленным плеохроизмом отражающего покрытия при косом обозрении, характеризуется стеклянная тара с монопленкой полипропилен.

тог химической промышленности и конструировании её защитных элементов или упаковки.

Возможность инструментальной идентификации закодированной информации на прозрачной полимерной упаковке зависит от контраста и цветового различия структурных элементов штрихового кода или товарного знака, а заметность маркировки на зеркальной поверхности определяется их светлотой. Светлота, как мера интенсивности отраженного от зеркальной поверхности оптического излучения, проходящего сквозь несколько слоев полимерной пленки, снижается по мере увеличения толщины покрытия. Законом, описывающим ослабление параллельного пучка света при его распространении в поглощающей среде, является закон Ламберта-Бугера [13]. Этот закон, справедливый при малых интенсивностях, связывает интенсивность I пучка света, прошедшего через слой поглощающей среды толщиной l , с интенсивностью падающего пучка I_0 :

$$I = I_0 e^{-k l} \quad (2)$$

где k – коэффициент поглощения не зависит от интенсивности света и толщины поглощающего слоя [14].

Отношение I_0/I выражает ослабление интенсивности света и называется погашением [14]. Для проверки применимости закона Ламберта-Бугера к ослаблению светлоты многослойных полимерных покрытий в потоке поляризованного света исследовали её зависимость от количества слоев или суммарной толщины. Несоответствие зависимостей светлоты от толщины пленки закону Ламберта-Бугера, найденное на примере пакетов полупрозрачных пленок поливинилхлорида [15] подтверждается результатами спектрального и цифрового анализа светлоты 15 слоев пленок полипропилена в отраженном потоке поляризованного света (рис 7).

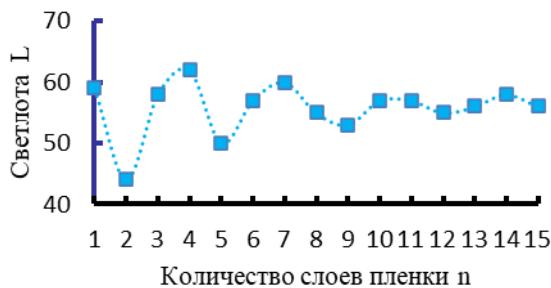


Рисунок 7 – Светлота цвета L в зависимости от количества слоёв пленки

Figure 7 – The lightness of the color L depends on the number of film layers

Полученный результат имеет важное практическое значение для декорирования и маркировки всех типов отражающих поверхностей тары. Светлота пакетов не убывает монотонно по мере увеличения числа слоев и толщины пакета. Рассеяние света пакетами пленок полипропилена одинаковой толщины не существенно снижает светлоту и интенсивность их окраски даже при количестве слоев покрытия, превышающем 15. Светлота пакета из 4 слоёв пленок полипропилена максимальна и незначительно превосходит светлоту монопленки.

Достаточно высокие, близкие к максимальным значения светлоты имеет пакет из 7 и 10 пленок. Максимальные значения цветовых различий соответствуетmonoслою полипропилена на всех исследованных типах отражающих поверхностей (табл. 1).

ВЫВОДЫ

1. Отражающие поверхности из стекла, металла и пластмасс покрытые бесцветными пленками полипропилена (ДОПП) и пленочным поляризатором приобретают различный цвет при освещении объекта излучением белого цвета, а интенсивность и спектр отраженного излучения нелинейно зависят от количества слоёв пленки.

2. Селективная фильтрация поляризованного света бесцветными пленками полипропилена, отражённого от зеркальной поверхности, позволяет получать различные цвета декоративных изделий и оптических фильтров без применения пигментов, красителей или цветных полимеров.

3. Количественные параметры цвета и светлота отраженного излучения от многослойных покрытий из полипропилена на отражающих поверхностях зависят от угла обозрения, ориентации оптической оси поляризации поляризатора.

4. Химический состав отражающих поверхностей (силикатного стекла, стали или пластмассы) влияет на цвет и интенсивность отражённого потока света. Наибольшее изменение цвета (ΔE около 70 единиц) и интенсивность потока поляризованного света наблюдается при нормальном отражении от поверхности «акрилового зеркала» покрытого прозрачной бесцветной монопленкой полипропилена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shruti A., Bage N., Kar P. Nanomaterials based sensors for analysis of food safety // Food Chemistry, 2024, 433, pp. 137284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137284>
2. Pavlovska E., Gurska B., Voychik K. Labeling

packaging with environmental symbols // Packaging review, 2024, 2, pp. 6-12. doi: 10.15199/42.2024.2.1

3. Pereira E. et al. RFID tags for metal application: a brief overview // Technologies, 2024, 12, 5, p. 58. doi: <https://doi.org/10.3390/technologies12050058>

4. Liu Q., Li H., Yu Y. F. A versatile flexible UHF RFID tag for glass bottle labelling in self-service stores // IEEE Access, 2018, 6, pp. 59065-59073. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2874428

5. Rassart M., Colomer J.F., Tabarrant T., Vigneron J.P. Diffraction hydrochromic effect in the cuticle of the Hercules beetle *Dynastes hercules* // New Physical Journal, 2008, No. 10, 3, p. 033014. doi: 10.1088/1367-2630/10/3/033014

6. Xuan Z., Li J., Liu K., Yi F., Wang S., Lu W. Artificial structural colors and their application // Innovations, 2021, 2, 1. doi: 10.1098/rsif.2016.0933

7. Liu, F., Yin, H., Dong, B., Qing, Yu., Zhao, L., Meyer, S., Chen, B. Imperceptible structural coloration of the elytra of *Chlorophila obscuripennis* beetles (Coleoptera) // Electronic physical review — Statistical, nonlinear physics and physics of soft substances, 2008, pp. 77, 1, page 012901. doi: 10.1103/PhysRevE.77.012901

8. Дружинина Н.А., Муратова Н.М. Электронная маркировочная продукция // Химическая промышленность сегодня, 2020, № 3, С. 54-56.

9. Болотин, Б. М. Органические люминофоры с аномально большим сдвигом Стокса // Химическая промышленность сегодня, 2014, 1, С. 18-24.

10. Nikolaev A.A., Kondratov A.P. Method of hidden marking of transparent polypropylene film // Fine Chemical Technologies, 2022, vol. 17, No. 4, pp. 346-356. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-4-346-356>

11. Сулла С., Шишкин М.И. Измерение цвета: теория и практика // Лакокрасочные материалы и их применение, 2003, 7-8, С. 36-39.

12. Фурман Н.Н., Вакор В.В., Третьякова А.Е., Сафонов В.В. Возможность применения инструментальных методов для контроля цвета ряда декоративных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение, 2015, 5, С. 30-34.

13. Прохоров А.М. Физика. Большой энциклопедический словарь—4-е изд. М.: Большая Российская энциклопедия, 1999, 944 с.

14. Окатов М.А. Справочник технолога-оптика. СПб.: Политика, 2004, 679 с.

15. Kondratov A. P., Volinsky A. A., Chen J. The effect of scale on the color and transparency of multilayer polyethylene films in polarized light // Achievements of Polymer Technology, 2016, No. 17, 734, pp. 3741-3751. <https://doi.org/10.1002/adv.21708>

Информация об авторах

В. Ю. Верещагин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокогнитивные технологии» Московского политехнического университета.

А. Ю. Погиба, преподаватель кафедры «Инновационных материалов принтмедиаиндустрии».

А. П. Кондратов Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационных материалов принтмедиаиндустрии».

ПЛЕОХРОИЗМ БЕСЦВЕТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СВЕТООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

REFERENCES

1. Shruti, A. & Bage, N. & Kar, P. (2024) Nanomaterials based sensors for analysis of food safety. *Food Chemistry*, 433, pp. 137284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137284>
2. Pavlovska, E. & Gurska, B. & Voychik, K. (2024) Labeling packaging with environmental symbols. *Packaging review*, 2, pp. 6-12. doi: 10.15199/42.2024.2.1
3. Pereira, E. (2024) et al. RFID tags for metal application: a brief overview. *Technologies*, 12, 5, p. 58. doi: <https://doi.org/10.3390/technologies12050058>
4. Liu, Q. & Li, H. & Yu, Y. F. (2018) A versatile flexible UHF RFID tag for glass bottle labelling in self-service stores. *IEEE Access*, 6, pp. 59065-59073. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2874428
5. Rassart, M., Colomer, J.F., Tabarrant, T. & Vigneron J.P. (2008) Diffraction hygrochromic effect in the cuticle of the Hercules beetle *Dynastes Hercules*. *New Physical Journal*, No. 10, 3, p. 033014. doi: 10.1088/1367-2630/10/3/033014
6. Xuan, Z., Li, J., Liu, K., Yi .F., Wang, S. & Lu, W. (2021) Artificial structural colors and their application. *Innovations*, 2, 1. doi: 10.1098/rsif.2016.0933
7. Liu, F., Yin, H., Dong, B., Qing, Yu., Zhao, L., Meyer, S. & Chen, B. (2008) Imperceptible structural coloration of the elytra of *Chlorophila obscuripennis* beetles (Coleoptera). *Electronic physical review — Statistical, nonlinear physics and physics of soft substances*, pp. 77, 1, page 012901. doi: 10.1103/PhysRevE.77.012901
8. Druzhinina, N.A. & Muratova, N.M. (2020) Electronic marking products. *Chemical industry today*, No. 3, pp. 54-56. (In Russ.).
9. Bolotin, B.M. (2014) Organic phosphors with an abnormally large Stokes shift. *Chemical industry today*, 1, pp. 18-24. (In Russ.).
10. Nikolaev, A.A. & Kondratov, A.P. (2022) Method of hidden marking of transparent polypropylene film. *Fine Chemical Technologies*, vol. 17, No. 4, pp. 346-356. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-4-346-356>
11. Sulla, S. & Shishkin, M.I. (2003) Color measurement: theory and practice. *Paints and varnishes and their application*, 7-8, pp. 36-39. (In Russ.).
12. Furman, N.N., Vakor, V.V., Tretyakova, A.E. & Safonov V.V. (2015) Possibility of using instrumental methods for color control of a number of decorative coatings. *Paints and varnishes and their application*, 2015, 5, pp. 30-34. (In Russ.).
13. Prokhorov, A.M. (1999) Physics. The Great Encyclopedic Dictionary – 4th ed. Moscow: The Great Russian Encyclopedia (In Russ.). (In Russ.).
14. Okatov, M.A. (2004) Handbook of Technology and Optics. St. Petersburg: Politics (In Russ.). (In Russ.).
15. Kondratov, A. P. & Volinsky A. A. & Chen J. (2016) The effect of scale on the color and transparency of multilayer polyethylene films in polarized light. *Achievements of Polymer Technology*, No. 17, 734, pp. 3741-3751. <https://doi.org/10.1002/adv.21708>.

Information about the authors

V. Y. Vereshchagin, Candidate of Technical Sciences, Associate docent of the Department of «Infocognitive technologies» of Moscow Polytechnic University.

A. Y. Pogiba Lecturerat the Department of Innovative Materials of the Print Media Industry at Moscow Polytechnic University.

A. P. Kondratov Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Innovative Materials of the Print Media Industry at Moscow Polytechnic University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принятана к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 12 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 541.64
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.034

EDN: JOCWKX

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НАПОЛНЕННОГО ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ ЭЛАСТОМЕРА МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Наталья Николаевна Минакова

Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
minakova@asu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7665-8069>

Аннотация. Полимерные композиционные материалы применяются в изделиях различного назначения. Выполнение заданных функций требует широкого спектра электропроводности. Прогнозирование величины объемного электрического сопротивления затруднено из-за многокомпонентной структуры материалов. Поэтому актуален поиск инструментария для оценки электропроводности материалов, позволяющего реализовывать целенаправленный подбор характеристик под область применения. Рассматриваются наполненные техническим углеродом эластомеры, величина объемного электрического сопротивления которых формируется за счет исходных компонентов и технологии изготовления. Технологический процесс определяет комплекс параметров, которые в разной степени влияют на формирующуюся структуру. Изучалась возможность оценки влияния технологии на объемное электрическое сопротивление и его разброс в серии изделий. Предложен подход к оценке закономерностей изменения величины объемного электрического сопротивления по изображениям макроструктуры сканирующего микроскопа композиционного материала при изменении параметров технологического цикла. Подход основан на методе локальных бинарных шаблонов. Показана корректность применения изображений структур сканирующего микроскопа для оценки величины объемного электрического сопротивления наполненных техническим углеродом эластомеров в зависимости от технологического параметра (величины давления при вулканизации). Сделан вывод о том, что динамику объемного электрического сопротивления с помощью сравнения гистограмм изображений структур материалов лучше отражает метод хи-квадрат (χ^2) по сравнению с методом пересечений.

Ключевые слова: изображение макроструктуры, полимерные композиционные материалы, наполненные техническим углеродом эластомеры, текстурный анализ, объемное электрическое сопротивление, компьютерное зрение, метод локальных бинарных шаблонов, гистограммы яркости, метод хи-квадрат, метод пересечений, степень кристалличности.

Для цитирования: Минакова Н. Н. Оценка влияния технологии на электропроводность наполненного техническим углеродом эластомера методом сканирующей электронной микроскопии // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 220–223. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.034. EDN: <https://elibrary.ru/JOCWKX>.

Original article

COMPARING PROPERTIES OF CARBON BLACK FILLED POLYMER SCANNING MICROSCOPY MACROSTRUCTURE IMAGES TO ESTIMATE INFLUENCE OF PRODUCTION STAGES ON ELECTRIC CONDUCTIVITY OF POLYMERS

Natalya N. Minakova

Altai State University, Barnaul, Russia
minakova@asu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7665-8069>

Abstract. Composite polymers are in many areas of industry where their electric conductivity should vary widely. Composite structures of polymers complicate the estimation of their volume electric resistance. Thus, the suitable approach to estimate conductivity of polymers required for the specific operating conditions and identify their applicability is of great importance. This paper studies different carbon black filled rubbers with their volume electric resistances defined by their initial components and their production stages. The production technology and composite polymer production stages have direct impact on the set of characteristics and parameters of the specific composite polymer. The conducted study includes the evaluation of the influence of composite polymer production technologies on the volume electric resistance properties of the polymers and volume electric resistance dispersion in series of samples of the same line of polymers. The proposed approach helps evaluate the changes of volume electric resistance and identify the patterns using the scanning microscopy macrostructure images of polymers with different production stages. The approach is based on the local binary pattern (LBP) method. It is shown that scanning microscopy macrostructure images along with the LBP method provides the correct framework to estimate the volume electric resistance of carbon black filled polymers and identify its dependence

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НАПОЛНЕННОГО ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ ЭЛАСТОМЕРА МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

on the production stage parameters (specifically, the vulcanization pressure). It is concluded that the best approach to analyze the volume electric resistance dynamics is by using the chi-square (χ^2) test histograms when compared to the intersection method.

Keywords: macrostructure images, composite polymers, carbon black filled polymers, texture analysis, volume electric resistance, computer vision, local binary pattern, brightness histograms, chi-square test, intersection method, crystallinity.

For citation: Minakova N. N (2025). Comparing properties of carbon black filled polymer scanning microscopy macrostructure images to estimate influence of production stages on electric conductivity of polymers. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 220-223. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.034. EDN: <https://elibrary.ru/JOCWKX>.

Наполненные техническим углеродом эластомеры обладают требуемым набором свойств при промышленной технологии изготовления, доступности исходного сырья и т.д. Характеристики зависят от вида технического углерода и связующего компонента, технологии изготовления [1–4].

Характер распределения технического углерода в эластомере закладывают исходные компоненты. Окончательно гетерогенность структуры закрепляется в процессе технологического цикла.

Технология изготовления материалов включает смешение, профилирование, вулканизацию [5]. Она существенно влияет на свойства, которые могут меняться в зависимости от параметров смешения, вулканизации и т.д.

Поэтому актуальна задача оценки влияния технологических факторов на характер изменения величины объемного электрического сопротивления материала. Поскольку количественные модели оценки влияния технологии на структуру невозможны из-за её многокомпонентности и межфазных взаимодействий, в качестве одного из инструментов используется анализ по микрофотографиям. Для рассматриваемых композиционных материалов применялись электронно-микроскопические снимки [6, 7].

Электронно-микроскопические снимки хорошо разграничивают области связующей основы и технического углерода, степень его агломерирования и т.д. [6]. На снимках просматривается разветвленная сетка технического углерода в связующей основе. Возможность оценки динамики свойств подтверждена экспериментально [7]. Однако технология получения электронно-микроскопические снимков затратна и растянута во времени из-за необходимости получения ультратонких срезов на специальном оборудовании [2, 3].

В работе применен метод сканирующей микроскопии [8]. Получение снимков в этом случае проще и дешевле. Однако на них нет четкого выделения компонентов проводящей сетки. Микрофотографии со сканирующим микроскопом при рецептурных и технологических изменениях внешне различаются незначительно.

Поскольку снимки структуры материалов в сканирующем микроскопе не имеют четкого выделения разветвленной электропроводящей сетки, выбран подход, реализующий не количественную оценку по каждой структуре материала, а сравнительную оценку изображений структур по микрофотографиям, полученным в одинаковых условиях.

Для оценки корректности подхода выбраны технологии изготовления материалов, существенно отличающиеся параметрами процесса вулканизации, в ходе которого между макромолекулами происходит сшивание, формируются поперечные связи с образованием трехмерной сетевой структуры [2, 3].

Рассматривались технологии изготовления, имеющие существенную разницу величин давлений при вулканизации: прессовая ($P=125$ атм) и беспрессовая ($P=6$ атм) [9, 10]. Беспрессовая технология включает после профилирования вулканизацию в паровом котле без прессформы. Это минимизирует технологические

дефекты, связанные с течением смеси в прессформе (следы от облоя, сколы и т.д.). Можно изготавливать изделия любой формы без затрат на прессформу. Конфигурация изделия определяется формующей головкой. В рамках этой технологии применяется меньшее по величине давление, чем в прессовой. Беспрессовая технология, согласно проведенным исследованиям, улучшает диспергирование, увеличивает объемное электрическое сопротивление [9]. Величина давления при вулканизации влияет и другие на свойства [9, 10].

На рисунке 1, в качестве примера, приведен график зависимости коэффициента набухания в трансформаторном масле (8760 часов) от давления при вулканизации, определенного по методике [2].

Изучались материалы, которые содержат технический углерод П-514, концентрации 80 весовых частей на 100 весовых частей основе нитрильного каучука (СКН-40).

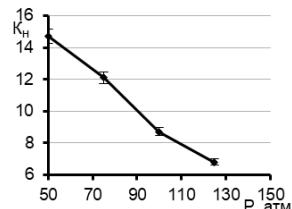


Рисунок 1 – График зависимости коэффициента набухания от величины давления при вулканизации

Figure 1 – Graph of the dependence of the swelling coefficient on the pressure during vulcanization

Микрофотографии материалов со сканирующим микроскопом, представлены на рисунке 2. Съемка поверхности материала осуществлялась в режиме обратно отраженных электронов на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM 3000.

Были проанализированы по 16 микрофотографий для каждого материала.

Экспериментально определялись:

- величины объемного электрического сопротивления (ρ_v , ом м);

- коэффициент вариации %.

Измерения величины объемного электрического сопротивления (ρ_v) выполнялись по стандартным методикам [2]. Использовались резисторы – образцы диаметром 0,03 м, высотой 0,05 м. Количество изделий в партии при испытаниях составляло не менее 12 штук.

Результаты указаны на рисунке 3 – 4.

Составляющие располагаются в структуре композиционного материала по определенным правилам, определяемым свойствами исходных компонентов и технологией изготовления. Ориентация компонентов, составляющих материал, их взаимодействие отражаются на гистограмме яркости через цветовой фон, насыщенность изображения структуры [2].

Информация об изменении яркости на изображении отражает структуру материала. Поэтому выбраны характеристики, рассчитываемые методом локальных бинарных шаблонов, которые анализируют яркости изображений [11 - 13].

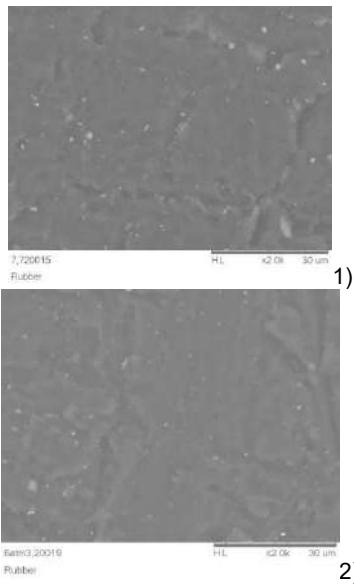


Рисунок 2 – Снимки сканирующего микроскопа (увеличение 2000): материал СКН-40 80 в.ч. на 100 в. ч.П-514: технологии: 1) прессовая 2) беспрессовая

Figure 2 - Scanning microscope images (magnification 2000): material SKN-40 80 V.H. by 100 V. H.P-514: technologies: 1) pressed 2) non-pressed

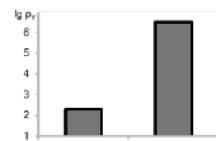


Рисунок 3 – Зависимость величины p_r от давления при вулканизации: 1) прессовая ($P=125$ атм); 2) беспрессовая $P=6$ атм)

Figure 3 – Dependence of p_r value on pressure during vulcanization: 1) pressed ($P=125$ atm); 2) free-pressed ($P=6$ atm)



Рисунок 4 – Зависимость коэффициента вариации величины p_r в серии изделий от давления при вулканизации: 1) прессовая ($P=125$ атм); 2) беспрессовая ($P=6$ атм)

Figure 4 – Dependence of the coefficient of variation of p_r in a series of products on the pressure during vulcanization: 1) pressed ($P=125$ atm); 2) non-pressed ($P=6$ atm)

Локальные бинарные шаблоны имеют большое разнообразие методов расчета гистограмм яркости и показателей их сравнения [14 - 17]. Базовый оператор локального бинарного шаблона включает информацию о соседних точках (8 пикселей окрестности при сравнении с пороговым значением интенсивности центрального пикселя) [15 - 16].

В локальных тернарных шаблонах учитывается возможная неотличимость двух пикселов с близкими значениями яркости от пикселов со значительной разницей яркости: вместо порогового значения яркости применяется экспериментальная константа, позволяющая учитывать влияние шума на построение кода шаблона [17 - 19].

Расширенные бинарные шаблоны построены на предварительной обработке, включающей нахождение равномерных шаблонов (не более трех переходов в шаблоне) и всех их циклических сдвигов [20].

В шаблоне Three-Patch ЛБШ (TP) вместо пикселей сравниваются фрагменты изображения [21].

В работе применен базовый оператор локального бинарного шаблона, который не требует предварительной обработки, имеет малую ресурсоемкость и инвариативность при преобразованиях яркости, сохраняющих порядок [7,8].

Сходство гистограмм может оцениваться по ряду показателей: взвешенное расстояние Кульбака-Лейблера, метод пересечений, расстояние Махаланобиса, линейный дискриминант и т.д. [11,12, 21,22].

В работе для сравнения гистограмм использовались следующие методы:

1. Хи -квадрат (χ^2) [21]:

$$d_c(H_1, H_2) = \sum_i \frac{(H_1(i) - H_2(i))^2}{H_1(i) + H_2(i)}$$

где H_1 и H_2 — сравниваемые гистограммы, а $H_i(i)$ и $H_2(i)$ — элементы соответствующих гистограмм с номером i .

При приближении значения к нулю имеет место меньшее различий между гистограммами.

2. вычисление пересечений [22]:

$$d_s(H_1, H_2) = \sum_i \min(H_1(i) \cdot H_2(i))$$

где H_1 и H_2 — сравниваемые гистограммы, $H_1(i)$ и $H_2(i)$ — элементы соответствующих гистограмм с номером i . Приближение значения к единице указывает на уменьшение различий между гистограммами.

Для расчетов гистограмм и характеристики их сравнения разработана программа ЭВМ на языке Python с использованием функций библиотеки OpenCV [23].

Полученные результаты представлены в табл.1. Рассматривалась серия изделий из материалов, изготовленных в рамках одной технологии (прессовая, беспрессовая) и серии изделий из материалов, изготовленных по разным технологиям. Полученные значения показателей сопоставления анализируемых структур сравнивались с величиной удельного объемного электрического сопротивления и коэффициентами вариации его значений в серии изделий (рис. 3, 4).

Таблица 1 – Сравнение гистограмм локальных бинарных шаблонов

Table 1 – Comparison of histograms of local binary patterns

Технологии в сравниваемых материалах	Методы сравнения	
	Хи (χ^2)	Метод пересечений
Прессовая в выборке	1043	0,928
Беспрессовая в выборке	107,1	0,94
Прессовая и беспрессовая	1885	0,86

Установлено, что закономерность изменения рассматриваемых параметров по методу χ^2 в зависимости от технологии (давления при вулканизации) оценивается правильно. Различные величины показателей для всех сравниваемых материалов указывают на разницу структур. Сравнение гистограмм структур материалов указывает на существенное влияние технологии. Наибольшее несовпадение структур имеет место при сравнении материалов, изготовленных по разным технологиям. Большее совпадение структур имеет место в серии материалов беспрессовой технологии [10].

По методу пересечений закономерности выражены меньше. Однако закономерности такие же, как и по параметру χ^2 . Сравнение гистограмм материалов двух технологий указывает на различие в величинах объемного электрического сопротивления изделий [9]. Показатель, характеризующий материалы беспрессовой технологии в выборке, указывает на меньшую разницу в структуре, что соответствует меньшему разбросу по величине

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НАПОЛНЕННОГО ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ ЭЛАСТОМЕРА МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

объемного электрического сопротивления в серии.

Сравнение рассматриваемых характеристик с данными табл. 2, показывает, что степень их изменения от величины давления при вулканизации в реальности больше, чем регистрируется рассматриваемыми показателями.

Можно полагать, что особенности получения изображения на сканирующем микроскопе таковы, что через градации яркости не фиксируются расстояния между частицами технического углерода, в рамках которых действует туннельный механизм электропроводности [4, 7]. В этом случае должна существовать зависимость характеристик, представленных в табл. 1, от степени кристалличности. Известно, что при увеличении степени кристалличности возрастает доля туннельного механизма электропроводности [2, 7].

Для выбранных в качестве объектов исследования материалов оценивалась кристалличность методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Shimadzu XRD 7000S (CuKa -излучение, счетчик-монохроматор Shimadzu CM-3121). Результаты представлены на рисунке 5.

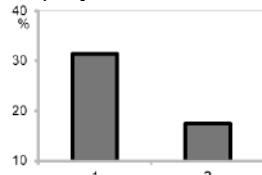


Рисунок 5. Степень кристалличности: 1) - прессовая, 2) – беспрессовая

Figure 5. Degree of crystallinity: 1 - pressed, 2 - non-pressed

Установлено, что степень кристалличности для материалов прессовой технологии изготовления выше почти в два раза, чем беспрессовой.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенный подход позволяет корректно оценивать динамику электропроводности (объемного электрического сопротивления и его коэффициента вариации) в зависимости от давлений при вулканизации рассматриваемых технологий.

2. Установлено, что метод χ^2 реагирует сильнее, чем метод пересечений. Сопоставление показателей χ^2 позволяет наглядно оценивать динамику электропроводности и ее разброса в серии в зависимости от технологии.

3. Предложенный подход можно применять для подбора технологии при конструировании материалов с необходимой электропроводностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения /Б.А. Люшин (и др.) //под ред. А.В. Герасимов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017 г. 311 с.
2. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. М.: Химия, 1984. 240 с.
3. Крикоров, В.С. Колмакова Л.А. Электропроводящие полимерные материалы. М.: Энергоатомиздат, 1984. 176 с.
4. Минакова Н.Н. Моделирование процессов эксплуатационных воздействий для дисперсно-наполненных полимеров //Известия высших учебных заведений физика. 2000. Т. 43. № 1. С. 41-45.
5. Кошелев Ф. Ф., Корнев А. Е., Клинов Н. С. Общая

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

Статья поступила в редакцию 12 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принятая к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 12 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

технология резины. М.: Химия, 1978. 528 С.

6. Минакова Н.Н., Карпов С.А, Ушаков В.Я. Текстурный анализ дисперсной структуры композитных эластомеров с модифицированным углеродным наполнителем //Известия вузов физика. 2000. Т. 43. № 1. С. 41 - 45.

7. Минакова Н.Н. Оценка вклада агломерированного компонента в формирование электропроводности наполненных полимеров по сравнительным характеристикам микрофотографий структуры //Ползуновский вестник. 2022. № 1. С. 147–153. – doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.00.000.

8. Криштап М.М., Ясников И.С. Полунин В.И. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микронализ в примерах практического применения. М.: Техносфера, 2009. 208 с.

9. Минакова Н.Н., Сквирская И.И., Ушаков В.Я. Низковольтные характеристики материала на основе каучука с углеродным наполнителем для объемных резисторов //Электричество. 1986. № 4. С. 64 – 66.

10. Минакова Н.Н., Сквирская И.И., Ушаков В.Я. Исследование природы нестабильности основных характеристик крупногабаритных полимерных резисторов //Электричество. 2001. № 3. С. 38-42.

11. Постнов К.В. Компьютерная графика. М.: МГСУ, 2009. 249 с.

12. Гонсалес Р.С, Вудс Р.Е. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1081 с.

13. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн.2. 480 с.

14. Alpaslan N., Hanbay K. Multi-resolution intrinsic texture geometry-based local binary pattern for texture classification //IEEE Access. 2020. V. 8. P. 54415–54430.

15. Рахимбаева Е.О Анализ алгоритма локальных бинарных шаблонов в задаче классификации текстур //Вестник современных исследований. 2019. № 1.13 (28). С. 125-130.

16. Annaby M., Fouda Y. Fast template matching and object detection techniques using ϕ -correlation and binary circuits //Multimedia Tools and Applications. 2024. Т. 83. №. 3. С. 6469-6496.

17. Евдокимова Н. И., Кузнецов А. В. Локальные шаблоны в задаче обнаружения дубликатов //Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. №. 1. С. 79-87.

18. Tan, X. Enhanced Local Texture Feature Sets For Face Recognition Under Difficult Lighting Conditions / X. Tan, B. Triggs //IEEE Transactions On Image Processing. 2010. Vol. 19(6). P. 1635-1650.

19. Глумов Н. И. и др. Метод быстрой корреляции с использованием тернарных шаблонов при распознавании объектов на изображениях //Компьютерная оптика. 2008. Т. 32. №. 3. С. 277-282.

20. Вдовенко П. А. Анализ существующих подходов сегментации лиц на изображении //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. №. 12. С. 602-603

21. Ефимов И. Н. Локальные бинарные шаблоны медианного пикселя – эффективные информативные признаки технологии распознавания образов //Цифровая обработка сигналов. 2015. №. 1. С. 61-65

22. Shan C., Gong S. Facial Expression Based On Local Binary Patterns: A Comprehensive Study // Image And Vision Computing. 27(6). - 2009. P. 803-816.

23. Histogram Comparison // OpenCV. URL: https://docs.opencv.org/3.4/d8/dc8/tutorial_histogram_comparison.html (дата обращения 25.08.2024).

Информация об авторах

Н. Н. Минакова – д.ф.-м. н., профессор, АлтГУ.

Information about the authors

N. N. Minakova – Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor, AltSU.



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 577.114
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.035

EDN: DHYXML

ПОЛУЧЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РАЗЛИЧНОГО ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Анастасия Александровна Зенкова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск, Россия
zenkova_nastasya080401@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0868-5444>

Аннотация. Бактериальная наноцеллюлоза является биополимером, её уникальность заключается в том, что она имеет очень тонкую трёхмерную структуру, отличную газопроницаемость, высокую прочность, биосовместимость. Бактериальная наноцеллюлоза не содержит пектина, гемицеллюлоз и лигнина. Применяется бактериальная наноцеллюлоза в пищевой, фармацевтической, текстильной, промышленности в биомедицине и биоэлектронике. Производство бактериальной наноцеллюлозы является дорогостоящим, замена классических питательных сред на ферментативные гидролизаты из целлюлозосодержащего сырья может способствовать снижению цены конечного продукта. В данной работе было использовано легковозобновляемое целлюлозосодержащее сырьё: тростник, суданская трава (выращиваются в агропромышленном масштабе), мискантус (техническая культура), шелуха овса (отходы производства геркулеса), водяной гиацинт (выращиваются для очистки воды в закрытых водоемах), лён, конопля. В ходе работы был проанализирован химический состав целлюлозосодержащего сырья без химической предварительной обработки, и полученных субстратов после щелочной делигнификации. Затем все полученные образцы подвергали ферментативному гидролизу. Полученные данные показали, что химическая предварительная обработка повышает содержание целлюлозы в 2-3 раза, за счёт чего повышается реакционная способность субстратов к ферментативному гидролизу в 1,6-23,0 раза. Выход бактериальной наноцеллюлозы из ферментативных гидролизатов на основе субстратов: тростника - 5,7 %, суданской травы - 3,1 %, мискантуса сорта Сорановский - 9,7 %, мискантуса сорта КАМИС - 3,0 %, шелухи овса - 4,9 %, водяного гиацинта - 10,7 %, костры конопли - 5,3 %.

Ключевые слова: бактериальная наноцеллюлоза, целлюлозосодержащие сырьё, тростник, суданская трава, мискантус, шелуха овса, водяной гиацинты, лён, конопля, ферментативный гидролиз, биосинтез.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках госзадания ИПХЭТ СО РАН (код научной темы FUFE-2024-0008, регистрационный номер 124021200031-4).

Для цитирования: Зенкова, А. А. Получение бактериальной наноцеллюлозы из различного целлюлозосодержащего сырья // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 224–230. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.035. EDN: <https://elibrary.ru/DHYXML>.

Original article

PRODUCTION OF BACTERIAL NANOCELLULOSE FROM VARIOUS CELLULOSE-CONTAINING RAW MATERIALS

Anastasia A. Zenkova

Institute for Problems of Chemical and Energy Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IP-CET SB RAS), Biysk, Russia
zenkova_nastasya080401@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0868-5444>

Abstract. Bacterial nanocellulose is a biopolymer and is unique due to its very fine 3D structure, excellent gas permeability, high strength, and biocompatibility. Bacterial nanocellulose contains no pectin, hemicelluloses, and lignin. Bacterial nanocellulose is used in the food, pharmaceutical and textile industries, biomedicine, and bioelectronics. The production of bacterial nanocellulose is high-cost; therefore, replacing classical nutrient media by enzymatic hydrolyzates from cellulosic raw materials may reduce the price of the end product. This study utilized easily renewable cellulosic feedstocks, such as reed, Sudan grass (cultivated on an agro-industrial scale), miscanthus (industrial crop), oat hulls (Hercules oats production residues), water hyacinth (cultivated for phytoremediation of enclosed water bodies), flax, and hemp. Chemical compositions of the cellulosic feedstocks without chemical pretreatment and of substrates obtained after alkaline delignification were analyzed in the course of the study. All resultant samples were then subjected to enzymatic hydrolysis. The obtained data demonstrated that the chemical pretreatment enhanced the cellulose content by 2-3 times, thereby increasing the reactivity of the substrates to enzymatic hydrolysis by 1.6-23.0 times. The yields of bacterial nanocellulose from the substrate-based enzymatic hydrolyzates were 5.7 % for reed, 3.1 % for Sudan grass, 9.7 % for miscanthus var. Soranovskii, 3.0 % for miscanthus var. KAMIS, 4.9 % for oat hulls, 10.7% for water hyacinth, and 5.3 % for hemp shiv.

ПОЛУЧЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РАЗЛИЧНОГО ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Keywords: bacterial nanocellulose, cellulosic raw materials, reed, Sudan grass, miscanthus, oat hulls, water hyacinth, flax, hemp, enzymatic hydrolysis, biosynthesis.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project no. FUFE-2024-0008 (Theme Registration ID: 124021200031-4).

For citation: Zenkova, A. A. Production of bacterial nanocellulose from various cellulose-containing raw materials. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 224-230. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.035. EDN: <https://elibrary.ru/DHYXML>.

ВВЕДЕНИЕ

Бактериальная наноцелллюзоза – это один из разновидностей наноцелллюзозы [1], натуральный биополимер, имеющий большое значение в различных технологических областях благодаря своим невероятным физико-химическим и биологическим свойствам [2].

Бактериальная наноцелллюзоза биосинтезируется внеклеточно бактериями, принадлежащими родам *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* или *Sarcina* состоит из целллюлозы в виде цепочки нановолокон шириной менее 100 нм [3]. Она имеет очень тонкую трёхмерную структуру, отличную газопроницаемость, высокую прочность во влажном состоянии, биосовместимость и впитывающую способность [4]. Бактериальная наноцелллюзоза в отличии от растительной целллюлозы не содержит пектина, гемицелллюлоз и лигнина, поэтому может применяться в чистом виде [5]. В ходе микробного синтеза возможно регулировать физико-химические и функциональные свойства бактериальной наноцелллюзозы (кристалличность, пористость, размер нановолокон и механические свойства) путём изменения биосинтеза: штамма бактерий, состава питательной среды и условий культивирования [6]. Бактериальную наноцелллюзозу можно получать на синтетических, полусинтетических средах, а также на химических и ферментативных гидролизатах предварительного обработанного целллюлозосодержащего сырья [1,7,8]. Технология производства напрямую влияет на физические и химические характеристики бактериальной наноцелллюзозы, а также на её надмолекулярную структуру [1,9].

Диапазон областей применения бактериальной наноцелллюзозы включает пищевую промышленность, фармацевтическую промышленность, тканевую инженерию, биомедицину [9], её также используют для производства мембран [10], применяется в биоэлектронике для создания автономных электродов [11].

В данной работе для получения бактериальной наноцелллюзозы было использовано легковозобновляемое целллюлозосодержащее сырьё. Выбор сырья варьируется от технических культур, которые выращиваются в промышленных масштабах, такие как конопля, лён, мискантус, используемые в кормопроизводстве суданская трава и тростник, используемый для очистки закрытых водоемов водяной гиацинт, а также отходы производства геркулеса – шелуха овса.

МЕТОДЫ

Целллюлозосодержащее сырьё: тростник, суданская трава, мискантус сахароцветный сорта Сорановский, мискантус гигантский сорта КАМИС, шелуха овса, водяной гиацинт, продукты переработки льна и конопли: волокно льна (пенька короткая), костра льна предоставило АО «Бийская Льняная Компания» (г. Бийск, Россия), волокно конопли, костра конопли предоставило ООО «Мордовские пеньковые заводы» (г. Инсар, Республика Мордовия, Россия), подвергали предварительной химической обработке, 4%-ным гидроксидом натрия при атмосферном давлении (щелочной делигнификацией) по методике [12] с получением

субстратов. Химический состав сырья и полученных субстратов определяли по методике [13].

Сырьё и субстраты подвергали ферментативному гидролизу по методике [7] гидролиз проводили при постоянном перемешивании на шейкере лабораторном «ПЭ-6410» (Россия), скорость перемешивания 150 об/мин, температура 40–45 °C, продолжительность гидролиза 72 ч, использованы ферментные препараты «Целллюкс-А» (грибного происхождения, ООО ПО «Сибиофарм», Россия), и «Ультрафло-Коре» (продукт *Trichoderma reesei*, «Novozymes A/S», Дания). Выбор концентрации ацетатного буферного раствора 0,05 М обоснован в [14]. Для приготовления питательной среды из гидролизатов после определения концентрации редуцирующих веществ в пересчёте на глюкозу по методике [15] гидролизаты кипятили, затем вносили чёрный чай в концентрации 10 г/л.

Биосинтез бактериальной наноцелллюзозы проводили по методике [16], в суховоздушном термостате «ТС-1/20» (Россия), в статических условиях при температуре 27 °C, в течение 10 суток, с применением симбиотической культуры *Medusomyces gisevii* Sa-12 [8] для высокой производительности гель-плёнок. В качестве контроля использовали полусинтетическую питательную среду.

Завершающей стадией биосинтеза бактериальной наноцелллюзозы является съем гель-плёнок и их промывка. Сушку жемчужно-белых гель-плёнок проводили в лиофильной сублимационной сушилке «HR 7000 M» (Россия) до постоянной массы по методике [17], для расчёта выхода и последующего анализа основных свойств бактериальной наноцелллюзозы. Выход сухой бактериальной наноцелллюзозы рассчитывали формуле (1):

$$W = \frac{m}{c \cdot V \cdot 0,9} \cdot 100 \% \quad (1),$$

где W – выход бактериальной наноцелллюзозы, %;

m – масса образца бактериальной наноцелллюзозы в пересчёте на абсолютно сухое вещество, г;

c – концентрация редуцирующих веществ в среде в пересчёте на глюкозу, г/л;

V – начальный объём среды, л;

0,9 – коэффициент пересчёта, обусловленный отщеплением молекулы воды при полимеризации глюкозы в целллюлозу.

Степень полимеризации образцов бактериальной наноцелллюзозы определяли вискозиметрическим методом [18] с использованием в качестве растворителя кадоксен (ethylenediamine, AO LenReaktiv, CAS No. 107-15-3, Russia; cadmium oxide, AO LenReaktiv, CAS No. 1306-19-0 Russia).

Растровая электронная микроскопия лиофилизованных образцов бактериальной наноцелллюзозы выполнялась с помощью микроскопа JSM-840 (JEOL Ltd., Токио, Япония) с рентгеновским микроанализатором Link-860 серии II с целью установления структуры и определения ширины нановолокна.

Работа выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Компонентный состав необработанных видов сырья представлен в таблице 1. Анализ полученных данных позволяет выделить лидеров по содержанию целлюлозы: волокно конопли – 76,0 %, волокно льна –

66,0 %. Наименьшее количество целлюлозы содержалось в водяном гиацинте – 26,0 %.

Результаты ферментативного гидролиза необработанных видов сырья приведены на рисунке 1.

Таблица 1 – Компонентный состав целлюлозосодержащего сырья без предварительной химической обработки
Table 1 – Component composition of cellulose-containing raw materials without preliminary chemical treatment

Сырьё	Массовая доля, %				
	целлюлозы по Кюршнеру	лигнина	пентозанов	золы	ЖВФ
Тростник	43,00	24,00	18,50	6,69	1,05
Суданская трава	43,00	16,00	19,00	6,42	1,29
Мискантур сахароцветный сорт Сорановский	49,00	17,00	24,00	3,73	0,98
Мискантур гигантский сорт КАМИС	50,00	19,00	21,00	1,63	0,48
Шелуха овса	36,50	19,00	29,00	6,45	0,51
Водяной гиацинт	26,00	12,00	11,00	25,43	1,20
Волокно льна	66,00	11,00	5,00	3,21	1,67
Костра льна	42,00	26,00	18,50	2,80	1,76
Волокно конопли	76,50	5,50	2,50	2,50	2,40
Костра конопли	47,00	23,00	18,00	2,30	0,46

Примечание: ЖВФ – жировосковая фракция.

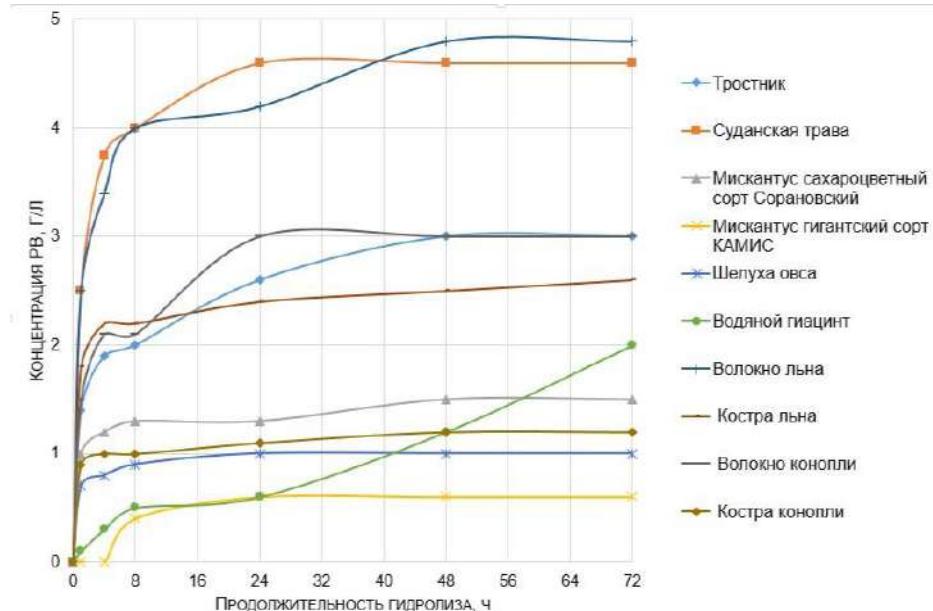


Рисунок 1 – Зависимость концентрации редуцирующих веществ от времени ферментативного гидролиза (сырья без химической предварительной обработки)

Figure 1 – Dependence of the concentration of reducing substances on the time of enzymatic hydrolysis (raw materials without chemical pre-treatment)

В результате гидролиза и анализа рисунка 1, для всех видов сырья была выявлена низкая реакционная способность к ферментативному гидролизу, так как конечная концентрация редуцирующих веществ составила у тростника – 3,0 г/л, суданской травы – 4,6 г/л, мискантуса сахароцветного сорта Сорановский – 1,5 г/л, мискантуса гигантского сорта КАМИС – 1,6 г/л, шелухи овса – 1,0 г/л, водяного гиацинта – 2,0 г/л, волокна льна – 4,8 г/л, костры льна – 2,6 г/л, волокна конопли – 3,0 г/л, костры конопли – 3,0 г/л. Для биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы конечная концентрация редуцирующих веществ рекомендована в пределах 10-20 г/л [7].

В связи с полученными результатами было принято решение произвести предварительную химическую

обработку целлюлозосодержащего сырья щелочной дегидратацией, которая применяется для растительных материалов, содержащих целлюлозу, чтобы повысить реакционную способность при последующем гидролизе. Это достигается за счет уменьшения размера частиц, разрушения кристаллической структуры целлюлозы и удаления лигнина [19,20,21]. После чего целлюлоза под действием ферментного комплекса превращается в целлобиозу, а затем в глюкозу [22]. Компонентный состав полученных субстратов после (предварительной химической обработки сырья) представлен в таблице 2. Полученные результаты показали эффективность предварительной химической обработки, это подтверждается изменением в компонентном составе, а именно повышением содержания целлюлозы в субстратах в 1,7-3,2 раза,

ПОЛУЧЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЗЫ ИЗ РАЗЛИЧНОГО ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

за исключением субстратов из волокна льна и волокна конопли – полученные данные обусловлены особенностю лубяных культур, их морфологией, так, у костры льна после щелочной делигнификации наблюдается увеличение лигнина с 26 % до 37 %, что препятствует ферментативному гидролизу [23, 24].

Наиболее ярко химическая делигнификация проявилась на водяном гиацинте: содержание целлюлозы возросло с 26,0 % до 83,0 %.

Результаты ферментативного гидролиза субстратов приведены на рисунке 2. Очевидно, что щелочная делигнификация повышает реакционную способность целлюлозосодержащего сырья, поскольку конечная концентрация редуцирующих веществ у субстратов, выше, чем у сырья: 4,0–28,0 г/л против 1,0–4,8 г/л. Субстраты разделяются на 2 группы: высокореакционноспособные (тростник – 22,8 г/л, суданская трава – 20,2 г/л, мискантус сахароцветный сорта Сорановский – 25,0 г/л, мискантус гигантский сорта КАМИС – 18,5 г/л, шелуха овса – 23,0 г/л, водяной гиацинт – 22,6 г/л, костра конопли – 28,0 г/л) и низкореакционноспособные (волокно льна – 8,0 г/л, волокно конопли – 6,0 г/л).

Таблица 2 – Компонентный состав целлюлозосодержащего сырья, предварительно химически обработанного щелочной делигнификацией

Table 2 – Component composition of cellulose-containing raw materials, pre-chemically treated by alkaline delignification

Сырьё, обработанное щелочной делигнификацией	Массовая доля, %				
	целлюлозы по Кюршнеру	лигнина	пентозанов	золы	ЖВФ
Тростник	88,00	7,00	3,50	0,97	1,16
Суданская трава	85,00	5,50	7,00	2,09	2,37
Мискантус сахароцветный сорт Сорановский	93,00	5,00	4,00	0,50	1,86
Мискантус гигантский сорт КАМИС	85,00	8,00	2,00	3,95	0,28
Шелуха овса	87,00	5,00	7,00	0,11	0,60
Водяной гиацинт	83,00	19,00	1,40	7,50	2,29
Волокно льна	89,00	10,00	1,00	0,19	1,25
Костра льна	59,00	37,00	3,00	0,7	1,40
Волокно конопли	92,00	6,00	0,40	0,75	0,80
Костра конопли	87,00	8,00	5,00	1,82	0,36

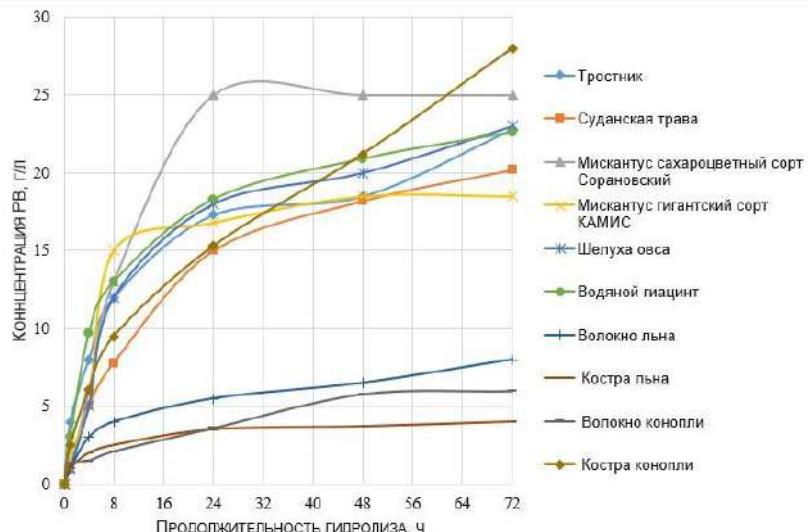


Рисунок 2 – Зависимость концентрации редуцирующих веществ от времени ферментативного гидролиза (сырья, обработанного щелочной делигнификацией)

Figure 2 – Dependence of the concentration of reducing substances on the time of enzymatic hydrolysis (raw materials treated with alkaline delignification)

Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности щелочной делигнификации для большинства рассмотренных источников, кроме волокна льна, костры льна, волокна конопли. Это может быть обусловлено специфичностью строения лубяной культуры, их прочностью и высокой устойчивостью к истиранию и воздействию гидролизующих ферментов [25, 26].

Из данных гидролизатов были приготовлены питательные среды для биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы. Выход бактериальной наноцеллюлозы на контрольной питательной среде и гидролизатах, а также степень полимеризации и ширина нановолокон представлены в таблице 3. Гидролизаты, полученные

лигнификацией повышает реакционную способность целлюлозосодержащего сырья, поскольку конечная концентрация редуцирующих веществ у субстратов, выше, чем у сырья: 4,0–28,0 г/л против 1,0–4,8 г/л. Субстраты разделяются на 2 группы: высокореакционноспособные (тростник – 22,8 г/л, суданская трава – 20,2 г/л, мискантус сахароцветный сорт Сорановский – 25,0 г/л, мискантус гигантский сорт КАМИС – 18,5 г/л, шелуха овса – 23,0 г/л, водяной гиацинт – 22,6 г/л, костра конопли – 28,0 г/л) и низкореакционноспособные (волокно льна – 8,0 г/л, волокно конопли – 6,0 г/л).

из волокна льна, костры льна, волокна конопли, не применялись для биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы в связи с низкой концентрацией редуцирующих веществ.

Лидером по выходу бактериальной наноцеллюлозы и степени полимеризации является водяной гиацинт, а именно 10,7 % и 2200 соответственно. Данные значения являются максимально близки к контрольному образцу: 12,8 % и 3000. Ширина нановолокон 90 нм, полученных на гидролизате водяного гиацинта, близка к 100 нм контроля (на полусинтетической питательной среде). Позитивные полученные данные впервые демонстрируют возможность биосинтеза бактериальной

наноцеллюлозы из водяного гиацинта [27].

Для гидролиза использовали сочетание двух ферментов, так как известно, что ферментативный гидролиз целлюлозы происходит в результате последовательно-параллельного действия нескольких ферментов, входящих в состав так называемого целлюлазного комплекса [28]. Гидролиз целлюлозосодержащего сырья без предварительной химической обработки является неэффективным, и это было доказано в данной работе, так как конечная концентрация редуцирующих веществ составила не более 5 г/л.

Таблица 3 – Характеристики образцов бактериальной наноцеллюлозы

Table 3 – Characteristics of bacterial nanocellulose samples

Субстрат для получения БНЦ	Выход, %	СП	Ширина нановолокон, нм
Контроль	12,8	3000	100
Тростник	5,7	1150	70
Суданская трава	3,1	1300	50
Мискантус сахароцветный	9,7	700	35
Мискантус гигантский	3,0	1050	40
Шелуха овса	4,9	900	46
Водяной гиацинт	10,7	2200	90
Костра конопли	5,3	1100	80
Примечание: БНЦ – бактериальная наноцеллюлоза; СП – степень полимеризации; Контроль – бактериальная наноцеллюлоза, полученная на полусинтетической питательной среде.			

Степень полимеризации опытных образцов бактериальной наноцеллюлозы в среднем составила 850, что в 3,5 раза ниже степени полимеризации бактериальной наноцеллюлозы, полученной на полусинтетической питательной среде.

С помощью растровой электронной микроскопии была обнаружена сетчатая наноразмерная структура для всех экспериментальных образцов, являющаяся отличительной характерной особенностью бактериальной наноцеллюлозы. При этом, для контрольного образца ширина нановолокон составила 100 нм, а для образцов, полученных на гидролизатах, 60 нм. Полученные данные совпадают с литературными [29]. Таким образом, нами было показано, что симбиоз *Mediostomus gisevii* Sa-12 может адаптироваться к разным условиям биосинтеза и питательным средам, сохранив свою уникальную наноструктуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что целлюлозосодержащее сырье необходимо подвергать предварительной химической обработке для повышения реакционной активности субстратов к ферментативному гидролизу для обеспечения необходимой концентрации редуцирующих веществ в питательной среде. Щелочная делигнификация повысила конечную концентрацию редуцирующих веществ для тростника в 5,0 раз, суданской травы – 4,5 раза, мискантуса сахароцветного сорта Сорановский – 16,0 раз, мискантуса гигантского сорта КАМИС – 11,5

раз, шелухи овса – 23,0 раза, водяного гиацинта – 11,3 раза, волокна льна – 1,6 раз, костры льна – 1,5 раза, волокна конопли – 2,0 раза, костры конопли – 9,3 раза. Эти результаты показывают, что щелочная делигнификация неэффективна только для трёх источников (волокна льна, костры льна, волокна конопли). Эти явления обусловлены специфичностью строения лубяной культуры, их прочностью и высокой устойчивостью к воздействию гидролизующих ферментов.

Самый высокий выход бактериальной наноцеллюлозы, а именно 10,7 %, был получен на питательной среде из гидролизата продукта щелочной делигнификации водяного гиацинта. Данная обработка позволила повысить содержание целлюлозы в субстрате в 3,2 раза, затем повысить конечную концентрацию при ферментативном гидролизе в 11,3 раза по сравнению с не обработанным сырьём. Степень полимеризации бактериальной наноцеллюлозы из водяного гиацинта максимальная из всех источников и составила 2200. Ширина нановолокон так же наиболее близка к контролю и составила 90 нм. Таким образом, в данной статье впервые описано получение бактериальной наноцеллюлозы из водяного гиацинта, причём с выходом и качественными характеристиками, близкими к контролю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cañas-Gutiérrez A. et al. Health and toxicological effects of nanocellulose when used as a food ingredient: A review //Carbohydrate Polymers. 2024. Vol. 323. P. 121382. doi: 10.1016/j.carbpol.2023.121382.
2. Sharma C., Bhardwaj N. K. Bacterial nanocellulose: Present status, biomedical applications and future perspectives //Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 104. P. 109963. doi: 10.1016/j.msec.2019.109963.
3. de Paiva G. M. et al. Bacterial nanocellulose produced as a by-product of the brewing industry and used as an adsorbent for synthetic solutions of Co (II), Cu (II), Ni (II) AND Fe (III) //Journal of Polymers and the Environment. 2024. Vol. 32. №. 12. P. 6803-6819. doi: 10.1007/s10924-024-03389-0.
4. Pasaribu K. M. et al. A review: Current trends and future perspectives of bacterial nanocellulose-based wound dressings //International Journal of Biological Macromolecules. 2024. P. 135602. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135602.
5. Katyal M. et al. Bacterial cellulose: Nature's greener tool for industries //Biotechnology and Applied Biochemistry. 2023. Vol. 70. №. 5. P. 1629-1640. doi: 10.1002/bab.2460.
6. Núñez D. et al. Toward biomanufacturing of next-generation bacterial nanocellulose (BNC)-based materials with tailored properties: A review on genetic engineering approaches //Biotechnology Advances. 2024. P. 108390. doi: 10.1016/j.biotechadv.2024.108390.
7. Скиба Е.А. и др. Ферментативный гидролиз высококонцентрированных субстратов, полученных из мискантуса гигантского/ Е.А. Скиба и др. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. № 3. С. 394-405. doi: 10.21285/achb.933.
8. Skiba E. A. et al. Biosynthesis of Bacterial Nanocellulose from Low-Cost Cellulosic Feedstocks: Effect of Microbial Producer. International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24. № 18. P. 14401. doi: 10.3390/ijms241814401.
9. Alimardani Y. et al. Prospective and applications of bacterial nanocellulose in dentistry. Cellulose. 2024. Vol. 31. № 13. P. 7819-7839. doi: 10.1007/s10570-024-06098-y.
10. Hou Y. et al. Functional bacterial cellulose membranes with 3D porous architectures: Conventional drying, tunable wettability and water/oil separation. Journal of membrane science. 2019. Vol. 591. P. 117312. doi: 10.1016/j.memsci.2019.117312.
11. Luo H. et al. Uniformly dispersed freestanding carbon nanofiber/graphene electrodes made by a scalable biological method for high-performance flexible supercapacitors.

ПОЛУЧЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РАЗЛИЧНОГО ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Advanced Functional Materials. 2018. Vol. 28. № 48. Р. 1803075. doi: 10.1002/adfm.201803075.

12. Скиба Е.А. Материальный баланс процессов получения биотехнологических продуктов из биомассы мискантуса гигантского/ Скиба Е.А. // Актуальная биотехнология. 2024. №. 3, Р. 39-41. doi: 10.20914/2304-4691-2024-3-39-41.

13. Ovchinnikova E.V. et al. Bioprocessing of oat hulls to ethylene: Impact of dilute HNO₃ or NaOH-pretreatment on process efficiency and sustainability. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2021. Vol. 9. №. 49. Р. 16588-16596. doi: 10.1021/acssuschemeng.1c05112.

14. Зенкова А.А., Гладышева Е.К., Шавыркина Н.А. Обоснование выбора концентрации ацетатного буфера при ферментативном гидролизе шелухи овса для биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности. Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Бийск. – 18–20 мая 2022 года. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, им. И.И. Ползунова, 2022. С. 297-300. doi: 10.25699/tohbrpp.2022.6.0.85. 032.

15. Кащеева Е. И., Будаева В.В. Определение реакционной способности к ферментативному гидролизу целлюлозосодержащих субстратов. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т.84. № 10. С. 5-11. doi: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-5-11.

16. Гладышева Е.К., Кащеева Е.И. Биотехнологическая трансформация мискантуса сорта Камис в высокочищенную бактериальную наноцеллюлозу // Материалы IV Международного биотехнологического форума BIOAsia-Altai (23-28 сентября 2024 г., – Барнаул. Изд-во Алтайского государственного университета, 2024. BIOAsia-Altai. Т. 4. №. 1. С. 412-416.

17. Павлов И. Н., Кузнецова П. С., Шилов А. И. Исследование процесса сублимационной сушки бактериальной наноцеллюлозы // Ползуновский вестник. 2020. №. 4. С. 88-94. doi: 10.25712/astu.2072-8921.2020.04.017.

18. Bogolitsyn K., Parshina A., Aleshina, L. Structural features of brown algae cellulose. Cellulose. 2020. Vol. 27. №. 17. Р. 1-14. doi: 10.1007/s10570-020-03485-z.

19. Osipov D.O. et al. Comparative Study of the Convertibility of Pretreated Miscanthus Straw Using Enzyme Preparations Produced by Different Recombinant Strains of *Penicillium verruculosum*. Agronomy. 2024. Vol. 14. №. 3. Р. 499. doi: 10.3390/agronomy14030499.

20. Fansuri H. et al. A Review of the Technological Aspects and Process Optimization of Bioethanol Production From Corn Stover Biomass: Pretreatment Process, Hydrolysis, Fermentation, Purification Process, and Future Perspective //Environmental Quality Management. 2024. Vol. 34. №. 2. Р. e22336. doi: 10.1002/tqem.22336.

21. Riese R. S. et al. Agricultural wastes: a practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries //Industrial Crops and Products. 2024. Vol. 208. Р. 117904. doi: 10.1016/j.indcrop.2023.117904.

22. Chauhan A. S. et al. Strategies for Overcoming the Inhibition of Cellulose Hydrolysis //Handbook of Biorefinery Research and Technology: Biomass Logistics to Saccharification. Dordrecht : Springer Netherlands. 2024. Р.1001-1021. doi: 10.1007/978-94-007-6308-1_70.

23. Кокшаров С.А., Алеева С.В., Калинин Е.Н. Сопоставление строения лигнина в лубяной и древесной частях льняного стебля и его превращений в присутствии серосодержащих восстановителей // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. 2024. Т. 67. № 9. С. 90-102. doi: 10.6060/ivkkt.2 0246709.7037.

24. Лаврентьева Е.П., Санина О.К., Белоусов Р.О. Глубокая переработка лубяных волокон – путь к возрождению национальных традиций России. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. Vol.3. Р. 130-139. doi: 10.47367/0021-3497_2022_3_130.

25. Свиридов А. С., Чаплыгин М. Е., Попов Р. А. Исследование стойкости стеблей лубяных культур к абразивному истиранию //Агронженерия. 2024. Т. 26. №. 6. С. 4-10. doi: 10.26897/2687-1149-2024-6-4-10.

26. Макарова Е. И., Денисова М. Н. Ферментолиз недревесного сырья и образцов гидротропной целлюлозы, полученных из него //Ползуновский вестник. 2014. №. 3. С. 123-126.

27. Smriti S. A. et al. Recent developments of the nanocellulose extraction from water hyacinth: A review //Cellulose. 2023. Vol. 30. №. 14. С. 8617-8641. doi: 10.1007/s10570-023-05374-7.

28. Шубаков А.А., Михайлова Е.А., Мартынов В.В. Биоконверсия целлюлозосодержащего сырья. Ферментативный гидролиз целлюлозы (обзор). Труды Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. 2022. №. 4. С. 27-38. doi: 10.19110/1994-5655-2022-4-27-38.

29. Sakovich G.V. et al. Chemical aspects of bacterial nanocellulose. Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2018. Vol. 11. № 4. Р. 531-542. doi: 10.17516/1998-2836-0097.

Информация об авторах

А. А. Зенкова, инженер лаборатории биоконверсии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук.

REFERENCES

1. Cañas-Gutiérrez, A. & et al. (2024). Health and toxicological effects of nanocellulose when used as a food ingredient: A review. Carbohydrate Polymers, (323), 121382. (In the UK). doi: 10.1016/j.carbpol.2023.121382.
2. Sharma, C., & Bhardwaj, N.K. (2019). Bacterial nanocellulose: Present status, biomedical applications and future perspectives. Materials Science and Engineering, (104), 109963. (In Netherlands). doi: 10.1016/j.msec.2019.109963.
3. Paiva, G.M. & et al. (2024). Bacterial nanocellulose produced as a by-product of the brewing industry and used as an adsorbent for synthetic solutions of Co (II), Cu (II), Ni (II) AND Fe (III). Journal of Polymers and the Environment, (32), № 12, 6803-6819. (In USA). doi: 10.1007/s10924-024-03389-0.
4. Pasaribu, K.M. & et al. (2024). A review: Current trends and future perspectives of bacterial nanocellulose-based wound dressings. International Journal of Biological Macromolecules, 135602. (In Japan). doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135602.
5. Katyal, M. & et al. (2023). Bacterial cellulose: Nature's greener tool for industries. Biotechnology and Applied Biochemistry, (70), №. 5, 1629-1640. (In USA). doi: 10.1002/bab.2460.
6. Núñez, D. & et al. (2024). Toward biomanufacturing of next-generation bacterial nanocellulose (BNC)-based materials with tailored properties: A review on genetic engineering approaches. Biotechnology Advances, 108390. (In Holland). doi: 10.1016/j.biotechadv.2024.108390.
7. Skiba, E.A. et al. (2024). Enzymatic hydrolysis of highly concentrated substrates obtained from giant miscanthus. Izvestiya vuzov. Applied Chemistry and Biotechnology, 14 (3), 394-405. (In Russ.). doi: 10.21285/achb.933.
8. Skiba, E.A. & et al. (2023). Biosynthesis of Bacterial Nanocellulose from Low-Cost Cellulosic Feedstocks: Effect of Microbial Producer. International Journal of Molecular Sciences, (24), № 18, 14401. (In Switzerland). doi: 10.3390/ijms241814401.
9. Alimardani, Y. & et al. (2024). Prospective and applications of bacterial nanocellulose in dentistry. Cellulose, (31), № 13, 7819-7839. (In Netherlands). doi: 10.1007/s10570-024-06098-y.
10. Hou, Y. & et al. (2019). Functional bacterial cellulose membranes with 3D porous architectures: Conventional

drying, tunable wettability and water/oil separation. *Journal of membrane science*, (591), 117312. (In Netherlands). doi: 10.1016/j.memsci.2019.117312.

11. Luo, H. & et al. (2018). Uniformly dispersed free-standing carbon nanofiber/graphene electrodes made by a scalable biological method for high-performance flexible supercapacitors. *Advanced Functional Materials*, (28), № 48, 1803075. (In Germany). doi: 10.1002/adfm.201803075.

12. Skiba, E.A. (2024). The material balance of the processes of obtaining biotechnological products from the biomass of giant miscanthus. *Actual Biotechnology*, (3), 39-41. (In Russ.). doi: 10.20914/2304-4691-2024-3-39-41.

13. Ovchinnikova, E.V. & et al. (2021). Bioprocessing of oat hulls to ethylene: Impact of dilute HNO₃- or NaOH-pre-treatment on process efficiency and sustainability. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2021; 9(49), 16588-16596. (In USA). doi: 10.1021/acssuschemeng.1c05112.

14. Zenkova, A.A., Gladysheva, E.K., Shavyrkina, N.A. (2022). Substantiation of the choice of acetate buffer concentration during enzymatic hydrolysis of oat husks for bacterial nanocellulose biosynthesis // Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries. Proceedings of the XV All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and Young scientists with international participation. Biysk. – May 18-20, 2022. – Biysk: Publishing House of Alt. State Technical University. I.I. Polzunov University, 297-300. (In Russ.). doi:10.25699/tohbipp.2022.6.085.032.

15. Kashcheeva, E.I., Budaeva, V.V. (2018). Determination of reactivity to enzymatic hydrolysis of cellulose-containing substrates. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 84 (10), 5-11. (In Russ.).doi: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-5-11.

16. Gladysheva, E.K., Kashcheeva, E.I. (2024). Biotechnological transformation of miscanthus of the Kamis variety into highly valuable bacterial nanocellulose // Proceedings of the IV International Biotechnological Forum BIOAsia–Altai (September 23-28, 2024, Barnaul. Publishing House of Altai State University, 2024. BIOAsia-Altai, 4 (1), 412-416. (In Russ.).

17. Pavlov, I. N., Kuznetsov, P. S., Shilov, A. I. (2020). Investigation of the freeze-drying process of bacterial nanocellulose // *Polzunovsky bulletin*. (4). 88-94. (In Russ.). doi: 10.25712/astu.2072-8921.2020.04.017.

18. Bogolitsyn, K., & Parshina, A., Aleshina, L. (2020). Structural features of brown algae cellulose. *Cellulose*, 27(17), 1-14. (In Netherlands). doi: 10.1007/s10570-020-03485-z.

19. Osipov, D.O. & et al. (2024). Comparative Study of the Convertibility of Pretreated Miscanthus Straw Using Enzyme Preparations Produced by Different Recombinant Strains of *Penicillium verruculosum*. *Agronomy*. (14), №. 3, 499. (In Switzerland). doi: 10.3390/agronomy14030499.

20. Fansuri, H. & et al. (2024) A Review of the Technological Aspects and Process Optimization of Bioethanol Production From Corn Stover Biomass: Pretreatment Process, Hydrolysis, Fermentation, Purification Process, and Future Perspective // *Environmental Quality Management*. (34), №. 2, e22336. (In USA). doi: 10.1002/tqem.22336.

21. Riseh, R.S. & et al. (2024). Agricultural wastes: a practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries // *Industrial Crops and Products*. (208), 117904. (In Netherlands). doi: 10.1016/j.indcrop.2023.117904.

22. Chauhan, A.S. & et al. (2024). Strategies for Overcoming the Inhibition of Cellulose Hydrolysis // *Handbook of Biorefinery Research and Technology: Biomass Logistics to Saccharification*. Dordrecht : Springer Netherlands. 1001-1021. (In Germany). doi: 10.1007/978-94-007-6308-1_70.

23. Koksharov, S.A., Aleeva, S.V., Kalinin, E.N. (2024). Comparison of the structure of lignin in the bast and woody parts of the flax stem and its transformations in the presence of sulfur-containing reducing agents // *News of higher educational institutions. Chemistry and Chemical Technology series*. 67 (9). 90-102. (In Russ.). doi :10.6060/ivkkt.2 0246709.7037.

24. Lavrentieva, E.P., Sanina, O.K., Belousov, R.O. (2022). Deep processing of bast fibers is the way to revive Russia's national traditions. *News of higher educational institutions. Textile Industry Technology*, (3), 130-139. (In Russ.). doi: 10.47367/0021-3497_2022_3_130.

25. Sviridov, A.S., Chaplygin, M.E., Popov, R.A. (2024). Investigation of the resistance of stems of bast crops to abrasive abrasion // *Agroengineering*. 26 (6), 4-10. (In Russ.). doi: 10.26897/2687-1149-2024-6-4-10.

26. Makarova, E.I., Denisova, M.N. (2014). Fermentation of non-wood raw materials and samples of hydrotrropic cellulose obtained from it. *Polzunovsky vestnik*, (3), 123-126. (In Russ.).

27. Smriti, S.A. & et al. (2023). Recent developments of the nanocellulose extraction from water hyacinth: A review // *Cellulose*. 30 (14), 8617-8641. (In Netherlands). doi: 10.1007/s10570-023-05374-7.

28. Shubakov, A.A., Mikhailova, E.A., Martynov, V.V. (2022). Bioconversion of cellulose-containing raw materials. Enzymatic hydrolysis of cellulose (review). *Proceedings of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 4, 27-38. (In Russ.). doi: 10.19110/1994-5655-2022-4-27-38.

29. Sakovich, G.V. & et al. (2018). Chemical aspects of bacterial nanocellulose. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 11 (4), 531-542. (In Germany). doi: 10.17516/1998-2836-0097.

Information about the authors

A. A. Zenkova, Engineer of the Bioconversion Laboratory, Institute for Problems of Chemical and Energy Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS).

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

Статья поступила в редакцию 12 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 12 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 621.762.2
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.036

EDN: RWNPYV

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРОФАЗООБРАЗОВАНИЯ В АКТИВИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ Ti-AL ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНОМ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Валерий Юрьевич Филимонов¹, Марина Владимировна Логинова²,
Алексей Викторович Собачкин³, Александр Андреевич Ситников⁴,
Владимир Иванович Яковлев⁵, Андрей Юрьевич Мясников⁶,
Алексей Зеновьевич Негодяев⁷, Александр Андреевич Розный⁸

^{1, 2, 3, 3, 4, 5, 6, 7, 8} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

⁶ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

¹ vyfilimonov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

² logi_m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6518-3598>

³ sobalvi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9159-1122>

⁴ sitalan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4023-0869>

⁵ yak1961@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5635-5981>

⁶ myasnickov.andre@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3289-9087>

⁷ anicpt@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7135-263X>

⁸ alex.rozny@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8603-5874>

Аннотация. В представленной работе проведено изучение процессов структурообразования в предварительно механоактивированных порошковых смесях составов $Ti + Al$, $Ti + 3Al$ в условиях ударно-волнового воздействия. На первой стадии исследования порошковые смеси подвергались механической активации в шаровой мельнице «Активатор-2SL». На второй стадии полученные механокомпозиты были подвержены термическому воздействию в режимах низкотемпературного спекания и теплового взрыва. На третьем этапе полученные прекурсоры подвергались ударно-волновому воздействию. Установлено, что в результате реализации третьего этапа структурное состояние смеси существенно зависит от режимов термического воздействия на исходные механокомпозиты. При этом в полученных продуктах можно выделить два предельных структурных состояния – от полной аморфизации до полной кристаллизации. Последнее может определяться степенью стабильности кристаллических решеток в результате механоактивации и термического воздействия. Полученные результаты могут дать возможность управления структурно-фазовым состоянием продуктов детонационно-газового напыления, что может быть важным с точки зрения технологии нанесения защитных покрытий.

Ключевые слова: алюминиды титана, механическая активация, термическое воздействие, структура, фазовый состав, степень кристалличности

Благодарности: работа выполнялась в рамках государственного Задания FZMM-2023-0003

Для цитирования: Особенности процессов структурообразования в активированных порошковых смесях $Ti-Al$ при экстремальном термическом воздействии / В. Ю. Филимонов [и др.]. // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 231–236. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.036. EDN: <https://elibrary.ru/RWNPYV>.

Original article

FEATURES OF STRUCTURE AND PHASE FORMATION PROCESSES IN ACTIVATED Ti-AL POWDER MIXTURES UNDER EXTREME THERMAL CONDITIONS

Valery Yu. Filimonov¹, Marina V. Loginova², Alexey V. Sobachkin³,
Alexander A. Sitnikov⁴, Vladimir I. Yakovlev⁵, Andrey Yu. Myasnikov⁶,
Alexey Z. Negodyaev⁷, Alexander A. Roznyj⁸

^{1, 2, 3, 3, 4, 5, 6, 7, 8} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ Institute for Water and Environment Problems SB RAS, Barnaul, Russia

© Филимонов В. Ю., Логинова М. В., Собачкин А. В., Ситников А. А., Яковлев В. И., Мясников А. Ю., Негодяев А. З., Розный А. А., 2025

⁶ Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹ vyfilimonov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0229-7058>

² logi_m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6518-3598>

³ sobalvi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9159-1122>

⁴ sitalan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4023-0869>

⁵ yak1961@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5635-5981>

⁶ myasnickov.andre@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3289-9087>

⁷ anicpt@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7135-263X>

⁸ alex.rozny@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8603-5874>

Abstract. In this paper, the processes of structure formation in mechanoactivated powder mixtures of Ti + Al, Ti + 3Al compositions under shock wave conditions are studied. At the first stage of the study, powder mixtures were mechanically activated in an «Activator-2SL» ball mill. At the second stage, the obtained mechanocomposites were subjected to thermal effects in the modes of low-temperature sintering and thermal explosion. At the third stage, the obtained precursors were subjected to shock wave action. It is established that as a result of the implementation of the third stage, the structural state of the mixture significantly depends on the modes of thermal action on the initial mechanocomposites. At the same time, two limiting structural states can be distinguished in the obtained products – from complete amorphization to complete crystallization. The latter may be determined by the degree of stability of the crystal lattices as a result of mechanical activation and thermal effects. The results obtained may make it possible to control the structural and phase state of detonation-gas sputtering products, which may be important from the point of view of protective coating technologies.

Keywords: titanium aluminides, mechanical activation, thermal effect, structure, phase composition, degree of crystallinity.

Acknowledgements: this study was supported by Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (FZMM-2023-0003).

For citation: Filimonov, V. Yu., Loginova, M. V. Sobachkin, A. V., Sitnikov, A. A., Yakovlev, V. I., Myasnikov, A. Yu., Negodyaev, A. Z. & Roznyj, A. A. (2025). Features of structure and phase formation processes in activated Ti-Al powder mixtures under extreme thermal conditions. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 231-236. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.036. EDN: <https://elibRARY.ru/RWNPYV>.

ВВЕДЕНИЕ

Получение износостойких защитных покрытий деталей и узлов машин является одной из важных задач современного материаловедения. Одним из способов нанесения покрытий является детонационно-газовое напыление (ДГН), которое отличается от других способов, прежде всего, высокой скоростью частиц напыляемого порошка за счет энергии детонации газовой смеси [1-4]. К преимуществам ДГН следует отнести высокую адгезию покрытия и его низкую пористость [5-7]. Для получения покрытий, обладающих комплексом взаимодополняющих характеристик, как правило, используются многокомпонентные сплавы или частицы, имеющие сложную матричную структуру [8, 9]. С этой точки зрения чрезвычайно важным является вопрос о взаимосвязи структуры, состава и свойств напыляемого материала и нанесенного покрытия [10]. Ударно волновое воздействие на частицы может приводить к изменению как макро- так и микроструктуры материала, т.е. к фазовым переходам, химическим реакциям, формированию растворов и метастабильных фаз и т.д. При этом состояние напыляемых частиц в процессе движения до основы для напыления практически невозможно контролировать. Таким образом, известно состояние материала до напыления и в результате процесса ДГН, однако промежуточное состояние является «черным ящиком».

В последние десятилетия для получения порошковых гетероструктур широко используется метод механической активации (МА) для бинарных и многокомпонентных смесей [11-17]. Результатом механоактивационного воздействия, чаще всего, является формирование сложных гетерогенных образований, имеющих матричную структуру. При этом реакционная способность компонентов повышается за счет целого ряда факторов, в частности, высокой концентрации неравновесных дефектов и большой удельной поверхности контакта реагентов. Для таких систем в

работе [18] предложен метод изучения промежуточных структур при ударно-волновом воздействии на основе установки для ДГН. В приведенном исследовании данную установку было предложено использовать как реактор для проведения синтеза композиционных материалов. При этом наличие основы для напыления не рассматривается, после выхода из ствола установки частицы пролетают значительное расстояние и охлаждаются. Для этих целей использовались специальные порошковые «ловушки». Ударно-волновой нагрев частиц механокомпозитов позволил провести реакции синтеза в механически активированной смеси состава Ti + Al в неравновесных условиях при высоком давлении, сверхбыстрых скоростях нагрева и охлаждения в режиме детонирующих газовых смесей. В работе показано, что продуктами синтеза являются интерметаллические фазы TiAl, TiAl₃, Ti₃Al. Полученный продукт можно рассматривать как многофазный, с частично упорядоченной структурой, имеющую аморфную и кристаллическую составляющую. Однако можно предположить, что сформировавшиеся в результате экстремального воздействия гетероструктуры будут зависеть от состояния исходных прекурсоров, в частности, от возможного предварительного термического воздействия. Действительно, в зависимости от режимов предварительного нагрева смеси могут получиться материалы с разным содержанием фаз и различной степенью кристалличности. Таким образом, может появиться возможность управления структурой и свойствами покрытий, полученных из различных прекурсоров и в различных режимах их предварительной подготовки. Исходя из изложенного, целью настоящей работы является изучение влияния характеристик исходных прекурсоров, полученных в результате механической активации с последующим отжигом, на состав и структуру соответствующих материалов, полученных в результате ударно-волнового воздействия.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРОФАЗООБРАЗОВАНИЯ В АКТИВИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ Ti-AL ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНОМ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

МЕТОДЫ

Для получения механокомпозитов использовались порошковые смеси составов Ti + Al, Ti + 3Al из порошков титана ПТХ-7-2 со средним размером частиц 80 мкм и порошков алюминия АСД-1 со средним размером 20 мкм. Для получения прекурсоров применялась планетарная шаровая мельница «Активатор-2SL». Отношение массы исходной порошковой смеси к массе мелющих тел составляло 1:20, время механической активации (MA) – 11 мин. при энергонапряженности мельницы 50 г. Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре ДРОН-8 с CuK_{α} -излучением ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). Для изучения результатов термического воздействия на активированную смесь использовался цилиндрический реактор с нагревателем из никромовой проволоки. Изменения режимов нагрева производились с помощью трансформатора, что позволяло плавно менять инициирующую мощность нагрева активированной порошковой смеси, находящейся в объеме цилиндра. Экспериментальный комплекс для реализации ударно-волнового воздействия на прекурсоры подробно описан в [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены дифрактограммы исходной и активированных смесей. Как следует из рисунка, каких-либо соединений на основе алюминия и титана не наблюдается. Рост времени механоактивационной обработки сопровождается снижением интенсивности дифракционных пиков и их уширением, что, как известно, определяется уменьшением размеров зерен и ростом концентрации неравновесных дефектов структуры [19].

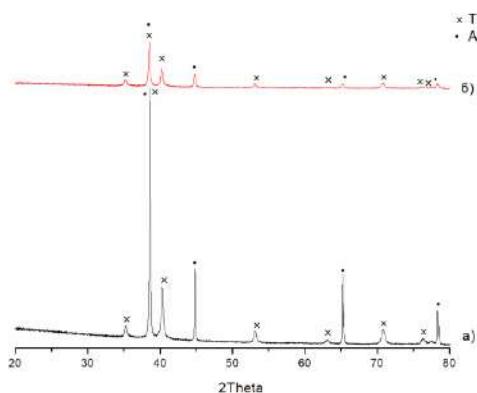


Рисунок 1 – Дифрактограммы порошковых смесей до (а) и после 11 мин. механоактивации (б)

Figure 1 – Diffractograms of powder mixtures before (a) and after 11 min. mechanical activation (b)

Далее механически активированные смеси различного состава были подвергены термическому воздействию при различных режимах нагрева (рисунок 2). Вполне очевидно, что синтез в докритических режимах 1 и 2 является твердофазным (температура плавления алюминия составляет 660°C).

На рисунке 3 представлены диаграммы относительного содержания исходных компонентов и продуктов как результат синтеза в различных режимах. Расчет содержания проводился на основе количественного анализа дифрактограмм продуктов синтеза с использованием методики [20].

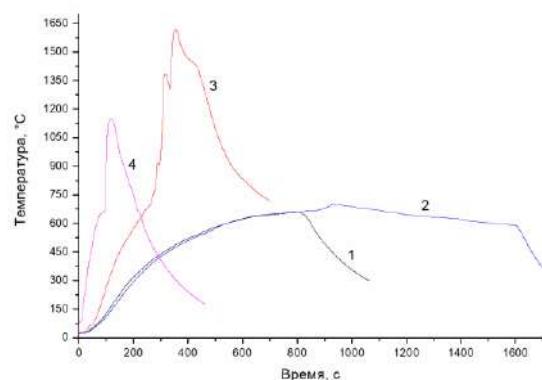


Рисунок 2 – Термограммы разогрева активированных смесей:
1 – состав Ti + Al, докритический режим, время выдержки 5 мин. при 640°C ; 2 – состав Ti + Al, докритический режим, время выдержки 30 мин. при 640°C ; 3 – состав Ti + Al, посткритический режим (тепловой взрыв); 4 – состав Ti + 3Al, тепловой взрыв

Figure 2 – Thermograms of heating of activated mixtures:
1 – Ti + Al, subcritical mode, exposure time 5 min. at 640°C ;
2 – Ti + Al, subcritical mode, exposure time 30 min. at 640°C ;
3 – Ti + Al, post-critical mode (thermal explosion);
4 – Ti + 3Al, thermal explosion

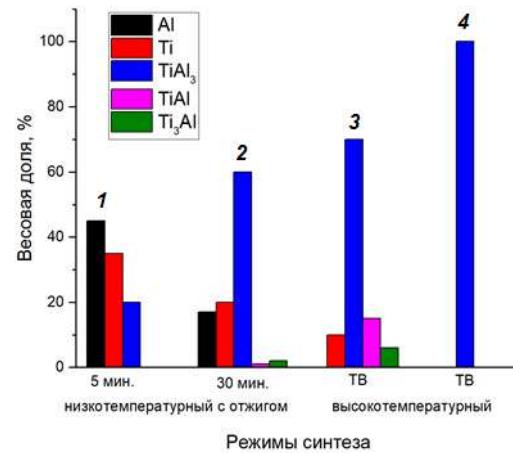


Рисунок 3 – Относительное содержание зафиксированных фаз в продуктах реакции в разных режимах синтеза. Нумерация диаграмм соответствует режимам, представленным на рисунке 2

Figure 3 – The relative content of fixed phases in the reaction products in different synthesis modes. The numbering of the diagrams corresponds to the modes shown in Figure 2

Как следует из полученных результатов, охлажденные образцы содержат разное количество синтезированных фаз и исходных реагентов. Для образца 1 (5 мин. отжига) характерно большое количество непрореагировавших компонентов Ti + Al. При этом наблюдается незначительное количество триалюминида титана. При более продолжительном отжиге (30 мин.) количество исходных реагентов в продукте уменьшается, при этом содержание соединения TiAl₃ значительно увеличивается. В этом же режиме отжига появляются зародыши фаз TiAl и Ti₃Al, что соответствует диаграмме состояния [21]. При переходе в режим теплового взрыва в продуктах синтеза не содержится остаточный алюминий, доминирующей фазой

зой является соединение $TiAl_3$, при этом содержание соединений $TiAl$ и Ti_3Al возрастает. Продукт содержит непрореагировавший титан. При реализации высокотемпературного синтеза в смеси состава $Ti + 3Al$ продукт является строго монофазным состава $TiAl_3$.

На следующем этапе исследования синтезированные прекурсоры были подвергены ударно-волновому воздействию с использованием установки, описанной в [18]. Для реализации воздействия использовалась пропан-бутан кислородная смесь при соотношении газов 1:3. На рисунке 4 приведены дифрактограммы образцов, полученных в результате ударно-волнового воздействия.

Как следует из структуры дифрактограмм, соответствующих режимам синтеза 3 и 4, после экстремального термического воздействия на синтезированный монофазный $TiAl_3$ продукт сохранил свой состав и на всех дифрактограммах идентифицируются узкие пики соединения $TiAl_3$. На малых углах наблюдается небольшое по значениям интенсивности рентгеноаморфное гало, свидетельствующее о незначительной аморфизации, что может быть связано с плавлением порошка мелкой фракции (<50 мкм). Продукт ударно-волнового воздействия на смесь, синтезированной в режиме 1, находится в полностью аморфном состоянии.

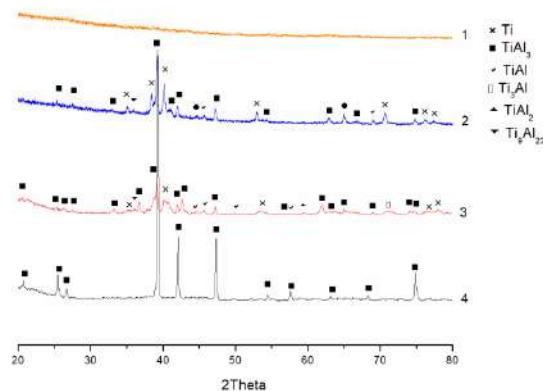
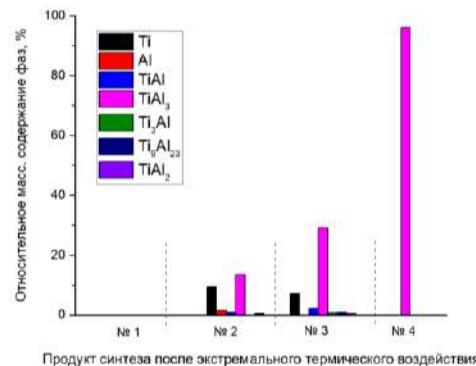


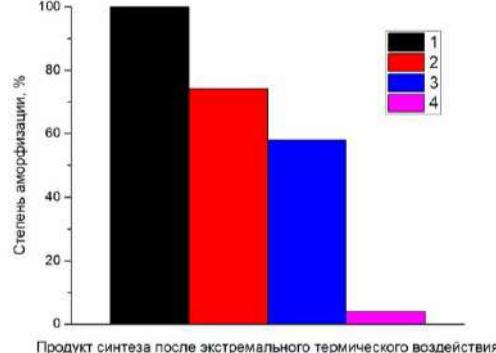
Рисунок 4 – Дифрактограммы продуктов, полученных в проточном реакторе импульсного действия

Figure 4 – Diffractograms of products obtained in a pulsed flow reactor



а)

Рисунок 5 – Влияние ударно-волнового воздействия на формирование аморфно-кристаллической структуры в образцах, синтезированных в режимах 1-4: а) относительное содержание фаз после воздействия



б)

б) соответствующая степень аморфизации

Figure 5 – The effect of shock wave action on the formation of an amorphous crystal structure in samples synthesized in modes 1-4: a) the relative content of phases after exposure, b) the corresponding degree of amorphization

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРОФАЗООБРАЗОВАНИЯ В АКТИВИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ Ti-Al ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНОМ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях ударно-волнового импульсного воздействия из предварительно синтезированных прекурсоров получены продукты различного фазового состава, имеющие частично упорядоченную структуру, содержащую кристаллическую и аморфную составляющие (с разной степенью аморфизации). Входящие в составы основные интерметаллические соединения $TiAl_3$, Ti_3Al , $TiAl$ находятся в неравновесном состоянии. Содержание аморфной составляющей в полученных продуктах зависит от фазового состава исходных образцов и режимов термического воздействия. Самое высокое содержание аморфной составляющей (от 80 % – до полной аморфизации) зафиксировано в материалах, полученных после высокотемпературного воздействия на прекурсоры, имеющие в своем исходном составе алюминий и титан, а также зародыша интерметаллидных фаз, находящихся в разупорядоченном состоянии, которые, из-за термодинамической нестабильности, гораздо быстрее претерпевают изменения от кристаллической структуры до аморфной фазы. После ударно-волнового воздействия на прекурсоры, полученные высокотемпературным синтезом и имеющие в своем составе сформировавшиеся хорошо окристаллизованные фазы, наблюдается более низкая степень аморфизации (от 45 до 60 %) в зависимости от режимов воздействия. После высокотемпературного воздействия на прекурсоры монофазного состава $TiAl_3$ степень аморфизации составляет порядка 3 %. Полученные результаты открывают возможности управления структурно-фазовым состоянием продуктов ДГН, что может быть важным с точки зрения технологий нанесения защитных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для вузов. Москва : Металлургия, 1992. 432 с.
2. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационного газового напыления покрытий. Москва : Наука, 1978. 224 с.
3. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григорьев А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Ленинград : Машиностроение, 1982. 215 с.
4. Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. Детонационное нанесение покрытий. Ленинград : Судостроение. 1979. 178 с.
5. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование) : учеб. пособие для студ. вузов. Москва : Издательство ИНДИКА, 2004. 623 с.
6. Computer-Controlled Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications / V. Ulianitsky [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20. P. 791–801. doi 10.1007/s11666-011-9649-6.
7. Kharlamov Y.A. Detonation spraying of protective coatings // Materials Science and Engineering. 1987. Vol. 93. P. 1-37. doi 10.1016/0025-5416(87)90409-5.
8. Solidification Mechanism of the D-Gun Sprayed Fe-Al Particles / W. Wolczynski [et al.] // Archives of Metallurgy and Materials. 2017. Vol. 62, Iss. 4. P. 2391-2397. doi 10.1515/AMM-2017-0352.
9. Detonation spraying of Ti-Cu mixtures in different atmospheres: Carbon, nitrogen and oxygen uptake by the powders / A.A. Shterzer [et al.] // Surfaces and Interfaces. 2020. Vol. 21. P. 100676. doi 10.1016/j.surfin.2020.100676.
10. Obtained of powder coatings by detonation spraying / D.B. Buitkenov [et al.] // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. 2020. Vol. 4, No. 3. Article 6. doi 10.29317/ejpm.2020040306.
11. Rogachev A.S., Mukasyan A.S. Combustion for material synthesis. London : CRC Press, 2014. 424 p. doi 10.1201/b17842.
12. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings / E. A. Levashov [et al.] // International Materials Reviews. 2017. Vol. 62, Iss. 4. P. 203-239. doi 10.1080/09506608.2016.1243291.
13. Itin V.I., Nayborodenco Yu.S. High-temperature synthesis of intermetallic compounds. Tomsk : Tomsk State University, 1989. 214 p.
14. Khina B.B., Formanek B. On the physicochemical mechanism of the influence of preliminary mechanical activation on self-propagating high-temperature synthesis // Solid State Phenomena. 2008. Vol. 138. P. 159–164. doi 10.4028/www.scientific.net/SSP.138.159.
15. Aruna S.T., Mukasyan A.S. Combustion synthesis and nanomaterials // Current Opinion in Solid State & Materials Science. 2008. Vol. 12, Iss. 3–4. P. 44–50. doi 10.1016/j.cossms.2008.12.002.
16. Mechanical activation and gasless explosion: Nanostructural aspects / A.S. Mukasyan [et al.] // Chemical Engineering Journal. 2011. Vol. 174, Iss. 2-3. P. 677–686. doi 10.1016/j.cej.2011.09.028.
17. Yadav T.P., Yadav R.M., Singh D.P. Mechanical milling: A top down approach for the synthesis of nanomaterials and nanocomposites // Nanoscience and Nanotechnology. 2012. Vol 2, Iss. 3. P. 22–48. doi 10.5923/j.jnn.20120203.01.
18. Phase State of Reaction Products of a Mechanically Activated Ti + Al Mixture Synthesized during Gas Mixture Detonation / M.V. Loginova [et al.] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2024. Vol. 60. P. 641–650. doi 10.1134/S0010508224050095.
19. High temperature synthesis of single-phase Ti_3Al intermetallic compound in mechanically activated powder mixture / V.Yu. Filimonov [et al.] // Powder Technology. 2013. Vol. 235. P. 606-613. doi 10.1016/j.powtec.2012.11.022
20. Горелик С.С., Растворгусев Л.Н., Саков Ю.А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. Москва : Металлургия, 1970. 366 с.
21. Диаграммы состояния двойных металлических систем : Справочник. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. Москва : Машиностроение, 1996. 992 с.

Информация об авторах

В. Ю. Филимонов – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова; главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики Института водных и экологических проблем СО РАН.

М. В. Логинова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В. В. Евстигнеева Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. В. Собачкин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В. В. Евстигнеева Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. А. Ситников – доктор технических наук, директор производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

В. И. Яковлев – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяюще-

государственного высокотемпературного синтеза им. В. В. Евстигнеева Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. Ю. Мясников – научный сотрудник производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова; младший научный сотрудник лаборатории радиационной химии высокозергетических электронов Института химии твердого тела и механохимии СО РАН.

А. З. Негодяев – научный сотрудник производственного внедренческого комплекса прикладных исследований и разработок Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. А. Розный – аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

REFERENCES

1. Kudinov, V.V. & Bobrov, G.V. (1992). Coating by spraying. Theory, technology and equipment. Moscow : Metallurgiya. (In Russ.)
2. Shorshorov, M.X. & Kharlamov, Yu.A. (1978). Physico-chemical bases of detonation gas spraying of coatings. Moscow : Nauka. (In Russ.)
3. Bartenev, S.S., Fed'ko, Yu.P. & Grigoriev, A.I. (1982). Detonation coatings in mechanical engineering. Leningrad : Mashinostroenie. (In Russ.)
4. Zverev, A.I., Sharikov, S.Yu. & Astakhov, E.A. (1979). Detonation coating. Leningrad : Sudostroenie. (In Russ.)
5. Bobrov, G.V. & Ilyin, A.A. (2004). Application of inorganic coatings (theory, technology, equipment). Moscow : Intermet Engineering. (In Russ.)
6. Ulianitsky, V., Shterzser, A., Zlobin, S. & Smurov, I. (2011). Computer-Controlled Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 20, 791–801. doi 10.1007/s11666-011-9649-6.
7. Kharlamov, Y.A. (1987). Detonation spraying of protective coatings. *Materials Science and Engineering*, 93, 1–37. doi 10.1016/0025-5416(87)90409-5.
8. Wolczynski, W., Senderowski, C., Fukis, B. & Panas, A.J. (2017). Solidification Mechanism of the D-Gun Sprayed Fe-Al Particles. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62 (4), 2391–2397. doi 10.1515/AMM-2017-0352.
9. Shterzser, A.A., Batraev, I.S., Ulianitsky, V.Yu., Kuchumova, I.D., Bulina, N.V., Ukhina, A.V., Bokhonov, B.B., Dudina, D.V., Trinh, P.V. & Phuong, D.D. (2020). Detonation spraying of Ti-Cu mixtures in different atmospheres: Carbon, nitrogen and oxygen uptake by the powders. *Surfaces and Interfaces*, 21, 100676. doi 10.1016/j.surfin.2020.100676.
10. Buitkenov, D.B., Rakhadilov, B.K., Sagdoldina, Zh.B. & Maulet, M. (2020). Obtained of powder coatings by detonation spraying. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 4 (3), 6. doi 10.29317/ejpm.2020040306.
11. Rogachev, A.S. & Mukasyan, A.S. (2014). Combustion for material synthesis. London : CRC Press. doi 10.1201/b17842.
12. Levashov, E. A., Mukasyan, A. S., Rogachev, A. S., & Shtansky, D. V. (2017). Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings. *International Materials Reviews*, 62 (4), 203–239. doi 10.1080/09506608.2016.1243291.
13. Itin, V.I. & Nayborodenko, Yu.S. (1989). High-temperature synthesis of intermetallic compounds. Tomsk : Tomsk State University.
14. Khina, B.B. & Formanek, B. (2008). On the physicochemical mechanism of the influence of preliminary mechanical activation on self-propagating high-temperature synthesis. *Solid State Phenomena*, 138, 159–164. doi 10.4028/www.scientific.net/SSP.138.159.
15. Aruna, S.T. & Mukasyan A.S. (2008). Combustion synthesis and nanomaterials. *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 12 (3–4), 44–50. doi 10.1016/j.cossms.2008.12.002.
16. Mukasyan, A.S., Khina, B.B., Reeves, R.V. & Son, S.F. (2011). Mechanical activation and gasless explosion: Nanostructural aspects. *Chemical Engineering Journal*, 174 (2-3), 677–686. doi 10.1016/j.cej.2011.09.028.
17. Yadav, T.P., Yadav, R.M. & Singh, D.P. (2012). Mechanical milling: A top down approach for the synthesis of nanomaterials and nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*, 2 (3), 22–48. doi 10.5923/j.nnn.20120203.01.
18. Loginova, M.V., Sobachkin, A.V., Sitnikov, A.A., Yakovlev, V.I., Myasnikov, A.Yu. & Filimonov, V.Yu. (2024). Phase State of Reaction Products of a Mechanically Activated Ti + Al Mixture Synthesized during Gas Mixture Detonation. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 60, 641–650. doi 10.1134/S0010508224050095.
19. Filimonov, V.Yu., Korchagin, M.A., Dietenberg, I.A., Tumentsev, A.N. & Lyakhov, N.Z. (2013). High temperature synthesis of single-phase Ti₃Al intermetallic compound in mechanically activated powder mixture. *Powder Technology*, 235, 606–613. doi 10.1016/j.powtec.2012.11.022.
20. Gorelik, S.S., Rastorguev, L.N. & Skakov, Yu.A. (1970). Radiographic and electron-optical analysis. Moscow : Metallurgiya. (In Russ.).
21. Ed. by Lyakishev, N.P. (1996). Diagrams of the state of double metal systems. Vol. 1. Moscow : Mashinostroenie. (In Russ.).

Information about the authors

V. Yu. Filimonov – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher at the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the Polzunov Altai State Technical University; Chief Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics of the Institute for Water and Environment Problems SB RAS

M. V. Loginova – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the V. V. Evtigineev Problematic Scientific Research Laboratory of Self-Propagating High-temperature Synthesis of the Polzunov Altai State Technical University

A. V. Sobachkin – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the V. V. Evtigineev Problematic Scientific Research Laboratory of Self-Propagating High-temperature Synthesis of the Polzunov Altai State Technical University

A. A. Sitnikov – Doctor of Technical Sciences, Director of the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the Polzunov Altai State Technical University

V. I. Yakovlev – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the V. V. Evtigineev Problematic Scientific Research Laboratory of Self-Propagating High-temperature Synthesis of the Polzunov Altai State Technical University

A. Yu. Myasnikov – Researcher at the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the Polzunov Altai State Technical University; Junior Researcher at the Laboratory of Radiation Chemistry of High-energy Electrons at the Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS

A. Z. Negodyaev – Researcher at the Industrial Innovation complex of Applied Research and Development of the Polzunov Altai State Technical University

A. A. Roznyj – postgraduate student at 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 12 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 12 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 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.2072-8921.2025.02.037

EDN: BIDCVP

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВЕСНО-ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА

Хапёрских Снежана Александровна¹, Ананьева Елена Сергеевна²,
Собачкин Алексей Викторович³,

^{1,2,3} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ snezhana_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2204-3469>

² eleana2004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5768-3912>

³ sobalvi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9159-1122>

Аннотация. В статье исследован показатель шероховатости поверхности древесно-волокнистого материала на основе шпона дуба. Для сравнительной характеристики показателей использованы образцы стандартного и модифицированного шпона раствором низковязкого эластомера с использованием этилен-пропилендиенового каучука, растворенного в ароматическом углеводороде – тетрахлорметане. Проведены исследования показателя шероховатости поверхности стандартного и модифицированного шпона согласно ГОСТ 7016-2013 с использованием оптического профилометра. Качественно проанализированы профилограммы образцов, результатом чего выявлена неоднородная сегментация поверхности шпона, что обусловлено природой материала и его строением. Анализ полученных значений по шероховатости проведен по среднему арифметическому отклонению профиля (R_a). Результатом статистической обработки полученных данных является незначительное снижение показателя шероховатости ($\sim 5\%$) модифицированного образца относительного исходного, что указывает на отсутствие влияния пропитки на основе эластомера определенной концентрации на будущие адгезионные свойства ДВК при склеивании пакета.

Ключевые слова: шероховатость, древесно-волокнистый материал, композит, ДВК, шпон, эластомер, этиленпропилендиеновый каучук.

Для цитирования: Хапёрских С. А., Ананьева Е. С., Собачкин А. В. Исследование шероховатости поверхности древесно-волокнистого композита // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 237–243. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.037. EDN: <https://elibrary.ru/BIDCVP>.

Original article

INVESTIGATION OF SURFACE ROUGHNESS OF A WOOD-FIBER COMPOSITE

Snezhana A. Khaperskikh¹, Elena S. Anan'eva², Alexey V. Sobachkin³

^{1,2,3} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ snezhana_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2204-3469>

² eleana2004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5768-3912>

³ sobalvi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9159-1122>

Abstract. The article examines the surface roughness index of wood-fiber material based on oak veneer. For comparative characteristics of the indicators, samples of standard and modified veneer with a solution of low-viscosity elastomer using ethylene propylene diene rubber dissolved in an aromatic hydrocarbon, carbon tetrachloride, were used. Studies of the surface roughness index of standard and modified veneer according to GOST 7016-2013 using an optical profilometer have been carried out. Profilograms of the samples were qualitatively analyzed, as a result of which heterogeneous segmentation of the veneer surface was revealed, due to the nature of the material and its structure. The analysis of the obtained roughness values was carried out using the arithmetic mean deviation of the profile (R_a). The result of the statistical processing of the obtained data is a slight decrease in the roughness index of the modified sample relative to the original, which indicates the absence of influence of the impregnation on the basis of the elastomer of a certain concentration on the future adhesive properties of DVC during gluing the package.

Keywords: roughness, wood-fiber material, composite, fiberboard, veneer, elastomer, ethylene propylene diene rubber.

For citation: Haperskikh, S. A., Anan'eva, E. S. & Sobachkin, A. V. (2025). Investigation of surface roughness of a wood-fiber composite. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 237-243. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.037. EDN: <https://elibrary.ru/BIDCVP>.

© Хапёрских С. А., Ананьева Е. С., Собачкин А. В., 2025

ВВЕДЕНИЕ

Шероховатость поверхности древесины, наряду с водопоглощением, является одним из критерии оценки надежности клеевого соединения. Она оказывает непосредственное влияние на большинство стадий технологического процесса производства ДВК, на расход клея или лака, а также на качество поверхности при склеивании шпона.

Большая часть исследований свидетельствует о том, что наличие неровностей на поверхности склеиваемых поверхностей напрямую влияет на прочностные свойства древесины. Наличие пор на поверхности обеспечивает способность к смачиванию kleem. Вместе с тем, рост шероховатости поверхности шпона может снизить адгезионную прочность композита. Помимо снижения прочностных свойств у композита может наблюдаться недостаточная толщина клеевого слоя, снижение площади контакта между поверхностями и увеличенный расход клея.

При использовании авторами эластомера в качестве модификатора поверхности древесины была доказана его эффективность в снижении водопоглощения [1] и его влияния на прочностные свойства древесно-волокнистого композита [2]. Необходимо проанализировать шероховатость поверхности анализируемого шпона и оценить влияние пропитки на исследуемые свойства с целью возможности применения модифицированного шпона в производстве.

Анализ литературы [3,4,5,6,8] показал, что для определения шероховатости поверхности и использования ее в дальнейшем при склеивании авторы имеют различные мнения. Одни из них рекомендуют использование древесины с высоким уровнем шероховатости [6], при условии наличия деформации неровностей при прессовании пакета; другие [4,5,8] – наоборот о необходимости снижения шероховатости, для получения высокой прочности склеивания.

Исследование изменения параметров шероховатости поверхности древесины дуба до и после модификации регламентируется стандартом ГОСТ 7016-2013 [3], который устанавливает номенклатуру параметров шероховатости поверхности, их числовые значения и общие указания по нормированию. Сущность метода заключается в определении числовых значений высотных и шаговых параметров неровностей и наличием (отсутствием) ворсистости на обработанных поверхностях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для проведения исследований являлись образцы шпона дуба. Проведено исследование изменения параметров шероховатости поверхности древесины дуба до и после модификации на оптическом профилометре Veeco Wyko NT 9080. В работе представлены два типа образца (до и после модификации) с пятью замерами. Результаты определения шероховатости представлены на рисунках 2-3 (увеличение $\times 20$ крат, метод вертикального сканирования VSI).

Шероховатость поверхности древесины характеризуется числовыми значениями высотных и шаговых параметров неровностей (рисок, неровностей разрушения, неровностей упругого восстановления, кинематической волнистости, а также структурных неровностей поверхностей плит, спрессованных из древесных частиц) и наличием или отсутствием ворсистости и мшистости на обработанных поверхностях.

Требования к шероховатости поверхности должны устанавливаться путем указания параметра шероховатости (одного или нескольких) из номенклатуры: $R_{\text{m, max}}$ – среднее арифметическое высот отдельных наибольших неровностей; R_m – высота неровностей профиля; R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам; R_p , R_k , R_v – высота неровностей; R_a – среднее арифметическое отклонение профиля [3].

С целью исследования шероховатости поверхности древесины дуба, были проанализированы значения показателя среднего арифметического отклонения профиля (R_a) по формуле:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n'} |y_i|, \quad (1)$$

где y_i – отклонение профиля от средней линии профиля; n – количество измеренных отклонений от средней линии профиля.

Среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины можно определить исходя из рисунка 1.

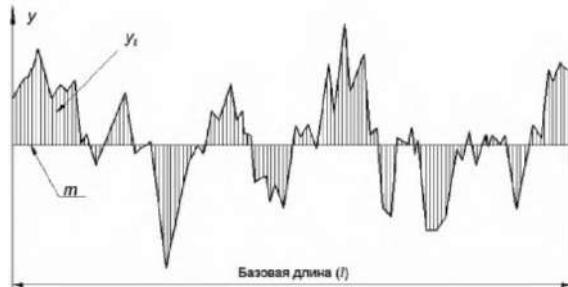


Рисунок 1 – Определение среднего арифметического отклонения профиля R_a [1]

Figure 1 – Determination of the arithmetic mean deviation of the Ra profile

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проблема шероховатости актуальна для древесно-волокнистых композиционных материалов. Снимки, полученные с оптического профилометра, образцов до и после модификации поверхности раствором эластомера представлены на рисунках 2-3.

Анализируя качественно рисунок 2, образцов до модификации, стоит отметить, что цифровой анализ поверхности позволил провести сегментацию изображений. В результате чего, было выявлена неоднородная сегментация в различных частях образцов (в рамках одного образца). Данный факт препятствует получению качественного анализа шероховатости поверхности древесины, что обусловлено природой материала и ортотропностью в его строении. Кроме показателя шероховатости, ортотропность предопределяет получение конечных физико-механических и эксплуатационных показателей, значительно отличающихся друг от друга в рамках одной выборки.

Анализируя особенности рельефа шпона дуба, на рисунках до и после модификации поверхности эластомером, существует возможность оценить перепады высот и выявить особенности данной структуры, на которые необходимо будет обратить внимание при проведении исследований другими методами. Несмотря на то, что внешний вид образцов идентичен друг другу, первичный анализ изображений поверхности древесины дуба показал различие в рельефе поверхности, что является следствием различий в самой структуре исходного материала, неоднородности строения в виду его органического проис-

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВЕСНО-ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА

хождения и способа получения шпона при его производстве, а также условий хранения. Было обнаружено присутствие неровностей различного уровня, что позволило определить положение различных фрагментов структуры относительно друг друга, в том числе перепад высот между уровнем подложки и минимальным уровнем области маркировки.

Анализируя поверхность модифицированного образца древесины со стандартным образцом до модификации, можно увидеть наличие существенных однородных участков поверхности обработанного образца, результатом чего является описание показателей шероховатости поверхности по замерам и значения R_a , представленных в таблице 1.

Далее построим доверительный интервал для математического ожидания шероховатости поверхности.

Уровень значимости $\alpha = 0,1$. Коэффициент Стьюдента имеет значение 2,77. Исходя из этого доверительный интервал:

- для стандартного образца имеет значение:

$$24,40 - 2,77 \cdot \frac{10,07}{\sqrt{5}} < M_x < 24,40 + 2,77 \cdot \frac{10,07}{\sqrt{5}}$$

$$11,93 < M_x < 36,88, [\text{мкм}]$$

т.е. доверительный интервал для стандартного образца составит: $24,40 \pm 12,47 \text{ мкм}$.

- для модифицированного образца:

$$25,50 - 2,77 \cdot \frac{7,58}{\sqrt{5}} < M_x < 25,50 + 2,77 \cdot \frac{7,58}{\sqrt{5}}$$

$$16,11 < M_x < 34,89 [\text{мкм}].$$

таким образом полученные данные свидетельствуют о том, что доверительный интервал для модифицированного образца составит: $25,50 \pm 9,39 \text{ мкм}$.

Проведем проверку на наличие в выборке грубых погрешностей (по критерию Смирнова либо по критерию Диксона). В случае наличия грубых погрешностей исключим их из расчета, пересчитав значения.

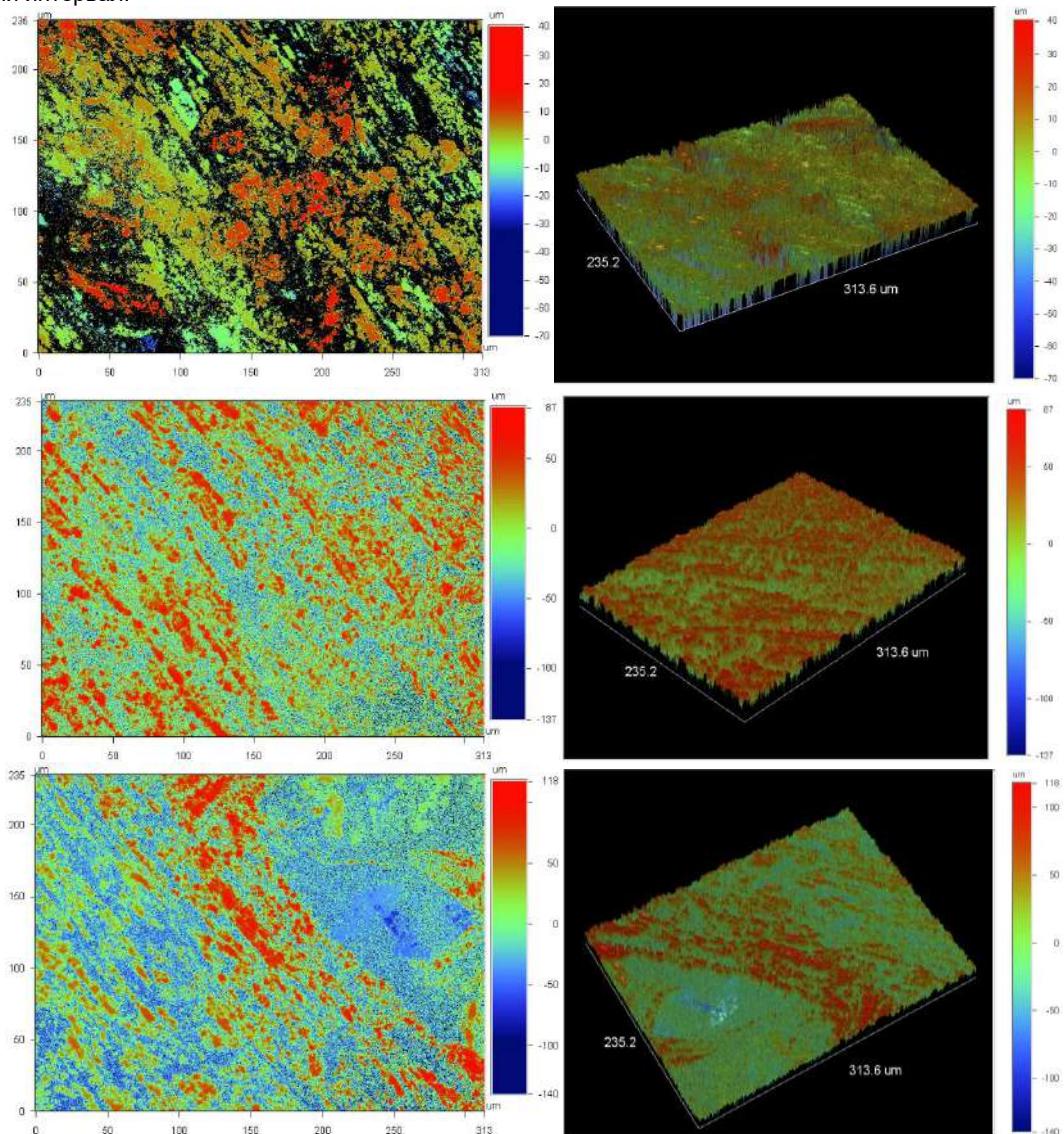


Рисунок 2 – Профилограмма профиля поверхности образца древесины дуба до модификации ($\times 20$): а) 2D-изображение; б) трехмерный график поверхности

Figure 2 – Profilogram of the surface profile of an oak wood sample before modification ($\times 20$): а) 2D image; б) three-dimensional graph of the surface

Проанализируем полученные данные у стадного образца.

Разместим значение Ra в порядке возрастания, мкм: 7,11; 25,54; 27,77; 28,34; 33,26.

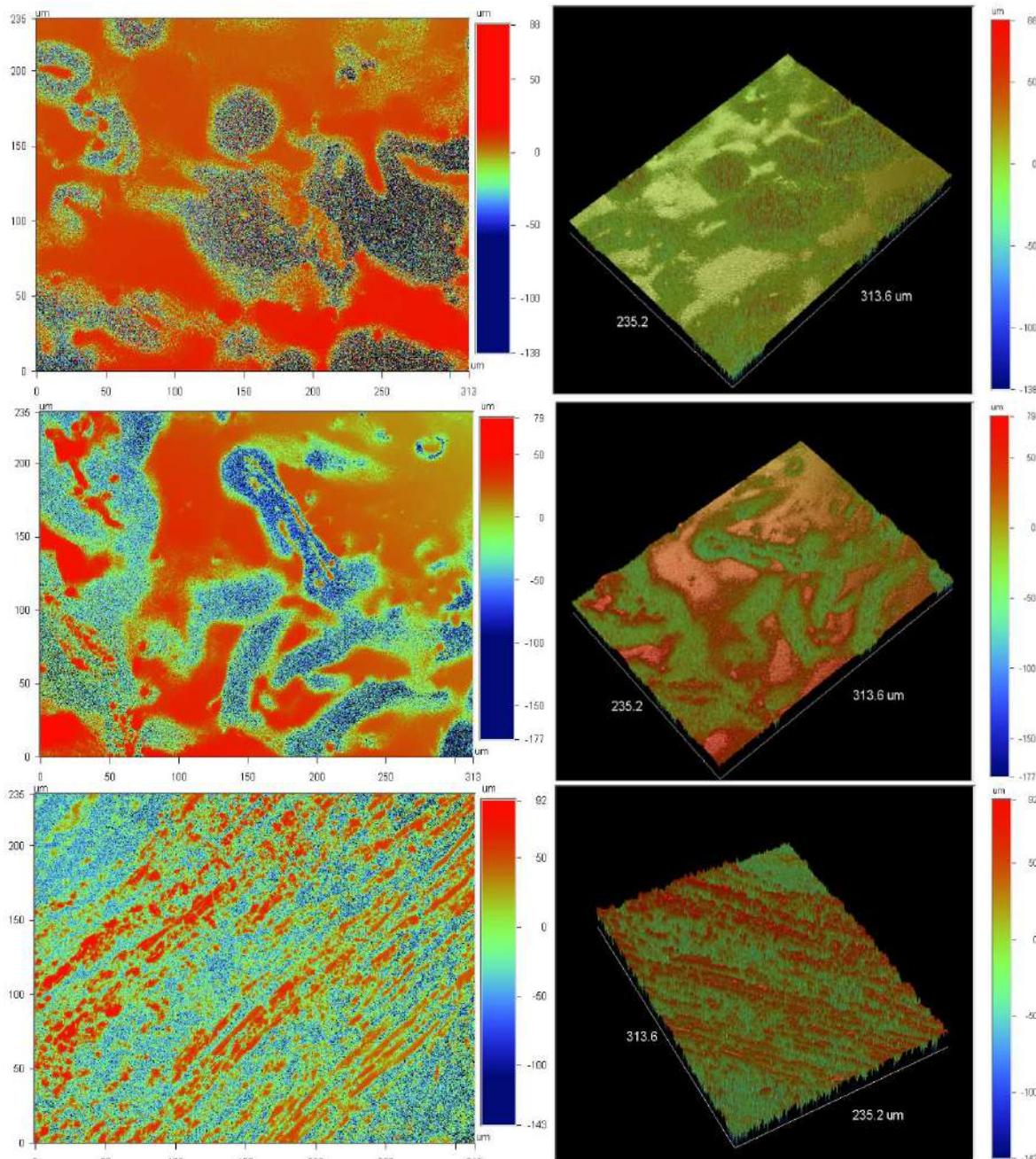


Рисунок 3 – Профилограмма профиля поверхности модифицированного образца древесины дуба ($\times 20$): а) 2D-изображение; б) трехмерный график поверхности

Figure 3 – Figure 3 – Profilogram of the surface profile of a modified oak wood sample ($\times 20$): a) 2D image; b) three-dimensional graph of the surface

Алгоритм:

- 1) H_0 – нет аномальных значений;
- 2) H_1^1 – грубая ошибка 7,11
 H_1^2 – грубая ошибка 33,26;
- 3) Выбираем критерий Диксона
- 4) т.е. $r_{10(1)} = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1} = \frac{25,54 - 7,11}{33,26 - 7,11} = 0,704$.
- т.е. $r_{10(5)} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} = \frac{33,26 - 28,34}{33,26 - 7,11} = 0,188$.

5) уровень значимости $\alpha = 0,1$;
6) табличное значение критерия Диксона при $r_{10} = 0,557$.
то есть $r_{10(1)} > (r_{10})_{0,1;5}$;
 $0,704 > 0,557$.
А показатель $r_{10(2)} < (r_{10})_{0,1;5}$; $0,188 < 0,557$.

7) 7,11 – грубая ошибка по критерию Диксона с вероятностью 90 %.

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВЕСНО-ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА

Таким образом, значение показателя $Ra = 7,11$ необходимо исключить из выборки и пересчитать значения – данные представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Обработка параметров шероховатости поверхности древесины дуба до и после модификации

Table 1 – Processing of oak wood surface roughness parameters before and after modification

№ замера	Значение Ra у образца, мкм	
	стандартного	модифицированного
1	7,11	13,27
2	27,77	30,97
3	25,54	26,80
4	28,34	24,14
5	33,26	32,34
среднее арифметическое	24,40	25,50
выборочная дисперсия	101,41	57,45
выборочное среднеквадратичное отклонение	10,07	7,58
коэффициент вариации	41,26	29,72

Проанализируем модифицированный образец.

Разместим значения Ra в порядке возрастания, мкм: 13,27; 24,14; 26,8; 30,97; 32,34.

Алгоритм:

1) H_0 – нет аномальных значений;

2) H_1^1 – грубая ошибка 13,27;

H_1^2 – грубая ошибка 32,34;

3) Выбираем критерий Диксона

$$4) \text{ т.е. } r_{10(1)} = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1} = \frac{24,14 - 13,27}{32,34 - 13,27} = 0,570.$$

$$\text{т.е. } r_{10(5)} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} = \frac{32,34 - 30,97}{32,34 - 13,27} = 0,072.$$

5) уровень значимости $\alpha = 0,1$;

6) табличное значение критерия Диксона при $r_{10} = 0,557$.

то есть $r_{10(1)} > (r_{10})_{0,1;5}$:

$$0,570 > 0,557.$$

А показатель $r_{10(2)} < (r_{10})_{0,1;5}$; $0,072 < 0,557$.

7) 13,27 – грубая ошибка по критерию Диксона с вероятностью 90 %.

Таким образом, значение показателя $Ra = 13,27$ необходимо исключить из выборки и пересчитать значения – данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Обработка параметров шероховатости поверхности древесины дуба до и после модификации

Table 2 – Processing of oak wood surface roughness parameters before and after modification

№ замера	Значение Ra у образца, мкм	
	стандартного	модифицированного
1	-	-
2	27,77	30,97
3	25,54	26,8
4	28,34	24,14
5	33,26	32,34
среднее арифметическое	28,73	28,56
выборочная дисперсия	10,59	14,24
выборочное среднеквадратичное отклонение	3,25	3,77
коэффициент вариации	11,33	13,21

Из выборки исключены у стандартного и у модифицированного образцов замеры № 1, которые по критерию Диксона являются грубыми ошибками. В результате чего был произведен пересчет статистических показателей, конечные результаты которых представлены в таблице 2, а графическая интерпретация показателя Ra представлена на рисунке 4.

Так, исключив первый замер у стандартного образца, значение среднего арифметического изменилось с 24,40 до 28,73 мкм., выборочная дисперсия с 101,41 до 10,59, а доверительный интервал для стандартного образца составил: $28,73 \pm 4,51$ мкм. Для модифицированного образца: среднее арифметическое изменилось с 25,50 до 28,56 мкм, выборочная дисперсия с 57,45 до 14,24, а доверительный интервал для модифицированного образца составил: $28,56 \pm 5,23$ мкм.

Анализируя рисунок 4, стоит отметить, что различие в показателе шероховатости по Ra составляет около 5 %. Данный факт может свидетельствовать о незначительном снижении шероховатости поверхности в рамках выборки, либо является погрешностью измерений.

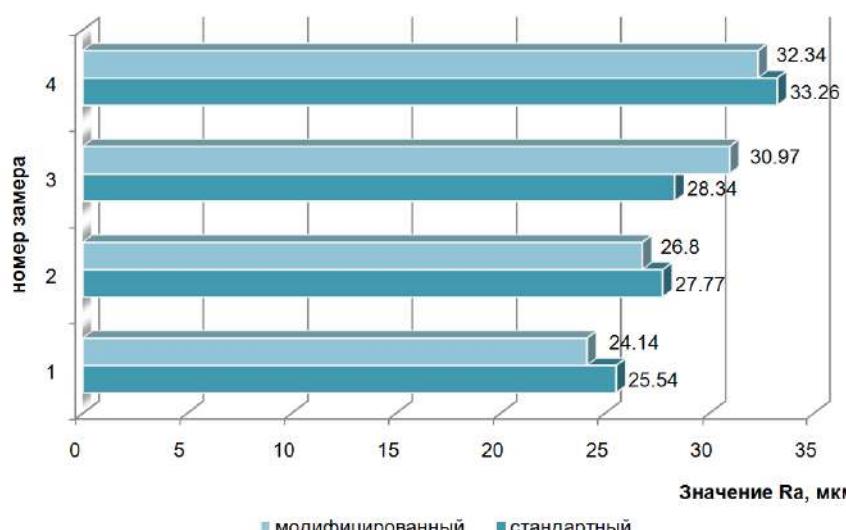


Рисунок 4 – Сравнительная характеристика показателя шероховатости поверхности Ra образца из древесины дуба до и после модификации

Figure 4 – Comparative characteristics of the surface roughness index Ra of an oak wood sample before and after modification

ОБСУЖДЕНИЕ

Порода древесины имеет различные цвета, строение, прочность и свои особенности в обработке и отделке. Эксплуатационные свойства слоистых kleевых древесно-волокнистых материалов зависят не только от точности изготовления деталей, но и от шероховатости склеиваемых поверхностей. На прочностные свойства склеиваемых поверхностей оказывает влияние наличие неровностей в виде перерезанных волокон, открытых пор, недеформированных клеток и ворсистости.

Вместе с тем, необходимым условием адгезии клея к древесине являются: жидкое состояние клея и способность к смачиванию, заполнению порповерхности, а также допустимый уровень шероховатости.

С ростом шероховатости поверхности прочность склеивания снижается, потому как при сближении поверхностей в контакт с kleем, в первую очередь, идут неровности, которые под давлением прессования пакета внедряются в kleевую прослойку и вытесняют часть kleевой композиции во впадины. С ростом шероховатости возрастает глубина впадин и пустот. При одних и тех же условиях прессования kleевой слой будет иметь недостаточную толщину, что уменьшит площадь контакта между поверхностями. Поэтому сохранение оптимального значения шероховатости поверхности древесины играет значительную роль при производстве ДВК. Высокая шероховатость оказывает пагубное влияние на склеивание.

Экспериментально полученные данные по шероховатости свидетельствуют о том, что низковязкий раствор эластомера на основе этиленпропиленодиенового каучука с использованием растворителя тетрахлорметана, пропитанных образцов шпона древесины дуба, не влияет на качество поверхностей при их склеивании. Иными словами, пропитка не изменяет шероховатости поверхности, что является важным показателем для древесно-волокнистого материала при дальнейшем склеивании пакета. В целом, наблюдается незначительное снижение шероховатости, что в свою очередь, при производстве ДВК не увеличит расход клея и не отразится на характере взаимодействия системы «подложка – субстрат – подложка».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно ГОСТ7016-2013 проведено исследование поверхности шпона дуба по определению шероховатости образцов до и после модификации эластомером на основе этиленпропиленодиенового каучука и растворителя.

Были изготовлены и исследованы образцы древесины дуба, пропитанные жидким эластомером на основе ЭПДМ-каучука.

Исследование проведено на оптическом профилометре Veeco Wyko NT 9080, результатом исследования стали полученные профилограммы с неоднородной сегментацией в различных частях поверхности образцов древесины.

Анализ структуры материала выявил различия в рельефе поверхности: наличие выступов и углублений, открытых пор и перерезанных волокон, либриформа и прочих элементов структуры.

Обработка поверхности шпона эластомером позволила получить более однородные по высоте участки, о чем свидетельствует показатель среднего арифметического отклонения профиля (Ra). Его величина на стандартном образце составила 28,73 мкм,

а у модифицированного – 28,56 мкм., что составило снижение показателя среднего арифметического отклонения профиля Ra всего на 0,6 %.

Проведенное исследование шероховатости поверхности образцов, выявило незначительное снижение показателя Ra. Эксперимент подтверждает эффективность пропитки эластомером на примере шпона дуба при сохранении оптимальных параметров шероховатости поверхности.

Кроме того установлено, что шероховатость можно и нужно рассматривать как параметр качества, определяющий надежность технологического процесса производства композиционных материалов из древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хапёрских С.А. Влияние модифицирующих составов на водопоглощение шпона / С.А. Хапёрских, Е.А. Головина // Ползуновский вестник 2019 №3 С. 117-121. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.03.021 - ISSN: 2072-8921. [Электронный ресурс] URL: http://elib.altstu.ru/journals/Files/archive/pv/2019/PV_3_2019.pdf (дата обращения: 06.05.2025).
2. Хапёрских С.А. Модификация шпона инженерной доски эластомером с целью повышения ее эксплуатационных свойств / С.А. Хапёрских, Е.А. Головина // Труды XIV Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / под ред. В.Б. Маркина; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017. С. 125-130. [Электронный ресурс] URL: <http://elib.altstu.ru/disser/conferenc/2017/09-09.pdf> (дата обращения: 06.05.2025).
3. ГОСТ 7016-2013 «Изделия из древесины и древесных материалов. Параметры шероховатости поверхности».
4. Budhe, C., Гуматкар, А., Бирадждар, Н. и др. Влияние шероховатости поверхности при использовании различных материалов для склеивания на прочность kleевого соединения. *AppAdhesSci*, 20 (2015). <https://doi.org/10.1186/s40563-015-0050-4>.
5. Шероховатость и пористость [Электронный ресурс] URL: <http://www.technologywood.ru/skleivanie-drevesiny/sheroxovatost-i-poristost.html> (дата обращения: 24.03.2025).
6. К вопросу о склеивании древесины с повышенной шероховатостью поверхности / Н.С. Рудная, Н.О. Задраускайте // Форум молодых ученых 8(24) 2018. С. 596-601. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-skleivaniyu-drevesiny-s-povyshennoy-sheroxovatostyu-poverhnosti/viewer> (дата обращения: 18.03.2025).
7. Вернигорова В.Н. Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов: учеб.пособие / В.Н. Вернигорова, С.М. Саденко. Пенза: ПГУАС, 2015 296 с.
8. Цаплин П.В., Межков В.Г., Кустов А.В., Заболотская Е.А., Гончарова Я.С. Исследование влияния силы трения на шероховатость поверхности древесностружечных плит и на износ инструмента. Хвойные бореальной зоны. 2023;41(2):185-193. [Электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-2-185-193> (дата обращения: 19.03.2025).
9. Яцун И.В., Чекасин М.С. Исследования качества подготовки поверхности древесины под отделку при обработке ее циклеванием и шлифованием // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 4 (91). С. 159–167. [Электронный ресурс] URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/13472/1/LR_4_24_16.pdf (дата обращения: 26.03.2025).

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВЕСНО-ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА

Информация об авторах

С. А. Хапёрских – старший преподаватель кафедры современных специальных материалов Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова.

Е. С. Ананьева – кандидат технических наук, доцент кафедры современных специальных материалов Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова.

А. В. Собачкин – кандидат технических наук, доцент кафедры малый бизнес в сварочном производстве Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова.

REFERENCES

1. Khaperskikh, S. A., Golovina E. A. (2019). Influence of modifying compounds on veneer water absorption. Polzunovskiy vestnik. (3). 117-121. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.03.021. (In Russ.).
2. Khaperskikh, S. A., Golovina E. A. (2017). Modification of veneer of engineering board with elastomer in order to increase its operational properties. Proceedings of the XIV International Scientific School-conference "Fundamental and Applied Materials Science". edited by V.B. Markin; Alt. State Technical University. I.I. Polzunov University. Barnaul: AltGTU Publishing House, Pp. 125-130. URL: <http://elib.altstu.ru/disser/conferenc/2017/09-09.pdf>. (In Russ.).
3. HOST 7016-2013 (2013). Products made of wood and wood materials. Surface roughness parameters. (In Russ.).
4. Budhe, S., Gumatkar, A., Birajdar, N. et al. (2015). The effect of surface roughness when using different bonding materials on the strength of the adhesive joint. ApplAdhesSci 3, 20 <https://doi.org/10.1186/s40563-015-0050-4>.
5. Roughness and porosity. URL: <http://www.technologywood.ru/skleivanie-drevesiny/sherokovatost-i-poristost.html> (access date: 03/24/2025). (In Russ.).
6. Rudnaya, N.S. & Zadrauskaite, N.O. (2018). On the issue of gluing wood with increased surface roughness. Forum of Young Scientists 8(24). 596-601. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-skleivanii-drevesiny-s-povyshennoy-sherokovatostyu-poverhnosti/viewer>. (In Russ.).
7. Vernigorova, V.N. & Sadenko, S.M. (2015). Technology and equipment of protective and decorative coatings of wood and wood materials: textbook. Manual. Penza: PGUAS, 296 p. (In Russ.).
8. Tsaplin, P.V., Mezhov, V.G., Kustov, A.V., Zabolotskaya, E.A., & Goncharova, Ya.S. (2023). Investigation of the effect of friction force on the surface roughness of particle boards and on tool wear. Conifers of the boreal zone. 2023;41(2):185-193. URL: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-2-185-193>. (In Russ.).
9. Yatsun, I.V. & Chekasin, M.S. (2024). Studies of the quality of wood surface preparation for finishing during its treatment by cyclization and sanding. Forests of Russia and their management. 4 (91). 159-167, URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/13472/1/LR_4_24_16.pdf. (In Russ.).

Information about the authors

S. A. Khaperskikh – Senior Lecturer of the Department of Modern Special Materials, Polzunov Altai State Technical University.

E. S. Anan'eva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Modern Special Materials, Polzunov Altai State Technical University.

A. V. Sobachkin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Small Business in the Welding Industry, 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 12 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принятия к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 12 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 577.114
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.038

EDN: YKMMNW

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ

Анастасия Александровна Зенкова¹, Надежда Александровна Шавыркина²

^{1,2} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск, Россия
^{1,2} Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия
¹ zenkova_nastasya080401@mail.ru, 0009-0000-0868-5444
² 32nadina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5572-1476>

Аннотация. Древесина является ценным источником целлюлозы, для современных инновационных производств из неё получают нанофибрillированную целлюлозу. В качестве альтернативного источника растительной наноцеллюлозы может рассматриваться бактериальная наноцеллюлоза, которая синтезируется микроорганизмами. Её преимуществом является отсутствие в составе лигнина, пектинов, гемицеллюлоз. Целью данной работы являлась сравнительная оценка удельной эффективности биосинтеза бактериальной и растительной целлюлозы, для чего была произведена наработка объема гель-плёнок бактериальной наноцеллюлозы в лабораторных условиях, достаточного для дальнейшей функционализации, например, нитрованием. В данной работе для получения бактериальной наноцеллюлозы использовали полусинтетическую питательную среду и симбиотический продуцент *Medusomyces gisevii* Sa-12, культивирование проводили в климатической камере *Binder* объемом 400 дм³. В результате установлено, что за один цикл в лаборатории возможно получить от 9,7 до 16,1 г абсолютно сухой бактериальной наноцеллюлозы. Прирост древесины в умеренной полосе России в год составляет 0,60 т/га, тогда теоретически, если принять массовую долю целлюлозы в древесине 50 %, с 1 м² за год можно получить 0,03 кг целлюлозы (если не учитывать производственные потери). Полезная площадь климатической камеры *Binder*, которую можно использовать для стационарного культивирования бактериальной наноцеллюлозы, составляет 0,79 м², таким образом с 1 м² за год в лабораторных условиях, с учетом продолжительности культивирования 14 суток, возможно получить 0,53 кг сухой бактериальной наноцеллюлозы – это в 17,7 раз эффективнее, чем биосинтез целлюлозы древесины. Установлено, что лиофильно высушенная бактериальная наноцеллюлоза пригодна для получения наноразмерных нитратов.

Ключевые слова: древесная целлюлоза, бактериальная наноцеллюлоза, нанокристаллическая целлюлоза, нанофибрillированная целлюлоза, культивирование, функционализация, биосинтез.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках госзадания ИПХЭТ СО РАН (код научной темы FUFE-2024-0008, регистрационный номер 124021200031-4).

Для цитирования: Зенкова А. А., Шавыркина Н. А. Культивирование бактериальной наноцеллюлозы на полусинтетической питательной среде для последующей функционализации // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 244–250. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.038. EDN: <https://elibrary.ru/YKMMNW>.

Original article

CULTIVATION OF BACTERIAL NANOCELLULOSE ON A SEMISYNTHETIC NUTRIENT MEDIUM FOR SUBSEQUENT FUNCTIONALIZATION

Anastasia A. Zenkova¹, Nadezhda A. Shavyrkina²

^{1,2} Institute for Problems of Chemical and Energy Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk, Russia

^{1,2} Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia

¹ zenkova_nastasya080401@mail.ru, 0009-0000-0868-5444

² 32nadina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5572-1476>

Abstract. Wood is a valuable source of cellulose for the modern innovative production of nanofibrillated cellulose from it. Bacterial nanocellulose being synthesized by microorganisms can be considered an alternative source of plant-

© Зенкова А. А., Шавыркина Н. А., 2025

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЗЫ НА ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ

*based nanocellulose. The advantage of plant-based nanocellulose is that its composition contains no lignin, pectins, and hemicelluloses. This work aimed to comparatively assess the specific efficiency of the biosynthesis of bacterial and plant celluloses. For this purpose, some amount of bacterial nanocellulose gel-films was prepared under lab-scale conditions, sufficient for further functionalization, for example, by nitration. In this work, a semisynthetic nutrient medium and the symbiotic producer *Medusomyces gisevii* Sa-12 were used to obtain bacterial nanocellulose whose cultivation was carried out in a 400-dm³ Binder climatic chamber. It was consequently found that 9.7 to 16.1 g of absolutely dry bacterial nanocellulose could be obtained in one cycle at the laboratory. The annual growth of wood in the temperate zone of Russia is 0.60 t/ha; then, theoretically, if the mass content of cellulose in wood is assumed equal to 50 wt.%, 0.03 kg of cellulose can be extracted from 1 m² a year under lab-scale conditions (if production losses are not factored in). The useful area of the Binder climatic chamber that can be used for stationary cultivation of bacterial nanocellulose is 0.79 m²; thus, it is possible to obtain 0.53 kg of dry bacterial nanocellulose from 1 m² a year under lab-scale conditions, given the cultivation time of 14 days, which is 17.7 times more effective than the biosynthesis of wood cellulose. Freeze-dried bacterial nanocellulose was found to be suitable for the synthesis of nanoscale nitrates.*

Keywords: wood cellulose, bacterial nanocellulose, nanocrystalline cellulose, nanofibrillated cellulose, cultivation, functionalization, biosynthesis.

Acknowledgements: The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science within the framework of the state assignment of the Institute of Problems of Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (research topic code FUFE-2024-0008, registration number 124021200031-4).

For citation: Zenkova, A.A., Shavyrkina, N.A., Cultivation of bacterial nanocellulose on a semi-synthetic nutrient medium for subsequent functionalization *Polzunovskiy vestnik*, (2), 244-250. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.038. EDN: <https://elibrary.ru/YKMMNW>.

ВВЕДЕНИЕ

Мировое ежегодное производство лигноцеллюлозной биомассы составляет около $181,5 \times 10^9$ т [1]. Растения и древесины являются природными биокомпозитами, основу которых составляет микрофибрillярная целлюлоза в количестве 35-50 % от массы растений. Наряду с целлюлозой, в биокомпозит входят пектин, лигнин и гемицеллюлозы. Целлюлоза является самым распространенным полимером на Земле, он нетоксичен, что позволяет использовать его для производства природных полимерных материалов, которые могут заменить полимеры на основе нефти. Целлюлозу также можно использовать для производства химикатов и мономеров посредством катализитических процессов [2], а также для производства бумаги и нетканых материалов [3].

Революционным достижением стало получение из целлюлозы нанокристаллической целлюлозы кислотным гидролизом [4]. Нанофибрillированную целлюлозу получают путем дефибрillяции древесины или других растительных источников [5]. Уникальным видом наноцеллюлозы является бактериальная наноцеллюлоза, её получают путем биосинтеза готовыхnanoструктур из отдельных растворимых молекул (например, из глюкозы, содержащейся в питательной среде), при этом биосинтез осуществляют микроорганизмы [6].

Российская лесная промышленность производит практически все известные человечеству виды продукции из древесины хвойных и лиственных пород, и является одним из крупнейших в мире её экспортёров. Однако большая доля экспорта составляет необработанные лесоматериалы (круглый лес) и пиломатериалы. По данным ФТС России, в 2021 году из страны вывезено совокупно 43,8 млн м³ данных видов продукции (коды ТН ВЭД 4403, 4407) на сумму 7,2 млрд \$ при общем экспорте древесины и целлюлозно-бумажных изделий на уровне 17 млрд \$. В пересчете на эквиваленты круглого леса совокупный экспорт пиломатериалов и необработанных лесоматериалов составил 78,9 млн м³, то есть можно считать, что 35,2 % всей заготовленной в России древесины в 2021 году было вывезено за рубеж в минимально переработанном виде [7]. Нанокристаллическая и нанофибрillированная целлюлозы, которые можно было бы получить из древесины, в РФ не производят-

ся, поэтому в качестве альтернативы целлюлозе растительного происхождения, которую получают путем переработки древесины, может быть производство бактериальной наноцеллюлозы. Бактериальная наноцеллюлоза представляет собой лентовидные сверхтонкие нановолокна, она обладает очень высокой водоудерживающей способностью, улучшенной адгезией, высокой степенью полимеризации, кристалличностью, эластичностью, прочностью, возобновляемостью, а также является биоразлагаемым материалом [8].

Уникальные свойства бактериальной наноцеллюлозы позволяют использовать данный материал в косметологии, в производстве мембран для очистки воды [9], в гибких электронных устройствах [10], а также в качестве добавки для биоразлагаемых жидких моющих средств, в биомедицине для производства стерильных повязок и материала для укрепления и защиты мягких тканей, пищевых добавок, микропористых гранул, используемых в качестве микронасителя клеточной культуры [11].

Существует производство, в котором пленки бактериальной наноцеллюлозы являются побочным продуктом, например, при производстве комбучи [12]. В связи с тем, что древесина является ресурсом с длительным сроком возобновления, создание производства бактериальной наноцеллюлозы является крайне перспективным направлением.

Таблица 1 – Свойства бактериальной наноцеллюлозы и целлюлозы растительного происхождения

Table 1 – Properties of bacterial nanocellulose and cellulose of plant origin

Свойства	БНЦ*	Целлюлоза
Степень кристалличности	65-79	56-65
Степень полимеризации	2000-60000	13000-14000
Модуль Юнга, МПа	15-30	5,5-12,6
Влагоудерживающая способность, %	98,5	60

Примечание: БНЦ – бактериальная наноцеллюлоза.

В данной работе поставлена цель оценить удельную эффективность биосинтеза бактериальной

и растительной целлюлозы, для чего получить достаточное для статистической оценки количество бактериальной наноцеллюлозы, которую впоследствии использовали для дальнейшей функционализации нитрованием. В таблице 1 для сравнения приведены свойства бактериальной наноцеллюлозы и целлюлозы растительного происхождения [13].

Функционализация бактериальной наноцеллюлозы относится к фундаментальным областям исследований и может достигаться несколькими способами:

- химическими,
- биосинтетическими и различными схемами функционализации *in situ* и *ex situ* для получения усовершенствованных функциональных материалов на основе бактериальной наноцеллюлозы [14].

Особо востребованы нитраты бактериальной наноцеллюлозы в связи с сохранением наноразмерной структуры эфира целлюлозы и возможности использования в создании композиционных материалов в специальной химии и биомедицине [15,16]. Многочисленные научные исследования однозначно доказывают аналогичность растительной и бактериальной целлюлоз в плане химической структуры [17], в то же время целлюлоза растительного происхождения уступает бактериальной наноцеллюлозе по таким показателям, как степень кристалличности и степень полимеризации.

МЕТОДЫ

Культивирование бактериальной наноцеллюлозы проводили в лабораторных условиях по методике [18].

Культивирование проводили в климатической камере Binder KBW 400-230 V (Германия) на полусинтетической питательной среде (10 г/л чёрного байхового чая, 20 г/л глюкозы) статически в условиях постоянного воздуха обмена при температуре 27 °C и влажности 80 % в течение 4-14 суток. В качестве продуцента использовали симбиотическую культуру *Medusomyces gisevii* Sa-12, приобретенную во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов. Преимущества симбиотического продуцента были нами подробно обсуждены в работе [19]. После окончания культивирования производили съем гель-плёнок с поверхности питательной среды и их промывку 2%-ным раствором NaOH в течение 2 суток, затем пленки промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции. Затем гель-плёнки промывали 0,25%-ным раствором HCl в течение 2 суток с последующей промывкой дистиллированной водой до pH = 7. В результате были получены гель-плёнки бактериальной наноцеллюлозы жемчужно-белого цвета. Полученная масса гель-плёнок подвергалась автоклавированию, часть была передана в Алтайский государственный медицинский университет, часть в Краевую клиническую больницу города Барнаула, а оставшаяся часть использовалась в лаборатории биоконверсии для изучения свойств и функционализации. Образцы гель-плёнок бактериальной наноцеллюлозы высушивали в лиофильной сушке «HR 7000 M» (США) до постоянной массы для расчёта выхода и анализа основных свойств.

Выход высущенной бактериальной наноцеллюлозы рассчитывали по следующей формуле:

$$W = \frac{m}{c \cdot V \cdot 0,9} \cdot 100 \% \quad (1),$$

где W – выход бактериальной наноцеллюлозы, %; m – масса образца бактериальной наноцеллюлозы в пересчете на абсолютно сухое вещество, г;

C – концентрация редуцирующих веществ в

среде в пересчете на глюкозу, г/л;

V – начальный объем среды, л;

0,9 – коэффициент пересчёта, обусловленный отщеплением молекулы воды при полимеризации глюкозы в целлюлозу.

Степень полимеризации образцов бактериальной наноцеллюлозы определялась вискозиметрическим методом [20] с использованием в качестве растворителя кадоксена (ethylenediamine, AO LenReaktiv, CAS No. 107-15-3, Russia; cadmium oxide, AO LenReaktiv, CAS No. 1306-19-0 Russia).

Растровая электронная микроскопия лиофилизованных образцов бактериальной наноцеллюлозы выполнялась с помощью микроскопа JSM-840 (JEOL Ltd., Токио, Япония) с рентгеновским микроанализатором Link-860 серии II.

Структура и химическое строение бактериальной наноцеллюлозы исследовались на инфракрасном спектрофотометре «Инфракалом ФТ-801» (Россия) в таблетках KBr.

Работа выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего в течение года было наработано 16 кг гель-плёнок бактериальной наноцеллюлозы, экспериментальная выборка представлена более чем 50 образцами. Средняя влажность образцов бактериальной наноцеллюлозы составила 99,2±0,1 %, средний выход бактериальной наноцеллюлозы составил 12±1 % от количества глюкозы в питательной среде. В то время как выход бактериальной наноцеллюлозы в мировой практике на питательной среде *Khestrina-Shrama*, которая является классической для культивирования бактериальной наноцеллюлозы, составил 4 % [21], что в 3 раза ниже полученных экспериментальных данных.

Далее провели измерения характеристик полученных гель-плёнок бактериальной наноцеллюлозы: степень полимеризации и определение толщины фибрill бактериальной наноцеллюлозы. Следует отметить трудоемкость культивирования, так как при концентрации глюкозы в среде 20 г/л и разовой загрузке 5 дм³ требуются большие площади. Высота слоя питательной среды составляет обычно 2,0-2,5 см³, в климатической камере возможно разместить четыре яруса полок для культуральных сосудов. Увеличение количества ярусов нецелесообразно, поскольку это может привести к недостаточной аэрации и, как следствие, существенному снижению выхода бактериальной наноцеллюлозы [22]. Схема культивирования бактериальной наноцеллюлозы представлена на рисунке 1. Она состоит из стандартных для биотехнологического процесса операций: приготовления питательной среды, подготовки продуцента, культивирования, отделения продукта от культуральной жидкости (съем гель-плёнок бактериальной наноцеллюлозы), промывка гель-плёнок, стерилизация гель-плёнок (либо лиофильная сушка). По итогам проведенных за год наработок партий бактериальной наноцеллюлозы рассчитали эффективность ее биосинтеза, по сравнению с эффективностью биосинтеза растительной целлюлозы.

ИК-спектр бактериальной наноцеллюлозы представлен на рисунке 2. Высушенные лиофильно образцы бактериальной наноцеллюлозы были функционализированы нитрованием с использованием серно-азотной кислотной смеси.

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЗЫ НА ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ



Рисунок 1 – Схема процесса получения бактериальной наноцеллюзы

Figure 1 – Schematic diagram of the process for obtaining bacterial nanocellulose

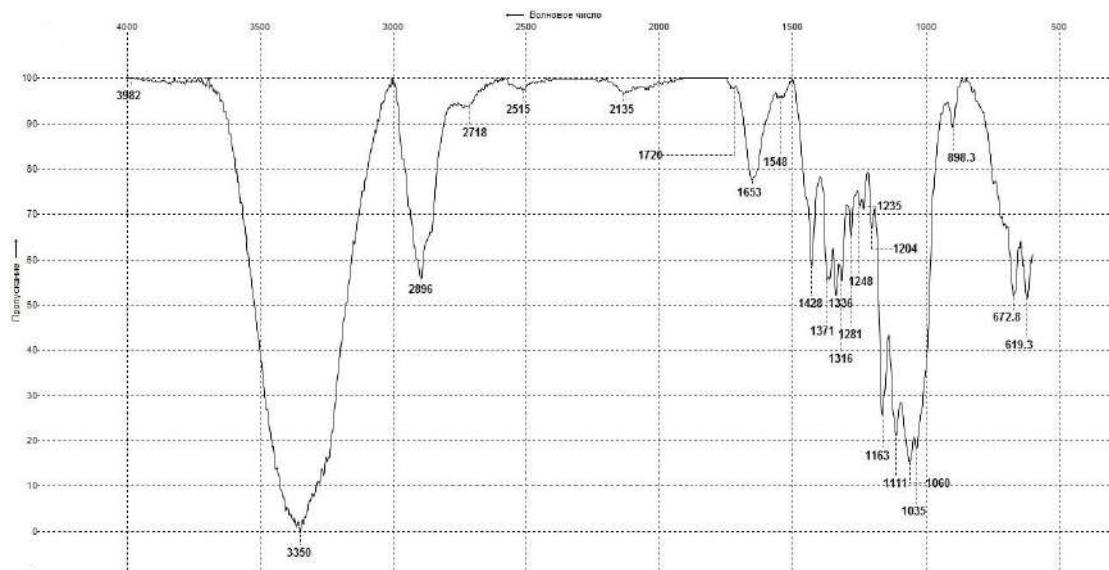


Рисунок 2 – ИК-спектр бактериальной наноцеллюзы

Figure 2 – IR spectrum of bacterial nanocellulose

ОБСУЖДЕНИЕ

Прирост древесины в умеренной полосе России за год составляет 0,6 т/га согласно [23], тогда, теоретически, если принять массовую долю целлюлозы в древесине 50 %, с 1 м² за 365 суток можно получить 0,03 кг целлюлозы (если не учитывать производственные потери). Полезная площадь климатической камеры (т.е. суммарная площадь поверхности культивирования) составляет 0,79 м², таким образом с 1 м² за один цикл в лаборатории возможно получение от 1,2 до 2,0 кг влажной бактериальной наноцеллюзы или 9,7-16,1 г абсолютно сухой бактериальной наноцеллюзы (в зависимости от продолжительности цикла). Это в 17,7 раз эффективнее, чем биосинтез целлюлозы древесины.

Средняя степень полимеризации бактериальной наноцеллюзы составила 3000±200, что соот-

ветствует данным мировой научной литературы, по результатам растровой электронной микроскопии ширина нанофибрилл составила 60±7 нм.

Анализ ИК-спектра, полученной бактериальной наноцеллюзы: широкая полоса в области 3350 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям растяжения ОН-групп, что указывает на склонность материалов к гидрофильности. Пик в области 2896 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям растяжения С–Н, СН₂ групп, колебания в области 1653 см⁻¹ обусловлены деформационной вибрацией поглощенной воды, связанной с гидрофильной природой целлюлозных материалов [24]. ИК-спектры образцов целлюлозы характеризуются четко выраженной структурой полос в области 1430-1435 см⁻¹ и 1372-1373 см⁻¹, соответствующих деформационным колебаниям СН₂-группы и СН-группы [25]. Полосы, расположенные в областях

1160-1165 см⁻¹, 1110-1114 см⁻¹, 1058-1059 см⁻¹ связаны с асимметричным растяжением мостика С—О—С β-гликозидной связи, растяжением скелета пиранозного кольца С—О и растяжением связей С—О молекулы целлюлозы. Отсутствуют полосы поглощения, соответствующие ароматическим группам лигнина и характеристическим частотам гемицеллюлоз, что подтверждает чистоту целлюлозы.

Лиофильно высушенная бактериальная наноцеллюлоза была пронитрована. Нитраты бактериальной целлюлозы характеризовались массовой долей азота в диапазоне от 8,68 до 11,56 %, растворимостью в спиртоэфирной смеси 16,5-91,0 %, вязкостью 32-255 мПа×с. Наноразмерный характер волокон нитратов бактериальной целлюлозы сохранился. Таким образом, укрупненный образец бактериальной наноцеллюлозы, обладающей химической чистотой, имеющий степень полимеризации целлюлозы 3000 (аналогично хлопковой целлюлозе в пластиах) и наноразмерную толщину фибрилл, пригоден для нитрования с целью получения наноразмерных нитратов целлюлозы [26,27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что за 365 суток в лабораторных условиях при использовании климатической камеры Binder объёмом 400 дм³ и культивировании в течение 14 суток возможно получить 0,53 кг сухой бактериальной наноцеллюлозы. Это в 17,7 раз эффективнее, чем биосинтез целлюлозы древесины. Полученные ИК-спектры подтверждают, что продукт бактериального синтеза является химически чистой целлюлозой. Значения степени полимеризации полученных образцов бактериальной наноцеллюлозы составляют порядка 3000 и соответствуют данным мировой научной литературы.

Результаты растровой электронной микроскопии высушенных лиофильно образцов демонстрируют наноразмерность фибрилл бактериальной наноцеллюлозы.

Полученные образцы лиофильно высушенной бактериальной наноцеллюлозы предназначены для успешного синтеза наноразмерных нитратов целлюлозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paul, S. & Dutta A, (2018). Dutta Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion Resources. *Conservation and Recycling*, 164-174. doi:10.1016/j.resconrec.2017.12.0 05.
2. Amorim, J.D.P. & et al. (2020) Plant and bacterial nanocellulose: Production, properties and applications in medicine, food, cosmetics, electronics and engineering. A review *Environmental Chemistry Letters*, (18), 851-869. doi: 10.1007/s10311-020-00989-9.
3. Santhosh, A.S. & Umesh, M. (2024). Valorization of waste chilli stalks (*Capsicum annuum*) as a sustainable substrate for cellulose extraction: insights into its thermomechanical, film forming and biodegradation properties. *Biomass Conv. Bioref.*, 1-14 doi: 10.1007/s13399-024-05370-2
4. Klemm, D., & et al. (2018). Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today's state. *Materials Today*, (7), 720-748. doi: 10.1016/j.mattod.2018.02.001.
5. Jiao, X. & Jia, K. et al. (2024). Nanocellulose-based functional materials towards water treatment. *Carbohydrate*. *Polymers*, 122977. doi: 10.1016/j.carbpol.2024.122977.
6. Гмошинский И.В., Шипелин В.А., Хотимченко С.А. Наноцеллюлозы в пищевой промышленности и медицине: структура, получение и применение // Вопросы питания. 2022. № 3. С. 6-20. doi: 10.33029/0042-8833-2022-91-3-6-20.
7. Пыжев А.И., Гордеев Р.В., Цандер Е.В. Углеродное регулирование как инструмент государственной политики по стимулированию глубокой переработки лесного сырья в России // Сиб. фед. округ. // Гуманитарные науки. 2024. № 6. С. 1183-1191.
8. Samyn, P. & et al. (2023). Opportunities for bacterial nanocellulose in biomedical applications: Review on biosynthesis, modification and challenges. *International Journal of Biological Macromolecule*, 123316. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123316.
9. Wang, J. & Tavakoli, J., Tang, Y. (2019). Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods—A review. *Carbohydrate polymers*, 63-76. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.05.008.
10. Yang, H. & et al. (2023). Nanocellulose-graphene composites: Preparation and applications in flexible electronics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126903. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126903.
11. Martínez, E. & et al. (2023). Nata de fique: A cost-effective alternative for the large-scale production of bacterial nanocellulose. *Industrial Crops and Products*, 116015. doi: 10.1016/j.indcrop.2022.116015.
12. Coelho, R.M.D. & et al. (2020). Kombucha. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 100272. doi: 10.1016/j.ijgfs.2020.100272.
13. Spiridon, I. & Popa, V.I. (2008) Hemicelluloses: major sources, properties and applications. *Monomers, polymers and composites from renewable resources*, Elsevier, pp. 289-304. doi: 10.1016/B978-0-08-045316-3.00013-2.
14. Горбатова П.А., Шавыркина Н.А. Зависимость массовой доли азота в нитратах бактериальной наноцеллюлозы от содержания воды в нитрующей смеси // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 5. С. 75-81. doi: 10.25699/SSSB.2023.51.5.009.
15. Chen, L., & Cao, X., Gao, J., et al. (2021). Nitrocellulose-based energetic nanocomposites as propellants and explosives for military applications. *ACS Applied Nano Materials*, (4), 1906-1915. doi: 10.1021/acsanm.0c03263.
16. Gismatulina, Y.A. (2023). Promising energetic polymers from nanostructured bacterial cellulose. *Polymers*, (15), 2213. doi: 10.3390/polym15092213.
17. Klemm, D. & Petzold-Welcke, K.B. et al. (2020) Biotech nanocellulose: A review on progress in product design and today's state of technical and medical applications. *Carbohydr Polym*, (254), 117313. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.117313.
18. Shavyrkina, N.A. (2021). Scale-up of biosynthesis process of bacterial nanocellulose. *Polymers*, (12), 1920. doi: 10.3390/polym13121920.
19. Skiba, E.A. & Shavyrkina, N.A. et al. (2023) Biosynthesis of Bacterial Nanocellulose from Low-Cost Cellulosic Feedstocks: Effect of Microbial Producer, 24. 14401. doi: 10.3390/ijms241814401.
20. Bogolitsyn, K., & Parshina, A., Aleshina, L. (2020). Structural features of brown algae cellulose. *Cellulose*, 27(17), 1-14. doi: 10.1007/s10570-020-03485-z.
21. Amorim, L.F.A. & et al. (2023). Sustainable bacterial cellulose production by low cost feedstock: Evaluation

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЗЫ НА ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ

tion of apple and tea by-products as alternative sources of nutrients. *Cellulose*, (9), 5589-5606. doi: 10.1007/s10570-023-05238-0.

22. Shavyrkina, N.A., & et al. (2021). Static culture combined with aeration in biosynthesis of bacterial cellulose. *Polymers*, (23), 4241. doi: 10.3390/polym13234241.

23. Лесной фонд России // Справочник. М.: ВНИИЦ лесресурс. С. 208.

24. Ait, B.A. & et al. (2021). Extraction, characterization and chemical functionalization of phosphorylated cellulose derivatives from Giant Reed Plant. *Cellulose*, (8), 4625-4642. doi: 10.1007/s10570-021-03842-6.

25. Gabriel T., Wondu K., Dilebo J. Valorization of khat (*Catha edulis*) waste for the production of cellulose fibers and nanocrystals // *PLoS One*. 2021. Т. 16. – №. 2. С. e0246794. doi: 10.1371/journal.pone.0246794.

26. Горбатова П.А., Шавыркина Н.А. Влияние температуры нитрования на свойства нитратов бактериальной целлюлозы // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (22-24 мая 2024 года, г. Бийск) / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2024. С. 251-252.

27. Свойства нитратов целлюлозы, полученных нитрованием бактериальной целлюлозы с использованием смеси азотной и серной кислот / Горбатова П.А., Корчагина А.А. и др. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2024. Т. 14. №. 2. С. 236-244. doi: 10.21285/achb.915. EDN: OKCVTR.

Информация об авторах

А. А. Зенкова, инженер лаборатории биоконверсии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук; студент магистратуры, Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ.

Н. А. Шавыркина, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории биоконверсии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН); доцент кафедры биотехнологии, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ.

REFERENCES

1. Paul, S. & Dutta A, (2018). Dutta Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion Resources. *Conservation and Recycling*, 164-174. doi:10.1016/j.resconrec.2017.12.0 05.
2. Amorim, J.D.P. & et al. (2020) Plant and bacterial nanocellulose: Production, properties and applications in medicine, food, cosmetics, electronics and engineering. A review *Environmental Chemistry Letters*, (18), 851-869. doi: 10.1007/s10311-020-00989-9.
3. Santhosh, A.S. & Umesh, M. (2024). Valorization of waste chilli stalks (*Capsicum annuum*) as a sustainable substrate for cellulose extraction: insights into its thermomechanical, film forming and biodegradation properties. *Biomass Conv. Bioref*, 1-14. doi: 10.1007/s13399-024-05370-2.
4. Klemm, D., & et al. (2018). Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today's state. *Materials Today*, (7), 720-748. doi: 10.1016/j.mattod.2018.02.001.
5. Jiao, X. & Jia, K. et al. (2024). Nanocellulose-based functional materials towards water treatment. *Carbohydrate Polymers*, 122977. doi: 10.1016/j.carbpol.2024.122977.
6. Gmoshinsky I.V., Shipelin V.A., Khotimchenko S.A. Nanocelluloses in the food industry and medicine: structure, preparation and application // *Nutrition issues*. 2022. No. 3. pp. 6-20. doi: 10.33029/0042-8833-2022-91-3-6-20. (In Russ.).
7. Pyzhev A.I., Gordeev R.V., Tsander E.V. Carbon regulation as a tool of state policy to stimulate deep processing of forest raw materials in Russia // *Sib. fed. District. // Humanities*. 2024. No. 6. pp. 1183-1191. (In Russ.).
8. Samyn, P. & et al. (2023). Opportunities for bacterial nanocellulose in biomedical applications: Review on biosynthesis, modification and challenges. *International Journal of Biological Macromolecule*, 123316. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123316.
9. Wang, J. & Tavakoli, J., Tang, Y. (2019). Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods—A review. *Carbohydrate polymers*, 63-76. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.05.008.
10. Yang, H. & et al. (2023). Nanocellulose-graphene composites: Preparation and applications in flexible electronics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126903. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126903.
11. Martínez, E. & et al. (2023). Nata de fique: A cost-effective alternative for the large-scale production of bacterial nanocellulose. *Industrial Crops and Products*, 116015. doi: 10.1016/j.indcrop.2022.116015.
12. Coelho, R.M.D. & et al. (2020). Kombucha. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 100272. doi: 10.1016/j.ijgfs.2020.100272.
13. Spiridon, I. & Popa, V.I. (2008) Hemicelluloses: major sources, properties and applications. *Monomers, polymers and composites from renewable resources*, Elsevier, pp. 289-304. doi: 10.1016/B978-0-08-045316-3.00013-2.
14. Gorbatova P.A., Shavyrkina N.A. Dependence of the mass fraction of nitrogen in nitrates of bacterial nanocellulose on the water content in the nitrating mixture // *South Siberian Scientific Bulletin*. 2023. No. 5. pp. 75-81. doi: 10.25699/SSSB.2023.51.5.009. (In Russ.).
15. Chen, L., & Cao, X., Gao, J., et al. (2021). Nitrated bacterial cellulose-based energetic nanocomposites as propellants and explosives for military applications. *ACS Applied Nano Materials*, (4), 1906-1915. doi: 10.1021/acsanm.0c03263.
16. Gismatulina, Y.A. (2023). Promising energetic polymers from nanostructured bacterial cellulose. *Polymers*, (15), 2213. doi: 10.3390/polym15092213.
17. Klemm, D. & Petzold-Welcke, K.B. et al. (2020) Biotech nanocellulose: A review on progress in product design and today's state of technical and medical applications. *Carbohydr Polym*, (254), 117313. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.117313.
18. Shavyrkina, N.A. (2021). Scale-up of biosynthesis process of bacterial nanocellulose. *Polymers*, (12), 1920. doi: 10.3390/polym13121920.

19. Skiba, E.A. & Shavyrkina, N.A. et al. (2023) Biosynthesis of Bacterial Nanocellulose from Low-Cost Cellulosic Feedstocks: Effect of Microbial Producer, 24. 14401. doi: 10.3390/ijms241814401.

20. Bogolitsyn, K., & Parshina, A., Aleshina, L. (2020). Structural features of brown algae cellulose. Cellulose, 27(17), 1-14. doi: 10.1007/s10570-020-03485-z.

21. Amorim, L.F.A. & et al. (2023). Sustainable bacterial cellulose production by low cost feedstock: Evaluation of apple and tea by-products as alternative sources of nutrients. Cellulose, (9), 5589-5606. doi: 10.1007/s10570-023-05238-0.

22. Shavyrkina, N.A., & et al. (2021). Static culture combined with aeration in biosynthesis of bacterial cellulose. Polymers, (23), 4241. doi: 10.3390/polym13234241.

23. Forest Fund of Russia // Handbook. M.: VNIITS lesresurs. C. 208. (In Russ.).

24. Ait, B.A. & et al. (2021). Extraction, characterization and chemical functionalization of phosphorylated cellulose derivatives from Giant Reed Plant. Cellulose, (8), 4625-4642. doi: 10.1007/s10570-021-03842-6.

25. Gabriel, T., Wondu, K. & Dilebo, J. (2021). Valorization of khat (*Catha edulis*) waste for the production of cellulose fibers and nanocrystals. PLoS One. 16(2). e0246794. doi: 10.1371/journal.pone.0246794.

26. Gorbatova P.A., Shavyrkina N.A. The effect of nitration temperature on the properties of bacterial cellulose nitrates // Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries: materials of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and young scientists with international participation (May 22-24, 2024, Biysk) / Alt. State Technical University. un-t, BTI. Biysk: Publishing House of Alt. state Technical University. Unita, 2024. C. 251-252. (In Russ.).

27. Properties of cellulose nitrates obtained by nitration of bacterial cellulose using a mixture of nitric and sulfuric acids / Gorbatova P.A., Korchagina A.A. et al. // Izvestiya vuzov. Applied Chemistry and Biotechnology, 2024. vol. 14. No. 2. pp. 236-244. doi: 10.21285/achb.915. EDN: OKCVTR. (In Russ.).

Information about the authors

A. A. Zenkova, *Engineer of the Bioconversion Laboratory, Institute for Problems of Chemical and Energy Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk, Russia; Master's degree student, Biysk Institute of Technology (philia) of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Institute of Chemical and Energy Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.*

N. A. Shavyrkina, *Ph.D., Senior Researcher at the Bioconversion Laboratory, Institute for Problems of Chemical and Energy Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk, Russia; Associate Professor of the Department of Biotechnology, Biysk Institute of Technology (branch) of the Federal State Budgetary Institution of Science.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 18 Dec 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аверьянова Е. В.	27	Мелишкевич Ю. И.	137
Александров Н. К.	15	Мешков В. О.	7
Алексеева А. А.	187	Минаев И. В.	143
Алёшин В. Н.	112	Минакова Н. Н.	220
Альшевский Д. Л.	15	Мирошина Т. А.	94
Ананьева Е. С.	27, 237	Мозжерина И. В.	81
Анисимова Л. В.	127	Молибога Е. А.	40
Аревков М. А.	157	Мосоров В. И.	152
Афанасьевна А. А.	88	Мохтарова С. Л.	34
Балымова М. В.	34	Мусина О. Н.	121
Барсуков А. Р.	182	Мухамметшина А. Г.	34
Безносов Ю. В.	59	Мухарлямова А. З.	34
Беляков М. В.	53	Мясников А. Ю.	231
Березовская В. П.	157	Негодяев А. З.	231
Болдинов Д. И.	27	Новокшанова А. Л.	108
Бондарева О. С.	199	Новоселов С. В.	7
Бондаренко Н. И.	121	Охлопкова А. А.	168
Бураковская Н. В.	40	Павлова Т. А.	88
Буркин К. Е.	34	Першакова Т. В.	112
Валеева А. Р.	163	Петрова П. Н.	207
Верещагин В. Ю.	214	Погиба А. Ю.	214
Вострикова Л. Н.	46	Попов В. Г.	81
Гоголева О. В.	207	Резниченко И. Ю.	94
Голых Р. Н.	182	Розный А. А.	231
Гончаров С. С.	143	Рычкова А. Д.	157
Горбачева М. В.	20	Рядинская А. А.	100
Гордиенко П. С.	168	Саберзянова Г. В.	74
Горелова О. М.	176	Сайфутдинов А. М.	34
Готлиб Е. М.	163, 168	Самсонова Д. А.	66
Данилова С. Н.	168	Сартакова О. Ю.	176
Емельянов А. Н.	137	Сенотрусоева Т. А.	137
Еремеева С. В.	46	Серебренникова Е. С.	127
Ермолова Е. О.	59	Ситников А. А.	231
Ершова Т. А.	137	Сливин А. Н.	182
Ефременков И. Ю.	53	Собачкин А. В.	231, 237
Зарибулина О. К.	40	Соловьев В. В.	157
Зачесова И. А.	20	Степанова С. В.	187
Зенин М. Н.	27	Сумеркина Ю. С.	88
Зенкова А. А.	224, 244	Твердов И. Д.	163
Иванов М. С.	66	Титоренко Е. Ю.	59
Иванова Е. П.	137	Усатюк Д. А.	121
Иванова Л. Н.	168	Ускова Ю. А.	132
Каменская Е. П.	74	Устинова Ю. В.	59
Кандров Р. Х.	132	Федоров А. Л.	207
Кийски В. Д.	66	Федорова А. П.	193
Клементьев Д. С.	143	Филимонов В. Ю.	231
Кокшаров А. А.	7	Хапёрских С. А.	237
Кондратов А. П.	214	Хисамова А. Ш.	187
Коробков К. С.	152	Хмелёв В. Н.	182
Крапива Т. В.	7	Чуев С. А.	100
Купин Г. А.	112	Чуканов А. Н.	143
Кутепов С. Н.	143	Шавыркина Н. А.	244
Кушбанова А. А.	46	Шагаева Н. Н.	20
Левчук Т. В.	137	Юдин Д. Р.	193
Леонова Е. Ю.	81	Яковлев В. И.	231
Ли Н. Г.	137	Яковлева Т. В.	112
Логинова М. В.	231	Яковченко Н. В.	66
Лыгденов Б. Д.	152	Якубова О. С.	46
Лях В. А.	137	Ямалеева Е. С.	163, 168
Ляхомский С. Я.	20	Ярусова С. Б.	168
Маюрикова Л. А.	7		

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 прошедшем времени. В обсуждении рекомендуется объяснить значимость вашего исследования. Показать, какие знания были получены результате исследования, обозначить их перспективы и сравнить их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Данные должны быть систематизированы и иметь логическую связь с текстом.

4) **Выводы** – этот раздел рекомендуется начать с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы.

5) **Список литературы** (шрифт «Arial», размер – 9 пунктов) – не менее 10 позиций, оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая запись. Общие требования и правила составления».

• Сведения об авторах приводится после списка литературы, с предшествующими словами «Информация об авторах» - инициалы, фамилия — учёная степень, звание, место работы, телефон);

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

• После приводят список литературы на латинице (REFERENCES) согласно стилю APA (American Psychological Association - <https://apastyle.apa.org>). Нумерация записей в дополнительном перечне должна совпадать с нумерацией записей в основном перечне затекстовых библиографических ссылок.

- Ниже приводятся сведения об авторах на английском языке после слов «Information about the authors».
- В конце статьи авторы должны указать об отсутствии или наличии конфликта интересов.

Для создания формул и таблиц используются встроенные возможности Microsoft Word. Рисунки цифрового формата (в электронном виде) создаются средствами Microsoft Word или другими программами и вставляются в нужное место документа, название таблиц и рисунков дублируются на английском языке.

Размеры рисунков не должны превышать границы полей страницы основного текста документа с учетом подрисуночной подписи. Рисунки издательством не редактируются. Если рисунок по ширине превышает размер колонки, то необходимо ставить перед ним и после него разрыв раздела на текущей странице и располагать рисунок в начале или в конце страницы.

Рисунки, надписи и объекты Microsoft Word должны перемещаться вместе с текстом, т.е. быть не поверх текста.

Шаблон для оформления статьи можно скачать на сайте журнала: <https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest>.

К статье необходимо предоставлять следующие документы: **экспертное заключение, согласие каждого автора на размещение статьи, согласие на обработку персональных данных**.

К публикации принимаются статьи, **ранее нигде не опубликованные** и не представленные к печати в других изданиях. Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят двухстороннее слепое рецензирование. Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Публикации в журнал принимаются на русском и английском языках.

Электронная версия публикации должна быть отправлена в формате текстового редактора Microsoft Word (расширения .doc, .docx) по электронной почте по адресу polz_journal@mail.ru. Название файла формируется из фамилии и инициалов первого автора (к примеру, «ИвановАА.doc»). Если статей несколько, то к названию файла через знак подчеркивания добавляется порядковый номер (к примеру, «ИвановАА_1.doc»).

Все статьи будут проверены в системе «Антиплагиат», при оригинальности менее 75 % статьи будут возвращены авторам.

Контактная информация:

Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46, 119 ГК, почтовый индекс: 656038.

Стопорева Татьяна Александровна – тел.: 8 (3852) 290946, e-mail: polz_journal@mail.ru.

Подписано в печать 20.06.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.

Усл. п. л. 29,41 Тираж 100 экз. Заказ 2025 – 19.

Отпечатано в типографии АлтГТУ им. И. И. Ползунова

Адрес типографии: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина 46

**АлтГТУ им. И.И. Ползунова
656038 г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, каб. 119 главного корпуса
тел. +7 (3852) 29-09-46
сайт: <https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest/>
e-mail: polz_journal@mail.ru
Дизайн обложки: Р.С. Жуковский, доцент кафедры ТИАрх**