

ISSN 2712-7648

HEALTH, FOOD & BIOTECHNOLOGY

VOLUME 7 • ISSUE 4 • DECEMBER 2025



HFB
HEALTH, FOOD & BIOTECHNOLOGY

№ 4 – 2025

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет» (РОСБИОТЕХ)

Редакция

Заведующий редакцией	—	Тихонова Елена Викторовна
Выпускающий редактор	—	Косычева Марина Александровна
Редактор по этике	—	Косычева Марина Александровна
Ответственный секретарь	—	Лаптева Елена Александровна
Медийный редактор	—	Щербакова Екатерина Олеговна

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ №ФС77-72959 от 25 мая 2018 г.

Адрес:

125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11
Тел. +7 (499) 750-01-11*6585
E-mail: hfb@mgupp.ru
Официальный сайт учредителя: mgupp.ru
Официальный сайт редакции: hfb-mgupp.com

© ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет» (РОСБИОТЕХ), 2025.

№ 4 – 2025

Periodicity of publication – 4 issues per year

Founder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Biotechnological University» (BIOTECH University)

Editorial Team

Head of Editorial Team	—	Elena V. Tikhonova
Editor of Issue	—	Marina A. Kosycheva
Ethics Editor	—	Marina A. Kosycheva
Executive Secretary	—	Elena A. Lapteva
Social Media and Product Editor	—	Ekaterina O. Shcherbakova

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communication, Information Technologies and Mass Media. The Mass Media Registration Certificate EL No FS77-72959 dated May 25, 2018.

Address::

11, Volokolamskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 125080
Tel. +7 (499) 750-01-11*6585
E-mail: hfb@mgupp.ru
Official web site of Founder: mgupp.ru
Official web site of the Editorial Office: hfb-mgupp.com

© FSBEI HE «Russian Biotechnological University» (BIOTECH University) , 2025.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

■ ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Данильчук Татьяна Николаевна

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

■ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Абдуллаева Асият Мухтаровна

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

Андреева Татьяна Ивановна

Институт пластмасс им. Г.С. Петрова, Россия

Бычков Алексей Леонидович

Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН, Россия

Данильчук Татьяна Николаевна

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

Джавахян Марина Аркадьевна

Московский государственный медико-стоматологический университет им А.И. Евдокимова, Россия

Жилякова Елена Теодоровна

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия

Игнар Штефан

Варшавский университет естественных наук, Польша

Игнатенко Григорий Анатольевич

Донецкий национальный медицинский университет им. М. Горького, ДНР

Кирш Ирина Анатольевна

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

Коврига Владислав Витальевич

ООО «Группа «Полимертепло», Россия

Корокин Михаил Викторович

Белгородский национальный исследовательский университет, Россия

Куркин Денис Владимирович

Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова, Россия

Маль Галина Сергеевна

Курский государственный медицинский университет, Россия

Налетов Андрей Васильевич

Донецкий национальный медицинский университет им. М. Горького, ДНР

Новиков Олег Олегович

Научно-образовательный ресурсный центр РУДН, Россия

Оковитый Сергей Владимирович

Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет, Россия

Присный Андрей Андреевич

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия

Сагян Ашот Серобович

Национальная Академия наук РА, Республика Армения

Самбандам Ананадан

Национальный институт технологий, Индия

Северинов Константин Викторович

Институт молекулярной генетики НИЦ «Курчатовский институт», Россия

Серба Елена Михайловна

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи (ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»), Россия

Симонов-Емельянов Игорь Дмитриевич

Российский технологический университет МИРЭА, Россия

Фриас Йезус

Дублинский технологический институт, Ирландия

Цыганова Татьяна Борисовна

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Россия

Чалых Татьяна Ивановна

Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Россия

Щетинин Михаил Павлович

Международная промышленная академия, Россия

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF**Tatyana N. Danilchuk**

Russian Biotechnological University (BIOTECH University)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD**Asiyat M. Abdullaeva**

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Russia

Tatyana I. Andreeva

G.S. Petrov Scientific Research Institute of Plastics, Russia

Aleksey L. Bychkov

Institute of Solid-State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russia

Tatyana N. Danilchuk

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Russia

Marina A. Dzhavakhyan

A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Russia

Elena T. Zhilyakova

Belgorod State University, Russia

Jesus Frias

Dublin Institute of Technology, Ireland

Stefan Ignar

Warsaw University of Life and Sciences, Poland

Grigory A. Ignatenko

Donetsk National Medical University, DPR

Irina A. Kirsh

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Russia

Mikhail V. Korokin

Belgorod State University, Russia

Vladislav V. Kovriga

Polymerteplo Group, Russia

Denis V. Kurkin

A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Russia

Galina S. Mal

Kursk State Medical University, Russia

Andrey V. Nalyotov

Donetsk National Medical University, DPR

Oleg O. Novikov

RUDN University Shared Research and Educational Centre, Russia

Sergey V. Okovityi

Saint-Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University, Russia

Andrey A. Prisnyi

Belgorod State University, Russia

Ashot S. Saghyan

National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Armenia

Anandan Sambandam

National Institute of Technology of Tiruchirappalli, India

Elena M. SerbaAll-Russian Research Institute of Food Biotechnology, Federal Research **Center for Nutrition**, Biotechnology and Food Safety, Russia**Konstantin V. Severinov**

Institute of Gene Biology Russian Academy of Sciences, Russia

Igor D. Simonov-Emelyanov

MIREA-Russian Technological University, Russia

Mikhail P. Schetinin

International Industrial Academy, Russia

Tatyana I. Tchalykh

Russian University of Economics named after G. V. Plekhanov, Russia

Tatyana B. Tsyganova

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Russia

СОДЕРЖАНИЕ

РЕДАКТОРСКАЯ СТАТЬЯ

М. А. Косычева, Е. В. Тихонова
От протокола к публикации: почему этическое одобрение является обязательным
этапом научного исследования..... 6

ПИТАНИЕ

Т. А. Синявская, С. А. Павлова
Сравнительная оценка влияния порошков
из высушенных язычковых цветков бархатцев и календулы — заменителей рылец шафрана
на показатели качества сдобного печенья..... 13

А. А. Махова, Ю. К. Юшина, Е. В. Зайко, М. А. Грудистова, В. К. Дерюгин, О. А. Стаханова
Микобиота производственной среды молокоперерабатывающих предприятий:
сравнительный анализ структуры и распространенности..... 25

БИОТЕХНОЛОГИИ

К. Э. Бетехтин, Е. Р. Вольнова, Л. Э. Розанцева, Н. Г. Машенцева
Использование гидролизата кератина, полученного микробной конверсией куриного пера,
в косметической сыворотке для ухода за волосами 37

А. В. Вейберов, М. И. Губанова, П. О. Орел, И. А. Кирш, О. А. Банникова
Современное состояние технологий инкапсулирования 56

CONTENTS

EDITORIAL

Marina A. Kosycheva, Elena V. Tikhonova

From Protocol to Publication: Why Ethical Approval is a Mandatory Step in Research 7

FOOD

Tatiana A. Sinyavskaya, Snezhana A. Pavlova

Development of Plant-Based Food Additives – Saffron Analogues and Their Impact on the Organoleptic Properties
of Confectionery Products 14

*Anzhelika A. Makhova, Yulia K. Yushina, Elena V. Zaiko, Maria A. Grudistova, Vyacheslav K. Deryugin,
Olesya A. Stakhanova*

Mycobiota of the Production Environment of Dairy Processing Enterprises: Comparative Analysis
of Structure and Prevalence 26

BIOTECHNOLOGY

Kirill E. Betekhtin, Ekaterina R. Volnova, Lyubov E. Rozantseva, Natalia G. Mashentseva

The Use of Keratin Hydrolysate Obtained by Microbial Conversion of Chicken Feathers
as Part of a Cosmetic Serum for Hair Care 38

Anatoliy V. Veyberov, Marina I. Gubanova, Polina O. Orel, Irina A. Kirsh, Olga A. Bannikova

Current State of Encapsulation Technologies 57

<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s306>

От протокола к публикации: почему этическое одобрение является обязательным этапом научного исследования

М. А. Косычева, Е. В. Тихонова

Российский государственный
геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия

Корреспонденция:

Косычева Марина Александровна,
Российский государственный
геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
117485, Россия, г. Москва,
ул. Миклухо-Маклая, 23
E-mail: kosychevama@mgri.ru

Конфликт интересов:

авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Поступила: 01.12.2025

Поступила после
рецензирования: 27.12.2025

Принята: 26.12.2025

Copyright: © 2025 Авторы

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена анализу роли и нормативных требований к этической экспертизе в современных биомедицинских исследованиях с участием людей и животных. В условиях роста числа исследований в области здоровья, питания и биотехнологий соблюдение этических норм перестает быть формальностью и становится основой научной добросовестности, достоверности данных и общественного доверия. Авторы обосновывают получение одобрения исследования независимым этическим комитетом как неотъемлемого условия для публикации в рецензируемых научных журналах. На основе анализа международных руководств (Хельсинкская декларация, принципы GCP, директива 3R и ARRIVE) детализируется, какую информацию в контексте этического одобрения авторам необходимо представить в разделе «Материалы и методы». Приведены типовые формулировки дисклеймеров об участии в эксперименте людей или животных для различных типов исследований, даны практические рекомендации по их оформлению. Особое внимание уделяется системному подходу к экспертизе этическими комитетами, которая должна охватывать не только оценку дизайна исследования, но и условия содержания животных, квалификацию персонала, а также соответствие принципам надлежащей лабораторной практики для доклинических испытаний. Статья адресована исследователям, руководителям научных проектов и членам этических комитетов в качестве рекомендаций для соответствия стандартам научной этики при подготовке публикаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

этическая экспертиза; этический комитет; Хельсинкская декларация; надлежащая лабораторная практика; принципы 3R; информированное согласие; гуманное обращение с животными; научная публикация; научная добросовестность



Для цитирования: Косычева, М. А., & Тихонова, Е. В. (2025). От протокола к публикации: почему этическое одобрение является обязательным этапом научного исследования. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 6-12. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s306>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s306>

From Protocol to Publication: Why Ethical Approval is a Mandatory Step in Research

Marina A. Kosycheva, Elena V. Tikhonova

Sergo Ordzhonikidze Russian State
University for Geological Prospecting
(MGRI), Moscow, Russia

Correspondence:

Marina A. Kosycheva,
Sergo Ordzhonikidze Russian State
University for Geological Prospecting
(MGRI), 23, Miklouho-Maclay
St., Moscow, 117997, Russia
E-mail: kosychevama@mgri.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 01.12.2025

Received in revised form: 27.12.2025

Accepted: 26.12.2025

Copyright: © 2025 The Authors

ABSTRACT

This editorial analyses the role and regulatory requirements for ethical statement in modern biomedical research involving humans and animals. With the growing number of studies in health, nutrition, and biotechnology, adherence to ethical standards is no longer a formality and is becoming the foundation of scientific integrity, data reliability, and public trust. The article substantiates the mandatory approval of an independent ethics committee as an essential condition for publication in peer-reviewed scientific journals. Based on an analysis of international guidelines (the Declaration of Helsinki, GCP principles, the 3Rs, and ARRIVE), the information regarding ethical approval required of authors in the «Materials and Methods» section is detailed. Standard disclaimer formulations for various types of studies are presented, along with practical recommendations for their implementation. The focus is on a systematic approach to ethical statements, which should encompass not only an assessment of the study design but also animal welfare conditions, personnel qualifications, and compliance with the principles of Good Laboratory Practice for preclinical trials. This article is intended for researchers, project managers, and members of ethics committees to scientific ethics standards when preparing publications.

KEYWORDS

ethics committee review and approval, ethics committee, Declaration of Helsinki, good laboratory practice (GLP), 3R principles, informed consent, humane treatment of animals, scientific publication, scientific integrity



To cite: Kosycheva, M. A., & Tikhonova, E. V. (2025). From protocol to publication: Why ethical approval is a mandatory step in scholarly research. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 6-12. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s306>

ВВЕДЕНИЕ

Обязательным условием проведения исследования с участием людей или животных является соблюдение этических принципов, заявленных в Хельсинской декларации¹, представляющей собой свод принципов проведения экспериментов с участием человека, и Директиве 2010/63/ЕС Европейского парламента и Совета о защите животных², которых используют в научных целях. Комитет по этике научных публикации (COPE), принципами которого руководствуются редакции научных журналов по всему миру, также регламентирует необходимость наличия одобрения этическим комитетом исследований с участием животных или людей³. Однако требования к получению этического одобрения на проведение экспериментов определяются регуляторными нормами конкретного государства, и журналы в таких ситуациях призваны разрабатывать собственные правила в соответствии с международной рекомендуемой практикой в предметной области журнала.

Стандартное требование редакций при подаче рукописей заключается в том, чтобы авторы предоставили официальное заявление от этического совета, работающего на базе аффилированного учреждения об этической экспертизе проводимого эксперимента. В нем должно быть указано, что исследование одобрено локальным Этическим комитетом (с приведением номера протокола и даты), либо содержится обоснование, почему такое одобрение не требовалось. Помимо этого, авторы должны получить информированное согласие (где это применимо) от пациентов на публикацию результатов исследования с их участием, а также детально описать, как данное согласие было получено (Miller & Rosenstein, 2002; Мекеко, 2023). В редакционных политиках журналов, публикующих результаты исследований с участием людей или животных, должно быть однозначно прописано, что автор исследования несет ответственность за предоставление точной и полной информации (Fontanarosa et al., 2024; Тихонова & Косычева, 2024). В свою очередь одной из обязанностей редакторов научных журналов является проверка того, что статьи, представленные на рецензирование и принятые к публикации в их журнале, содержат соответствующие заявления об этике и согласии/благополучии (если речь идет о животных), понят-

ные международной аудитории. Если предоставленное авторами заявление не поясняет принятые этические решения, редакторам следует запросить дополнительную информацию.

Учреждения, в которых функционирует локальный этический комитет (ЭК) или институциональный наблюдательный совет (IRB — Institutional Review Board), основывают свою деятельность на фундаментальных международных документах, декларирующих соблюдение этических принципов, и служат критическим фильтром, обеспечивающим баланс между научной ценностью исследования и правами, благополучием и безопасностью его участников (Miller & Rosenstein, 2002; Fontanarosa et al., 2024). Классические работы по этике медицинских исследований (Katz, 1975; Annas & Grodin, 1990) не раз подчеркивали, что даже исследование, формально одобренное этическим комитетом, может содержать морально спорные аспекты. Именно поэтому столь критически важным является полное и прозрачное описание процесса получения информированного согласия. Вместе с тем авторы и редакторы признают, что требование предоставить сами документы согласия журналом невыполнимо, поскольку возлагает на издание неправомерные юридические риски⁴. Сложившейся практикой, таким образом, является не запрос копий, а требование к авторам подтвердить факт получения и надлежащего архивного хранения этих форм на случай необходимости верификации⁵.

Международные документы, на которые необходимо ссылаться

Исследования с участием людей

Хельсинкская декларация Всемирной медицинской ассоциации (WMA Declaration of Helsinki — Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects). В 1964 году Всемирная медицинская ассоциация (ВМА) разработала Хельсинкскую декларацию как свод этических принципов медицинских исследований с участием людей, включая исследования с использованием идентифицируемого человеческого материала или данных. ВМА считает, что эти принципы должны соблюдаться всеми лицами, группами и организациями, участвующими в медицин-

¹ WMA Declaration of Helsinki — Ethical Principles for Medical Research Involving Human Participants. <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki/>

² Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0063>

³ Studies requiring ethics approval. <https://publicationethics.org/guidance/cope-position/studies-requiring-ethics-approval>

⁴ Editor Guidelines Ethics Approval and Informed Consent Statements. (n.d.). https://www.sagepub.com/docs/default-source/rp-pages/info-for-editors/editor-guidelines.pdf?sfvrsn=ae07c1b2_1

⁵ Studies requiring ethics approval. <https://publicationethics.org/guidance/cope-position/studies-requiring-ethics-approval>

ских исследованиях, поскольку эти принципы являются основополагающими для уважения и защиты всех участников исследований, включая как пациентов, так и здоровых добровольцев. Согласно принципам Декларации, в которую последние поправки были внесены 7 октября 2024 года, протокол медицинского исследования должен содержать заявление об этических соображениях и указывать, как были учтены принципы, изложенные в Декларации. Протокол должен включать информацию о целях, методах, ожидаемых преимуществах и потенциальных рисках и издержках, квалификации исследователя, источниках финансирования, любых потенциальных конфликтах интересов, положениях о защите частной жизни и конфиденциальности, поощрениях для участников, положениях о лечении и/или компенсации участникам, которым был нанесен вред в результате участия, и любых других соответствующих аспектах исследования⁶. Данный протокол должен быть представлен на рассмотрение, с последующим получением комментариев, рекомендаций и утверждением в соответствующий комитет по этике исследований до начала его проведения.ЭК при этом должен учитывать этические, правовые и нормативные нормы и стандарты страны или стран, в которых будет проводиться исследование, а также применимые международные нормы и стандарты; при этом следует учитывать, что они не должны приводить к снижению или отмене каких-либо мер защиты участников исследования, изложенных в Декларации.

Международный совет по гармонизации (ICH) GCP (Good Clinical Practice)⁷. С 01.09.2024 г. в целях гармонизации национального регулирования с законодательством ЕАЭС в Российской Федерации были отменены национальные правила надлежащей клинической практики (Приказ Минздрава России от 29.05.2024 № 274н). На уровне ЕАЭС действуют Правила надлежащей клинической практики ЕАЭС⁸, которые подлежат пересмотру на регулярной основе в случае изменения международных норм проведения исследований. Руководство включает в себя 11 рамочных принципов, действующих на протяжении всего жизненного цикла клинических испытаний в отношении этичности, наличия информированного согласия, экспертизы и одобрения клинического испытания, научной обоснованности исследования и квалификации специалистов, от которых зависит качество дизайна исследования; также эти принципы касаются обоснованности рисков клинических испытаний, четкости протокола, достоверности результатов, распределения ролей и обязанностей, кроме того, учет

и исполнение порядка и правил обращения с исследуемыми образцами.

Исследований с участием животных

Руководства ARRIVE (*Animal Research: Reporting of In Vivo Experiments*). Согласно данному руководству авторы несут ответственность за соблюдение правил и руководящих принципов, касающихся использования животных в научных целях, для чего им необходимо наличие соответствующего разрешения на проведение исследования от надлежащего этического комитета и/или регулирующего органа до начала его проведения. Этическое заявление дает редакторам, рецензентам и читателям уверенность в том, что исследования прошли эту этическую проверку (McGrath & Lilley, 2015), что, в свою очередь, способствует прозрачности и пониманию использования животных в исследованиях и укрепляет общественное доверие.

Авторы должны представить четкое заявление, подтверждающее соответствие эксперимента всем применимым нормативным требованиям и этическим принципам. Для этого рекомендуется указывать название учреждения, где исследование было одобрено, и этический комитет, который его рассмотрел, а также номера протокола или лицензии проекта, чтобы исследование можно было идентифицировать. Если исследование не подпадает под действие каких-либо нормативных актов и формальное этическое одобрение не требуется (например, в исследовании использовались виды животных, не попадающие под защиту нормативными актами или законами), необходимо продемонстрировать соблюдение международных стандартов и указать соответствующую ссылку. В таких случаях следует предоставить четкое объяснение причин, по которым исследование освобождается от необходимости получения разрешения регулирующих органов.

Принципы «3R» (*Replacement, Reduction, Refinement* — Замена, Сокращение, Усовершенствование) стали результатом борьбы ученых за новые научные подходы, которые позволили бы минимизировать боль и страдания подопытных животных, сохраняя при этом научную целостность (Tannenbaum & Bennet, 2015). Замена означает замещение живых высших животных, обладающих сознанием, нечувствительным материалом. Под Сокращением понимают уменьшение количества

⁶ WMA Declaration of Helsinki — Ethical Principles for Medical Research Involving Human Participants. <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki/>

⁷ Руководство по надлежащей клинической практике (ICH E6 (R3)): обзор ключевых изменений новой редакции. https://www.lidings.com/ru/media/legalupdates/clinical_practice/

⁸ Решение Совета ЕЭК от 03.11.2016 № 79 «Об утверждении Правил надлежащей клинической практики Евразийского экономического союза».

животных, используемых для получения информации определенного объема и точности. *Усовершенствование* предполагает любое снижение частоты или тяжести негуманных процедур, применяемых к тем животным, которые все еще приходится использовать.

Директива 2010/63/EU Европейского союза была призвана урегулировать вопрос проведения экспериментов на животных с целью улучшения жизни людей и других животных. Эти эксперименты должны быть оправданы с позиции этичности, следовательно, для получения доверия широкой общественности необходимо проведение этической экспертизы. Данная экспертиза должна гарантировать адекватное и четко сформулированное «этическое обоснование» использования животных на всех стадиях научной работы, от первичного планирования до получения результатов и их анализа. При этом ученые должны принимать во внимание (1) возможность достижения цели исследования с помощью альтернативных методов, без использования животных; (2) соблюдение баланса между ожидаемой (или существующей) пользой от проведения эксперимента с последствиями для животных; (3) оценку качества дизайна эксперимента, данных условий содержания животных и квалификации сотрудников, которые необходимы для достижения целей заявленных экспериментов; (4) сведение к минимуму страданий животных за счет применения принципов «3R»⁹. Эффективная этическая экспертиза не должна ограничиваться оценкой отдельных исследований. Ее задача решать и системные проблемы: устанавливать и контролировать единые стандарты содержания животных и работы с ними, а также обеспечивать высокую квалификацию персонала. Для этого необходимы значительные ресурсы, время и всесторонняя поддержка — от руководства учреждения до государственного уровня. Кроме того, экспертиза сама по себе становится ключевым инструментом образования и обмена знаниями, создавая основу для достижения этических целей в науке.

ГОСТ 33044–2014. Межгосударственный стандарт. Принципы надлежащей лабораторной практики. Сфера действия Принципов надлежащей лабораторной практики (НЛП) охватывает неклинические исследования, нацеленные на оценку медицинской и экологической безопасности. Такие исследования могут проводиться в различных условиях: в лаборатории, теплице или в полевой среде. Требования НЛП являются обязательными для всех исследований подобного типа, если они предусмотрены законодательством для процедур регистрации и лицензирования фармацевтических препаратов,

пестицидов, пищевых и кормовых добавок, косметики, ветеринарных средств, промышленных химикатов и аналогичной продукции, за исключением случаев, прямо указанных в национальных нормативных актах¹⁰. Принципы надлежащей лабораторной практики (НЛП) представляют собой систему обеспечения качества. Эта система регламентирует организационный процесс и условия, в которых должны планироваться, проводиться, контролироваться, документироваться и архивироваться неклинические исследования медицинской и экологической безопасности. Ключевая цель НЛП состоит в гарантировании приемлемости результатов исследований. Под приемлемостью понимается, во-первых, доказательность и достоверность получаемых данных, а во-вторых, неукоснительное соблюдение принципов гуманного обращения с лабораторными животными.

Игнорирование этической экспертизы не только ставит под угрозу репутацию исследователей и издания, но и может привести к невосполнимым последствиям, как это показано в работах, анализирующих исторические прецеденты и современные вызовы (McNair, 2022). Более того, строгий этический надзор повышает доверие к науке в обществе и обеспечивает достоверность данных.

Что необходимо указывать в рукописи?

В разделе *Материалы и методы* (или в отдельном подразделе *Этическое одобрение, Соответствие принципам этики*) автор должен четко предоставить следующую информацию:

1. Номер протокола и дату одобрения этического комитета.
2. Полное наименование комитета (например, «Локальный этический комитет при [полное название учреждения]» или «Этический комитет [полное название учреждения] N»).
3. Подтверждение соответствия международным и национальным нормам (со ссылкой на Хельсинкскую декларацию и/или GCP для людей; принципы 3R и ARRIVE для животных).
4. Для исследований с людьми необходимо кратко указать на процедуру получения информированного добровольного согласия от всех участников (в случае исследований с уязвимыми группами — двойное согласие).
5. Для исследований с животными подробно описать условия содержания, использованные анестезиологические и аналитические методы, минимизирующие страдания.

⁹ Санкт-Петербург 2012 Rus-LASA НП «Объединение специалистов по работе с лабораторными животными.» (2012). https://ruslasa.ru/wp-content/uploads/2017/06/translation-ethic-report-felasa_2012.pdf

¹⁰ «ГОСТ 33044–2014. Межгосударственный стандарт. Принципы надлежащей лабораторной практики» (введен в действие Приказом Росстандарта от 20.11.2014 N 1700-ст) <https://www.fgu.ru/upload/iblock/f5a/fkamlebvdp6ic91d37ole41wxd06qe5.pdf>

Примерные формулировки дисклеймеров (этических заявлений)

Для клинических/психологических исследований:

«Исследование выполнено в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации и правилами Надлежащей клинической практики (GCP). Протокол исследования № [номер] был одобрен Этическим комитетом [полное название учреждения] ([дата]). От всех участников получено письменное информированное согласие».

Для исследований на животных:

«Все процедуры с животными были выполнены в соответствии с принципами гуманного обращения (3R) и руководствами ARRIVE. Протокол исследования был одобрен Комитетом по этике обращения с животными [полное название учреждения] (протокол № [номер] от [дата])».

Для вторичного анализа данных/биобанков:

«Исследование с использованием биологических образцов и данных пациентов было одобрено Этическим комитетом [название] (протокол № [номер]). Требование о получении индивидуального информированного согласия было отменено комитетом в связи с ретроспективным характером анализа обезличенных данных».

Практика ведущих международных журналов

Требование обязательного предоставления информации об этическом одобрении является стандартом для всех рецензируемых журналов высокого уровня. Например, журналы *Nature*¹¹ имеют строгие внутренние проверки соответствия этическим нормам и требуют обязательного указания номеров протоколов. *The New England Journal of Medicine* подчеркивает важность регистрации клинических испытаний и предоставление информированного согласия как условия для рассмотрения рукописи. Кроме того, в их политике прописано, что авторам следует удалить из фотографий и рукописей информацию, которая может идентифицировать пациента. В тех случаях, когда это невозможно, к представленным материалам должно прилагаться письменное согласие пациента¹². *Journal of Nutritional Biochemistry*¹³ в своих инструкциях для авторов прямо ссылаются на необходимость соблюдения принципов Хельсинкской декларации и правил работы с лабораторными животными в соответствии с руководством ARRIVE.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы призываем всех авторов рассматривать получение одобрения этического комитета не как бюрократическую преграду, а как неотъемлемую и первостепенную часть дизайна любого исследования. Данный документ является основой научной добросовестности, гарантией защиты прав участников и залогом доверия к вашим результатам со стороны научного сообщества и общества в целом.

ЛИТЕРАТУРА

- Мекеко, Н. М. (2023). Дисклеймеры в тексте научной статьи. *Журнал работа и карьера*, 2(1), 4–7. <https://doi.org/10.56414/jeac.2023.34>
- Тихонова, Е. В., & Косычева, М. А. (2024). Ретракции в академическом дискурсе: от стигмы к культуре научной ответственности. *Health, Food & Biotechnology*, 6(2), 6–15. <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i2.s236>
- Annas, G. J., & Grodin, M. A. (1990). The Nazi doctors and the Nuremberg Code: Relevance for modern medical research. *Medicine and War*, 6(2), 120–123. <https://doi.org/10.1080/07488009008408916>
- Fontanarosa, P. B., Bauchner, H., & Flanagan, A. (2024). Ethical issues in biomedical publication. In Ph. B. Fontanarosa, A. Flanagan, and Ph. Greenland (eds), *Principles of scientific writing and biomedical publication: A JAMA editors guide for authors*. Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/med/9780197783030.003.0035>
- Katz, J. (1975). Experimentation with human beings-values in conflict. *Connecticut Medicine*, 39(6), 375–376.

¹¹ *Research involving humans or animals*.

<https://www.nature.com/nm/editorial-policies/ethics-and-biosecurity#studies-involving-animals-and-human-research-participants>

¹² *Identifiable Patients*. <https://www.nejm.org/about-nejm/editorial-policies>

¹³ *Hazards and human or animal subjects*. <https://www.elsevier.com/about/policies-and-standards/publishing-ethics#4-duties-of-authors>

- McGrath, J. C., & Lilley, E. (2015). Implementing guidelines on reporting research using animals (ARRIVE etc.): New requirements for publication in BJP. *British Journal of Pharmacology*, 172(13), 3189–3193. <https://doi.org/10.1111/bph.12955>
- McNair, L. (2022). Ethical and regulatory oversight of clinical research: The role of the Institutional Review Board. *Experimental Biology and Medicine*, 247(7), 561–566. <https://doi.org/10.1177/15353702221078216>
- Miller, F. G., & Rosenstein, D. L. (2002). Reporting of ethical issues in publications of medical research. *The Lancet*, 360(9342), 1326–1328.
- Tannenbaum, J., & Bennett, B. T. (2015). Russell and Burch's 3Rs then and now: the need for clarity in definition and purpose. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science : JAALAS*, 54(2), 120–132.

REFERENCES

- Annas, G. J., & Grodin, M. A. (1990). The Nazi doctors and the Nuremberg Code: Relevance for modern medical research. *Medicine and War*, 6(2), 120–123. <https://doi.org/10.1080/07488009008408916>
- Fontanarosa, P. B., Bauchner, H., & Flanagan, A. (2024). Ethical issues in biomedical publication. In Ph. B. Fontanarosa, A. Flanagan, and Ph. Greenland (eds), *Principles of scientific writing and biomedical publication: A JAMA editors guide for authors*. Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/med/9780197783030.003.0035>
- Katz, J. (1975). Experimentation with human beings-values in conflict. *Connecticut Medicine*, 39(6), 375–376.
- McGrath, J. C., & Lilley, E. (2015). Implementing guidelines on reporting research using animals (ARRIVE etc.): New requirements for publication in BJP. *British Journal of Pharmacology*, 172(13), 3189–3193. <https://doi.org/10.1111/bph.12955>
- McNair, L. (2022). Ethical and regulatory oversight of clinical research: The role of the Institutional Review Board. *Experimental Biology and Medicine*, 247(7), 561–566. <https://doi.org/10.1177/15353702221078216>
- Mekeko, N. M. (2023). Disclaimers in a scientific article. *Journal of Employment and Career*, 2(1), 4–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.56414/jeac.2023.34>
- Miller, F. G., & Rosenstein, D. L. (2002). Reporting of ethical issues in publications of medical research. *The Lancet*, 360(9342), 1326–1328.
- Tannenbaum, J., & Bennett, B. T. (2015). Russell and Burch's 3Rs then and now: the need for clarity in definition and purpose. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science : JAALAS*, 54(2), 120–132.
- Tikhonova, E.V., & Kosycheva, M. A. (2024). Retractions in academic discourse: From stigma to the culture of responsibility in science. *Health, Food & Biotechnology*, 6(2), 6–15. <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i2.s236>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s291>

Сравнительная оценка влияния порошков из высушенных язычковых цветков бархатцев и календулы – заменителей рылец шафрана на показатели качества сдобного печенья

Т. А. Синявская, С. А. Павлова

Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

Корреспонденция:

Синявская Татьяна Александровна,
Южно-Уральский государственный аграрный университет,
457103, Россия, Челябинская обл.,
г. Троицк, ул. им. Ю.А. Гагарина, 13
E-mail: surenta@mail.ru

Конфликт интересов:

авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 26.07.2025

Поступила после

рецензирования: 01.12.2025

Принята: 26.12.2025

Copyright: © 2025 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Включение различных растительных компонентов в рецептуру продуктов актуально ввиду расширения ассортимента и обогащения продукции биологически активными веществами (БАВ); улучшения органолептических показателей. Применение растительных компонентов из бархатцев и календулы, используемых в качестве аналога высушенных рылец шафрана (*Crocus sativus* L.), в кондитерских изделиях, а именно в сдобном песочно-выемном печенье, имеет научную новизну, поскольку проводимые ранее исследования касались только хлебобулочных изделий, хлеба и конфет.

Цель: разработка рецептурных компонентов растительного происхождения из язычковых цветков календулы лекарственной (*Calendula officinalis* L.) и бархатцев отклонённых (*Tagetes patula* L.), и сравнительная характеристика влияния их порошков на сдобное песочно-выемное печенье.

Материалы и методы. Объекты исследования: рецептурные компоненты растительного происхождения, полученные из высушенных язычковых цветков растений – календулы лекарственной (*Calendula officinalis* L.) и бархатцев отклонённых (*Tagetes patula* L.); мучное кондитерское изделие – сдобное песочное-выемное печенье. В работе использованы стандартные методы: органолептические, определения влажности и потери сухих веществ изделий.

Результаты применения растительных компонентов показывают, что пряность из бархатцев приводит к значительным изменениям цвета теста. На основе проведённой дегустации при использовании растительных рецептурных ингредиентов в кондитерских изделиях существенной разницы не обнаружено. Также возделывание этого растения выгодно, поскольку оно является более продуктивным на крупные соцветия, которые облегчают сбор; выход конечного продукта (порошка из измельчённых язычковых цветков) из высушенных соцветий составляет 46,7 %, против 40,0 % у календулы.

Выводы по итогам обсуждения результатов подтверждается возможность использования порошка из высушенных и измельчённых язычковых цветков бархатцев отклонённых и календулы лекарственной в качестве рецептурных компонентов хлебобулочных изделий. Их применение обусловлено красящей способностью благодаря содержанию ксантофиллов, повышением биологической ценности конечного продукта, а также улучшением органолептических показателей готовых изделий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

бархатцы отклонённые, календула лекарственная, растительный компонент, технология производства, кондитерские изделия, натуральный краситель

Для цитирования: Синявская, Т. А., & Павлова, С. А. (2025). Сравнительная оценка влияния порошков из высушенных язычковых цветков бархатцев и календулы – заменителей рылец шафрана на показатели качества сдобного печенья. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 13-24. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s291>



<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s291>

Development of Plant-Based Food Additives – Saffron Analogues and Their Impact on the Organoleptic Properties of Confectionery Products

Tatiana A. Sinyavskaya, Snezhana A. Pavlova

South Ural State Agrarian University,
Chelyabinsk, Russia

Correspondence:

Tatiana A. Sinyavskaya,
South Ural State Agrarian University, 13,
Yu.A. Gagarina St., Troitsk, Chelyabinsk
region, 457103, Russia
E-mail: surenta@mail.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 26.07.2025

Received in revised form: 01.12.2025

Accepted: 26.12.2025

Copyright: © 2025 The Authors

ABSTRACT

Introduction. The inclusion of various plant-derived components in food formulations has become a relevant area of research, driven by the need to diversify product ranges, enrich food products with biologically active substances and enhance their organoleptic characteristics. The use of plant components derived from marigold (*Tagetes patula* L.) and calendula (*Calendula officinalis* L.) as an analogue of dried saffron stigmas (*Crocus sativus* L.) in confectionery products, specifically in butter shortbread moulded cookies, is scientifically novel, as prior research has focused exclusively on bakery products, bread, and candies.

Objective: To develop plant-based recipe components derived from the ligulate flowers of pot marigold (*Calendula officinalis* L.) and French marigold (*Tagetes patula* L.) and to compare the effect of their powders on the quality of rich shortbread cut-out cookies.

Materials and Methods. The research objects include plant-based recipe components derived from dried ligulate flowers of *Calendula officinalis* L. and marigold *Tagetes patula* L. and a flour confectionery product – rich shortbread cut-out cookies. Standard methods were used in the study, including organoleptic evaluation, determination of moisture content and assessment of dry matter loss from the product.

Results. The application of plant components demonstrates that marigold spice leads to significant changes in the dough color. The tasting did not reveal any significant differences between confectionery products containing different plant ingredients. From the economic perspective, the cultivation of this plant (*Tagetes patula* L.) appears to be more profitable than the cultivation of *Calendula*. Marigolds are characterized by higher productivity and form larger inflorescences, which facilitates their harvesting. The final product yield (powder from crushed ligulate flower) from dried inflorescences is 46.7%, which is higher than that of *calendula* (40.0%).

Conclusion. The findings from the discussion of the results confirm the feasibility of using powders from dried and crushed French marigold and *Calendula officinalis* flowers as ingredients in bakery products. Their use is justified by their coloring capacity due to the content of xanthophylls, the increase in the biological value of the final product, as well as the improvement of the organoleptic properties characteristic of the finished goods.

KEYWORDS

marigold, *calendula officinalis*, plant component, production technology, confectionery, natural colorant



To cite: Sinyavskaya, T. A., & Pavlova, S. A. (2025). Development of plant-based food additives—saffron analogues and their impact on the organoleptic properties of confectionery products. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 13-24. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s291>

ВВЕДЕНИЕ

С древнейших времен обогащение рациона питания человека обеспечивается за счет различных пищевых компонентов, таких как специи, пряности и соусы. Их использование обусловлено не только благоприятным влиянием на вкус продукции, но и возможностью расширения ассортимента, увеличения энергетической ценности готового блюда, а также соответствием индивидуальным предпочтениям потребителей. Добавление натуральных рецептурных компонентов, как и любых пряностей и специй, возбуждает аппетит и улучшает усвояемость продуктов питания желудочно-кишечным трактом (ЖКТ). Актуальность включения подобных ингредиентов в рецептуру привычных продуктов связана с рядом современных потребностей: расширение ассортимента кондитерских и хлебобулочных изделий; обогащение продукции биологически активными веществами (БАВ); потенциальное улучшение органолептических показателей изделий; импортозамещение за счет выращивания отечественных аналогов дорогостоящих растительных компонентов; применение натуральных ингредиентов в продуктах питания (Солдатенко и соавт., 2018).

Потребление экологически чистой продукции – тренд последнего десятилетия, стимулирующий спрос на натуральное сырье при минимизации или полном отсутствии синтетических препаратов и так называемых вредных продуктов питания. Выращивание и производство растительного сырья различного типа отвечают запросам населения в сфере здорового питания, позволяя поддерживать рацион без полного отказа от дополнительных пищевых компонентов (Ланчаков и соавт., 2024).

Целые и измельченные, свежие, консервированные и высушенные цветки различных видов растений с давних времен используются в азиатской, европейской и средне-восточной кухне. Они так же, как и другие продукты питания, имеют энергетическую ценность, но их биологическое преимущество заключается в химическом составе, а именно в наличии широкого спектра витаминов, макро- и микроэлементов, пищевых волокон. Таким образом, они выступают в роли дополнительного источника БАВ, который к тому же благоприятно влияет на органолептические показатели готовых блюд и изделий (Петрухин и соавт., 2024).

Шафран (*Crocus sativus*) – род растений семейства ирисовых, или касатиковых (*Iridaceae*). Рыльца шафрана – это изысканная, дорогая добавка. Стоимость шафрана на мировом рынке варьируется от нескольких тысяч

до десятков тысяч долларов за килограмм. Его высокая стоимость обусловлена трудоемкостью получения: с одного цветка возможно получить только три красных рыльца. Он не произрастает в дикой природе, его размножение возможно только при участии человека^{1, 2}.

Трудоемкость процесса выращивания крокуса и наличие экономически более выгодных альтернатив с похожими свойствами побудило к использованию других растений, которые теперь имеют названия различных видов «шафрана»: из цветоносов бархатцев (*Tagetes*) – имеретинский шафран; из цветков сафлора красильного (*Carthamus tinctorius*) – мексиканский (американский) шафран; из цветков алатавского шафрана (*Crocus alatavicus*) – узбекский (казахский) шафран; из корневища куркумы длинной (*Curcuma longa*) – индийский шафран. Также «шафраном» иногда обозначают пряности, полученные из цветов календулы (*Calendula*), семян биксы аннатовой (*Bixa orellana*), так называемый шафран бедняков, из плодов сумача дубильного (*Rhus coriaria* L.).

подавляющее большинство аналогов шафрана используют для окрашивания блюд и придания аромата. Конечно они не сравнятся с красящей способностью крокуса, один грамм которого способен окрасить три тысячи литров прозрачной воды в ярко-желтый цвет (Тихомирова, 2010). Но, поскольку аналоги в большинстве своем находятся в нише более низкой по стоимости продукции, данную особенность можно компенсировать увеличением количества используемого сырья для окрашивания.

Запахи аналогов могут быть как несколько схожи, так и значительно отличаться от оригинальной пряности. Только алатавский шафран не имеет аромата и используется лишь для придания аппетитного цвета блюдам (Пашаев и соавт., 2017; Максименко и соавт., 2015).

Присутствующие на рынке «шафраны» имеют зарубежное происхождение, в том числе имеретинский, из лепестков бархатцев, основным поставщиком которого является Грузия (страна происхождения). Также крупнейший экспортер различных пряностей и специй – Индия.

Использование пряности из бархатцев и календулы никак не ограничено. Их добавляют в любое блюдо или напиток, желая несколько изменить цвет и придать легкий ненавязчивый медово-цветочный или цветочно-растительный аромат, а при большем количестве достичь более выраженного пряного вкуса. Растительные пищевые добавки применяют в производстве хлебобулочных

¹ Шафран: дороже золота <https://aidigo.ru/blog/articles/poleznye-sovety/shafran> dorozhe_zolota/ Дата обращения: 22.02.2025

² Шафран. Почему он дороже золота и для чего нужна такая дорогая специя <https://a-flora.ru/blogs/blog/shafran-pochemu-on-dorozhe-zolota-i-dlya-chego-nuzhna-takaya-dorogaya-spetsiya> Дата обращения: 22.02.2025

и кондитерских изделий, супов (харчо), гарниров, соусов (сациви, бажи), салатов, кремов, густых и прозрачных напитков. Пряность из бархатцев является обязательной составляющей пикантных приправ, таких как хмели-сунели и сванская соль. Также с помощью неё ароматизируют масло, уксус, маринуют овощи³.

В нашей стране порошки из бархатцев и календулы являются редко используемым рецептурным компонентом, поэтому исследования в этой области немногочисленны. Авторы, включающие их в свои опытные образцы (Ермолаева и соавт., 2024; Перфилова и соавт., 2023; Рехвиашвили и соавт., 2014; Шуваева и соавт., 2023), разрабатывают рецептуры хлебобулочных изделий и чипсов лечебного и профилактического назначения. Данное направление, безусловно, поможет в популяризации порошка из растительного сырья среди населения, стремящегося к налаживанию пищевого поведения и употреблению дополнительных источников БАВ. Также существует разработка рецептуры сливочной помадки (Сушина и соавт., 2019). За время проведения исследования была опубликована работа по применению порошка из бархатцев совместно с соевой мукой в производстве сахарного печенья, где большее влияние на продукт оказал второй нетрадиционный компонент (Анискина, 2025).

Во всех научных статьях отмечается повышение органолептических и физико-химических показателей изделий. У булочной продукции и хлеба уменьшается влажность, увеличивается процент пористости мякиша, а соответственно, и объем готового изделия, оно медленнее черствеет благодаря влагоудерживающей способности растительных волокон порошка и его антиокислительным свойствам каротиноидов, флавоноидов, витаминов А, С, Е и К (Ермолаева и соавт., 2024; Рехвиашвили и соавт., 2014; Шуваева и соавт., 2023). У булочной продукции снижается кислотность, что также обусловлено антиоксидантной активностью добавки (Ермолаева и соавт., 2024). В то время как у хлеба этот показатель повышается, поскольку был выбран способ приготовления теста с опарой, в которой собственные углеводы растительного компонента и микроэлементы повысили бродительную активность теста (Шуваева и соавт., 2023). Применение бархатцев способствует получению помадной массы с более мягкой консистенцией (за счет снижения количества добавляемого в рецептуру сахара), а также придает изделию приятный цветочный аромат (Сушина и соавт., 2019).

Исследование по сохранению максимальной биологической ценности порошков из растительного сырья показало, что эффективным методом для этого выступает криогенная технология при производстве криопорошков (Гербер и соавт., 2023).

У любой продукции с использованием растительных пряностей повышается содержание ряда витаминов: ретинола (А) и его провитамина β-каротина, тиамина (В₁), рибофлавина (В₂), холина (В₄), пантотеновой кислоты (В₅), пиридоксина (В₆), фолатов (В₉), α-токоферола (Е), филлохинона (К), аскорбиновой (С) и никотиновой кислот (РР). Также увеличивается концентрация минеральных веществ: калия (К), магния (Mg), фосфора (Р), кальция (Ca), марганца (Mn) и других (Солдатенко и соавт., 2018; Червонная и соавт. 2020). Соотношение и количество компонентов не постоянно и будет различаться в зависимости от выращиваемого сорта, почвенно-климатических условий во время вегетации и времени сбора. Также причинами различий результатов химического анализа в независимых лабораторных опытах являются: техническое состояние оборудования и влияние человеческого фактора.

Одна из самых важных особенностей химического состава продуктов переработки бархатцев и календулы заключается в наличии в их составе незаменимых каротиноидов – лютеина и зеаксантина. Их поступление возможно только с пищей. Они выполняют защитную функцию, выступая в роли светофильтра и уменьшая воздействие ультрафиолета. Лютеин снижает риск дегенерации желтого пятна – возрастной макулярной дистрофии (ВМД), рака и сердечно-сосудистых заболеваний, проявляет антиоксидантную и антимутагенную активность (Wang et al., 2006).

Содержание красящих веществ подвержено значительным колебаниям под влиянием ранее перечисленных факторов. Но основным выступает сортовой признак, а именно – окрас соцветия. У бархатцев в сортах с оранжевыми и темно-бордовыми соцветиями концентрация ксантофиллов выше, чем в корзинках со светло-желтыми и желтыми цветками (Максименко и соавт., 2015). Аналогично у календулы наибольшее количество пигмента находится в темноокрашенных оранжевых соцветиях (Дейнека и соавт., 2011; Солдатенко и соавт., 2018).

Выращивание растительного сырья для производства натуральных пряностей в регионе Южного Урала весьма перспективно. Эколого-производственный потенциал территории (Синявский и соавт., 2022) соответствует физиологическим потребностям большого количества растений, что обеспечивает полноту использования земельных и природно-климатических ресурсов, способствует восстановлению, поддержанию и повышению агроэкологического состояния почвы, окружающей среды и биологического разнообразия, а также развитию перспективного направления в экономике.

³ Имеретинский шафран и его использование https://gurmadze.ru/blog/statyi/shafran_imeretinskiy Дата обращения 22.02.2025

Таким образом, использование бархатцев и календулы как растительных рецептурных компонентов не получило широкого распространения. Но химический состав соцветий, комплекс биологических функций и положительное влияние на органолептические показатели продукции позволяют рассматривать их в качестве перспективного растительного ингредиента. Также порошок из высушенных цветков выполняет роль натурального красителя и является источником ценных незаменимых ксантофиллов. Применение натуральных компонентов в кондитерских изделиях, а именно в сдобном песочно-выемном печенье, имеет научную новизну, поскольку проводимые ранее исследования касались только хлебобулочных изделий, конфет и сахарного печенья.

Цель данного исследования: разработка рецептурных компонентов растительного происхождения из язычковых цветков календулы лекарственной (*Calendula officinalis*) и бархатцев отклонённых (*Tagetes patula*) и проведение сравнительного анализа их влияния на характеристики сдобного песочно-выемного печенья.

Задачи

- 1. Получить два вида растительных рецептурных компонентов: порошки из высушенных цветков календулы лекарственной и бархатцев отклонённых.
- 2. Выявить особенности влияния двух видов порошков на технологические параметры процесса замеса теста и выпечки изделий.
- 3. Провести оценку готовых изделий методом дегустации и установить характер влияния растительных компонентов на качество продукта.

Гипотеза: порошки из бархатцев отклонённых (*Tagetes patula*) и календулы лекарственной (*Calendula officinalis*) могут быть успешно применены в рецептуре песочно-

но-выемного печенья в качестве натуральных растительных компонентов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Рецептурные компоненты растительного происхождения из язычковых цветков двух растений семейства астровых (*Asteraceae*): календулы лекарственной (*Calendula officinalis*) и бархатцев отклоненных (*Tagetes patula*) сорта Оранжевое пламя.

В качестве модели для оценки результатов применения растительных компонентов в кондитерских изделиях было выбрано мучное, а именно сдобное песочно-выемное печенье. Рецептура опытных образцов представлена в Таблице 1. Использовалось следующее сырье:

- 1. Мука пшеничная высшего сорта «Алтайская» (АО «Грана»);
- 2. Сахар белый кристаллический, товарный сорт 2 (ООО «Европак»);
- 3. Масло сливочное «Брест-Литовск» высшего сорта, жирность 82,5 % (ОАО «Савушкин продукт»);
- 4. Яйцо куриное первой категории (ОАО «Волжанин»);
- 5. Разрыхлитель теста двойного действия (Angel Yeast Co).

Оборудование

Сбор соцветий осуществлялся ручным способом. Процесс сушки до достижения влажности 15 % проводили на металлических подносах, застеленных бумагой, при периодическом перемешивании сырья для равно-

Таблица 1
Рецептура опытных образцов (вариантов) и процентное содержание сырья по отношению к общей массе теста
Table 1
Recipe for Experimental Samples (Variants) and Percentage of Raw Materials Relative to the Total Dough Weight

Сырье	Варианты опыта					
	1 Контроль (без пищевых добавок)		2 Бархатцы		3 Календула	
	г	%	г	%	г	%
Мука пшеничная	230,00	49,09	230,00	48,99	230,00	48,99
Сахар свекловичный	80,00	17,08	80,00	17,04	80,00	17,04
Масло сливочное	105,00	22,41	105,00	22,36	105,00	22,36
Яйцо 1С	55,00	11,10	55,00	11,08	55,00	11,08
Разрыхлитель	1,50	0,32	1,50	0,32	1,50	0,32
Порошок из высушенных цветков	—	—	1,00	0,21	1,00	0,21
Всего	471,50	100,00	472,50	100,00	472,50	100,0

мерного испарения влаги. Отделение язычковых цветков от центральных трубчатых выполнялось вручную. Сырье измельчали в электрической кофемолке Kelli KL-5137. Навески ингредиентов отбирали по технологической карте на лабораторных весах ВЛТЭ-510. Часть рецептурных компонентов (сахар, масло, яйца, разрыхлитель, пряности) смешивали в мисках с использованием погружного блендера с насадкой (миксер HBM-1040R). Деление теста на порции проводили вручную с контролем веса штучных изделий. Выпекали изделия в тупиковой печи электрической плиты Greta EE 5000 NN 13 W. Для определения влажности готовых изделий по ГОСТ 5900-2014 бюксы с печеньем взвешивались на точных весах DEMCOM DL-213 в лаборатории Института агроэкологии. Высушивание осуществляли в сушильном шкафу ШС-40-02 СПУ.

Методы

Растения выращены в 2023–2024 гг. на опытном участке в с. Миасское Красноармейского района Челябинской области. Условия произрастания: умеренный континентальный климат северной лесостепной зоны, почва лугово-черноземного типа. Посев проведен одновременно в середине мая. Сбор соцветий ручной через 4 месяца.

Технологический процесс производства пряности включает следующие этапы:

1. Выращивание кустов календулы лекарственной (*Calendula officinalis*) и бархатцев отклонённых (*Tagetes patula*) в открытом грунте с применением общепринятых методов.
2. Сбор сырья для анализов проводили во время массового цветения растений.
3. Сушка открытым способом на стеллажах в отсутствии света при температуре 35–40 °С с постоянным проветриванием до достижения влажности 15 %.
4. Отделение язычковых цветков ручным способом от цветоноса, чашелистиков и семян.
5. Измельчение лепестков до мелкой фракции (порошок с размером частиц менее 1 мм) с использованием электрического роторно-ножевого измельчителя.
6. Хранение высушенного сырья в бумажных пакетах в сухом темном помещении.

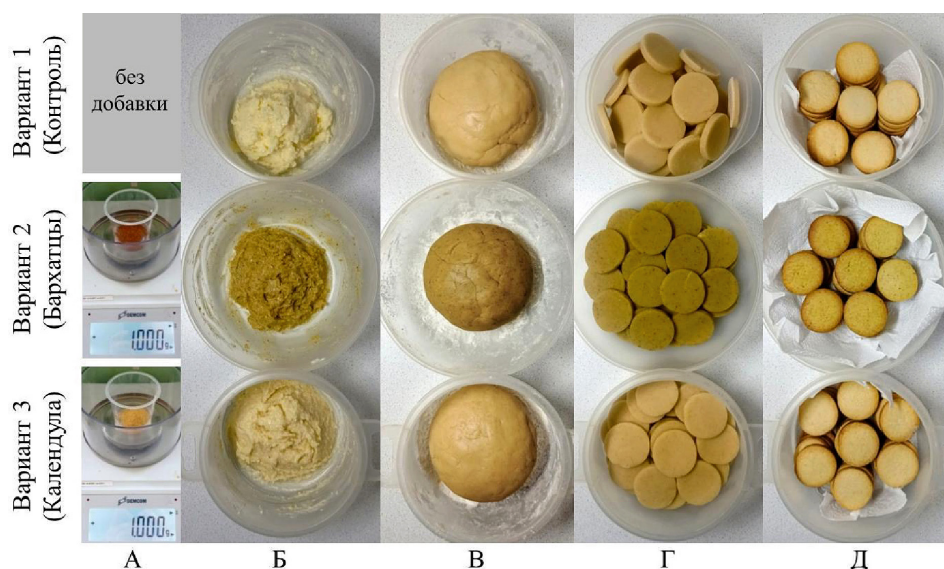
Замес теста и производство изделий осуществлялись одновременно в одинаковых условиях (Рисунок 1). Порошки из высушенных язычковых цветков календулы и бархатцев вносили в масло-сахарную массу. После тщательного перемешивания добавляли остальные компоненты: яйцо, муку с разрыхлителем. Готовое те-

Рисунок 1

Ключевые этапы производства исследуемого печенья

Figure 1

Key Stages in the Production of the Examined Cookies



Примечание. 1 – контроль без использования пряностей; 2 – вариант с использованием бархатцев отклонённых; 3 – вариант с использованием календулы лекарственной; А – порошки из высушенных язычковых цветков бархатцев и календулы; Б – масло-сахарная масса с пряностью; В – готовое тесто; Г – изделия до выпечки; Д – изделия после выпечки.

Note. 1 – control without the use of spices; 2 – variant with the use of marigolds; 3 – variant with the use of calendula officinalis; А – powders from dried ligulate flowers of marigolds and calendula; Б – butter-sugar mass with spices; В – finished dough; Г – products before baking; Д – products after baking.

сто охлаждалось в холодильнике до температуры 10 °С в течение одного часа, затем раскатывалось. Далее вырезали поштучные заготовки с помощью металлических форм. Выпекание сформированных изделий проводили при одинаковом температурном режиме в 200 °С в течение 10 минут.

Массовую долю влаги в готовых изделиях определяли путем высушивания по стандартной методике ГОСТ 5900-2014 «Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ»⁴.

Для получения сравнительной характеристики применения растительных компонентов была проведена органолептическая оценка готовых изделий с добавлением порошков из высушенных язычковых цветков бархатцев и календулы. Анализ осуществляли по шести показателям, приведенным в ГОСТ 24901-2023 «Печенье. Общие технические условия»: форме, поверхности, цвету, запаху, виду в изломе и вкусу. Для оценки был выбран метод дегустации с использованием 5-балльной шкалы, которая имела следующую градацию:

- 5 — отлично, полностью соответствует требованиям ГОСТ;
- 4 — хорошо, соответствует требованиям ГОСТ с допущениями;
- 3 — удовлетворительно, не полностью соответствует требованиям ГОСТ, с допущениями;
- 2 — плохо, почти не соответствует требованиям ГОСТ, с допущениями;
- 1 — очень плохо, не соответствует требованиям ГОСТ, с допущениями.

Нормы органолептических показателей по требованиям ГОСТ 24901-2023 были представлены в дегустационных листах.

Процедура исследования

На первом этапе был проведен поиск и анализ научной литературы, а также данных из открытых интернет-источников с целью выявления существующих аналогов шафрана посевного, используемых в питании. Критериями отбора служили научная новизна применения растительной пищевой добавки и возможность возделывания в условиях Уральского региона. В результате были выбраны два представителя семейства астровых (Asteraceae): бархатцы отклонённые (*Tagetes patula* L.), по-другому именуемые имеретинский шафран; календула лекарственная (*Calendula officinalis* L.), именуемая также «шафраном бедняков». Дополнительно для сравнительной оценки применения пряностей была выбра-

на релевантная и доступная (но ранее не используемая в исследованиях) форма продукта — песочно-выемное печенье.

Второй этап включал в себя получение растительных компонентов из бархатцев Оранжевое пламя (Павлова, 2024) и календулы по методике, состоящей из выращивания растений, сбора соцветий, сушки, отделения лепестков, измельчения их в порошок, хранения. Также был рассчитан выход полезного сырья из высушенных соцветий каждого растения.

На третьем этапе осуществлено практическое применение готовых растительных компонентов: порошков из высушенных язычковых цветков бархатцев и календулы (влажность 15 %, размер частиц менее 1 мм). Оптимальное количество пряности для видимого изменения цвета изделий, установленное экспериментально (Павлова, 2024) составило 0,21 % от веса теста. Для оценки влияния растительных пищевых добавок на свойства теста и готовых изделий использовали сравнительный и органолептический методы. Дополнительно проверяли соответствие характеристик требованиям ГОСТ, определяли градации шкалы оценивания.

На четвертом этапе были выполнены расчеты и статистическая обработка полученных данных при исследовании влияния пряностей на кондитерские изделия по органолептическим характеристикам, анализ выхода полезного сырья из высушенных соцветий, определение процента потери сухих веществ, измерение влажности готовых изделий.

Математическая обработка

Определение процента выхода полезного сырья (сухих лепестков) из соцветий бархатцев отклонённых и календулы лекарственной, вычисление процента влажности трех вариантов опыта (контроль без пряностей, с бархатцами, с календулой) проводили в трехкратной повторности. Процент потери сухих веществ вычислялся в четырехкратной повторности для каждого варианта опыта. Статистическую обработку результатов измерений оценивали по критерию Стьюдента при доверительном интервале $P = 0,95$. Расчеты (в т. ч. стандартного отклонения) были выполнены с использованием Microsoft Excel 2010.

⁴ ГОСТ 5900-2014 Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ. Стандартинформ.

⁵ ГОСТ 24901-2023 Печенье. Общие технические условия. ИПК Изд-во стандартов

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности выхода готовой растительной добавки из сырья

Для консервирования биологически активных веществ и остановки внутриклеточных процессов, ведущих к разложению действующих веществ, была произведена сушка соцветий открытым способом на стеллажах до влажности 15 %. Корзинки растений сохли не одинаково: соцветия календулы семь дней, бархатцев – десять, что обусловлено более рыхлым строением и меньшим размером лепестков календулы, однако показатель свободной влаги у неё выше (Таблица 2).

Таблица 2
Изменение влажности корзинок бархатцев отклоненных и календулы лекарственной при сушке
Table 2
Changes in the Moisture Content of French Marigold and Calendula Officinalis Heads during Drying

Показатель	Бархатцы отклонённые	Календула лекарственная
Начальная влажность сырья, %	75,4 ± 0,17	80,0 ± 0,16
Конечная влажность сырья, %	15,0 ± 0,05	15,0 ± 0,05

Экспериментально был рассчитан выход пряности из высушенных корзинок бархатцев отклонённых и календулы лекарственной (Таблица 3). Также рассчитано количество соцветий, необходимых для получения 100 г пряности (при влажности сырья 15 %).

Таблица 3
Выход язычковых цветков из высушенных соцветий и требуемое количество корзинок для получения 100 г пряности
Table 3
Yield of Ray Florets from Dried Inflorescences and the Required Number of Flower Heads to Produce 100 g of Spice

Показатель	Бархатцы отклонённые	Календула лекарственная
Выход язычковых цветков, %	46,7 ± 0,12	40,0 ± 0,16
Требуемое количество соцветий, шт	200	800

Из данных Таблицы 3 можно сделать вывод о преимуществе использования бархатцев для изготовления растительного компонента, поскольку выход язычковых цветков из соцветий у них на 6,7 % выше, а само количество соцветий, требуемое для получения 100 г пряности, в среднем в четыре раза меньше, чем у календулы.

Влияние использования растительных добавок на ряд показателей опытных изделий

При замесе теста отмечено характерное изменение его окраса у опытного варианта 2 с использованием бархатцев (Рисунок 1). В варианте 3 с календулой цвет теста имел лишь незначительно более выраженный кремовый оттенок по сравнению с контролем (вариант 1). Это объясняется меньшим содержанием красящих веществ в растительной пищевой добавке из календулы.

Анализ полученных в ходе эксперимента данных (Таблица 4) выявил прямую зависимость потери сухих веществ от содержания в изделиях влаги. Самый большой показатель по сухим веществам 15,44 % и влажности изделий 4,01 % у варианта 2 с использованием порошка бархатцев. Это может быть связано с несколько большей начальной массой сырых изделий, обусловленной человеческим фактором, при одинаковых условиях выпекания для всех вариантов. Наименьшие показатели изменений сухих веществ 13,93 % и влажности готового печенья 3,73 % у варианта 3, с использованием календулы, что можно объяснить большим объемом сухого сырья растительной пищевой добавки. Контрольный вариант занял промежуточное положение со значениями потери сухих веществ и влажности изделий 14,87 % и 3,80 % соответственно.

Согласно требованиям ГОСТ 24901-2023 для сдобного печенья показатель влажности должен быть не более 16 %, то есть изделия с использованием пряности входят в заданные нормы и отвечают требованиям⁶.

Стандартные отклонения генеральной совокупности по каждому варианту опыта и исследуемым показателям, а также выведенная значимость нулевой гипотезы (о наличии пряности в изделии) приведены в Таблице 4. Установлено, что растительная пищевая добавка не оказывает существенного влияния на потерю сухих веществ. Для показателя влажности нулевая гипотеза о влиянии фактора подтверждается.

⁶ ГОСТ 24901-2023 Печенье. Общие технические условия. ИПК Изд-во стандартов

Таблица 4

Потеря сухих веществ и влажность опытных изделий после выпечки, со статистической обработкой, %

Table 4

Loss of Dry Matter and Moisture Content of Experimental Products after Baking, with Statistical Processing, %

Показатель	Вариант опыта			НСР ₀₅
	1 Контроль	2 Бархатцы	3 Календула	
Влажность	14,87 ± 0,31	15,44 ± 0,59	13,93 ± 0,44	10,85 > 3,89 $F_{\text{факт}} > F_{\text{теор}}$
Потеря сухих веществ *	3,80 ± 0,63	4,01 ± 0,67	3,73 ± 0,26	0,14 < 5,14 $F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$

Примечание. $p < .05$
Note. $p < .05$

Дегустационное исследование
органолептических показателей
опытных изделий

Данные, полученные в ходе дегустационной оценки кондитерских изделий с применением растительных пищевых добавок, приведены к среднему арифметическому, рассчитаны стандартное отклонение и наименьшая существенная разница (Таблица 5). Анализ результатов не выявил существенного влияния фактора применения пряности на органолептические характеристики.

Контрольный вариант без растительных пищевых добавок занимает лидирующую позицию только в оценке поверхности изделий. Вариант с порошком бархатцев (вариант 2) получил наивысшие баллы по самому большому количеству органолептических характеристик: форма, цвет, запах, вид в изломе. Вариант с календулой (вариант 3) высоко оценили по показателям цвета, запаха и вкуса.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ общих средних оценок показал, что варианты с использованием растительных пищевых добавок не имеют существенных различий с контрольным вариантом (4,86). Образец с календулой в итоговой оценке получил на 0,01 меньше – 4,85. Лидирующую позицию с незначительным отрывом в 0,02 (от контрольного варианта) занял образец с бархатцами – 4,88 баллов.

В процессе дегустации была сформирована фокус-группа для расширенной оценки органолептических показателей. Её участники примерно в равном количестве оставили положительные комментарии об обоих вариантах. Вариант 2 был отмечен за хорошую пористость изделия и более мягкую текстуру, что объясняется показателем влажности. Также указали на наличие у него легкой пряности, что может понравиться не всем. У варианта 3 проявилось характерное растительное послевкусие, хотя

Таблица 5

Анализ дегустационной оценки применения растительных пищевых добавок в песочно-выемном изделии, балл

Table 5

Analysis of the Tasting Evaluation of the Use of Herbal Food Additives in the Shortbread Biscuits, points

Показатель	Вариант опыта		
	1 Контроль	2 Бархатцы	3 Календула
Форма	4,93	5,00	4,93
Поверхность	4,93	4,64	4,50
Цвет	4,79	4,86	4,86
Запах	4,93	5,00	5,00
Вид в изломе	4,86	5,00	4,86
Вкус	4,71	4,79	4,93
Общий средний балл	4,86 ± 0,08	4,88 ± 0,13	4,85 ± 0,16
НСР ₀₅		0,09 < 3,68 $F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$	

изначальные органолептические ощущения не сильно отличались от контрольного варианта.

С практической точки зрения вариант с использованием бархатцев имеет некоторое функциональное биологическое преимущество, являясь более ценным источником незаменимых каротиноидов – лютеина и зеаксантина. Также именно эти пигменты выступают в роли натурального красителя, изменяя цвет изделий на более привлекательный – золотистый, как было отмечено некоторыми дегустаторами фокус-группы.

В рамках проведенного исследования по применению растительных пищевых добавок из календулы лекарственной и бархатцев отклонённых были изготовлены растительные пищевые добавки мелкой фракции (порошки) из двух видов этих растений семейства астровых (*Asteraceae*).

При использовании растительных пищевых добавок выявлено, что пряность из бархатцев приводит к значительным изменениям цвета теста, поскольку в нем содержание лютеина 5 мг/г воздушно-сухого сырья, что в пять раз больше, чем у календулы – 1 мг/г.

Анализ результатов проведенной дегустации не выявил существенную разницу в кондитерских изделиях с растительными компонентами из бархатцев и календулы. Тем не менее в комментариях участники фокус-группы отметили ряд положительных характеристик продукта с применением бархатцев (специфический медовый аромат, пряный вкус), что представляет интерес для дальнейших исследований по улучшению существующих вкусовых характеристик готового продукта. Также выработка пищевой добавки в виде растительного порошка из язычковых цветков бархатцев экономически выгодна, поскольку бархатцы – более продуктивные растения; их крупные соцветия облегчают ручной сбор; выход полезного сырья из высушенных корзинок составляет 46,7 %, против 40,0 % у календулы.

ЛИТЕРАТУРА

- Анискина, А. И. (2025). Возможность использования нетрадиционного растительного сырья в пищевом производстве. *Студенческие научные исследования*, 74-78.
- Гербер, Ю. Б., & Ярошенко, Н. Ю. (2023). Использование криопорошка из календулы в технологии продуктов питания. *Health, Food & Biotechnology*, 5(3), 32-36. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s185>
- Дейнека, В. И., Гостищев, И. А., Третьяков, М. Ю., & Индина, И. В. (2011). Каротиноиды лепестков цветков календулы. *Научные ведомости Белгородского государственного университета*, 15-2(104), 277-285.
- Ермолаева, А. В., & Анискина, А. И. (2024). Влияние порошка из соцветий бархатцев (*Tagetes*) на физико-химические свойства булочных изделий. В *Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития*, (с.96-101). <https://doi.org/10.22450/978-5-9642-0637-8-96-101>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, возможность производства растительных пищевых добавок из высушенных лепестков соцветий бархатцев отклонённых (*Tagetes patula*) и календулы лекарственной (*Calendula officinalis*) подтверждается. Вариант с использованием бархатцев является более перспективным по нескольким причинам. Во-первых, выход полезного сырья из бархатцев на 6,7 % превышает показатель календулы. Во-вторых, для получения 100 г пряности требуется в среднем в четыре раза меньше соцветий. В-третьих, применение порошка из бархатцев приводит к более существенным изменениям цвета теста и готового продукта

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований представляет интерес изучение влияния растительных добавок на биологическую и энергетическую ценность продуктов.

ВКЛАД АВТОРОВ

Синявская Т. А.: концептуализация, методология, проверка, проведение исследования, предоставление ресурсов, редактирование рукописи, научное руководство.

Павлова С. А.: формальный анализ, проведение исследования, визуализация, написание оригинального черновика рукописи, создание визуализации.

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Tatiana A. Sinyavskaya: conceptualization, methodology, validation, investigation, resources, writing – review and editing, supervision.

Snezhana A. Pavlova: formal analysis, investigation, visualization, writing – original draft preparation, visualization.

- Ланчаков А. Б., Филин С. А., & Карапетян Д. (2024). Эко-продукция: взаимосвязь со здоровым образом жизни и тенденции потребления экологически чистой продукции в России. *Экономика и управление: проблемы, решения*, 7/2(148), 25-32. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.07.02.004>
- Максименко, Н. В., & Прохоров, В. Н. (2015). Изучение различных генотипов растений из рода *Tagetes* L. как перспективных источников каротиноидов для биодобавок в птицеводстве. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*, (2), 109-115.
- Павлова, С. А. (2024). Специя из цветов *Tagetes patula*: технология её производства и органолептическая оценка использования в рецептуре кондитерских изделий. В *Инновации в технологиях и образовании*, (с.187-191).
- Пашаев, Т., & Марданлы, А. (2017). Биоэкологические и лечебные свойства видов шафрана, входящих в род *Crocus* L. В *Перспективы внедрения инновационных технологий в медицине и фармации*, (с.151-155).
- Перфилова, О. В., Брыксина, К. В., & Родина, З. Ю. (2023) Использование нетрадиционного растительного сырья для рецептурной композиции чипсов. *Новые технологии*, 19(3), 68-77. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-3-68-77>
- Петрухин, К. Н., & Абрамушкина А. А. (2024). Исследование и классификация кавказских специй и приправ: история использования, вкусовые и лечебные свойства. В *Кавказский диалог*, (с.198-201).
- Рехвиашвили, Э. И., Гревцова, С. А., Кабулова, М. Ю., & Айлярова, М. К. (2014). Биотехнологические аспекты производства хлеба с добавлением порошка календулы лекарственной (*Calendula officinalis*). *Аграрный вестник Урала*, 1(119), 63-65.
- Синявский, И. В. & Синявская Т. А. (2022). Оценка эколого-производственного потенциала бесхозных земель, выявленных на территории Челябинской области, относящихся к мелиоративному фонду. *АПК России*, 29(5), 595-602. <https://doi.org/10.55934/10.55934/2587-8824-2022-29-5-595-602>
- Солдатенко, А. В., Пивоваров, В. Ф., Иванова, М. И., Бухаров, А. Ф., & Разин, О. А. (2018). *Съедобные цветки – источник фитонутриентов в питании человека*. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства».
- Сушина, А. Д., & Землякова, Е. С. (2019). Разработка характеристик и органолептическая оценка сливочной помадной массы с использованием цветков *Tagetes* L. *Вестник молодежной науки*, 5(22), 37.
- Тихомирова, Г. И. (2010). Тагетис – многопрофильная перспективная культура. *Картофель и овощи*, (7), 13.
- Червонная, Н. М., Аджирахметова, С. Л., Поздняков, Д. И., Папаяни, О. И., Туховская, Н. А., & Оганесян, С. О. (2020). Химический состав и биологическая активность некоторых представителей семейств Asteraceae, Primulaceae, Grossulariaceae и Rosaceae. *Международный научно-исследовательский журнал*, 11-1(101), 179-184. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.101.11.032>
- Шуваева, К. Н., Перфилова, О. В., & Потапова, А. А. (2023). Влияние порошка из бархатцев на качество хлеба из пшеничной муки первого сорта. *Наука и Образование*, 6(2).
- Wang, M., Tsao, R., Zhang, S., Dong, Z., Yang, R., Gong, J., & Pei, Y. (2006). Antioxidant activity, mutagenicity/anti-mutagenicity, and clastogenicity/anti-clastogenicity of lutein from marigold flowers. *Food and chemical toxicology*, 44, 1522-9. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.04.005>

REFERENCES

- Aniskina, A. I. (2025). The possibility of using non-traditional plant raw materials in food production. *Studentcheskie nauchnye issledovaniya* [Student research], 74-78.
- Chervonnaya, N. M., Adzhiakhmetova, S. L., Pozdnyakov, D. I., Papayani, O. I., Tukhovskaya, N. A., & Oganessian, S. O. (2020). Chemical composition and biological activity of some representatives of the families Asteraceae, Primulaceae, Grossulariaceae, and Rosaceae. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* [International Research Journal], 11-1(101), 179-184. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.101.11.032>
- Deineka, V. I., Gostishchev, I. A., Tretyakov, M. Yu., & Indina, I. V. (2011). Carotenoids of calendula flower petals. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific Bulletin of Belgorod State University], 15-2(104), 277-285.
- Ermolaeva, A. V., & Aniskina, A. I. (2024). The Effect of Marigold (*Tagetes*) Inflorescence powder on the physicochemical properties of bakery products. In *Agropromyshlennyj kompleks: problemy i perspektivy razvitiya* [Agro-Industrial Complex: Problems and Development Prospects], (pp. 96–101). <https://doi.org/10.22450/978-5-9642-0637-8-96-101>

- Gerber, Yu. B., & Yaroshenko, N. Yu. (2023). Use of calendula cryopowder in food technology. *Health, Food & Biotechnology*, 5(3), 32-36. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i3.s185>
- Lanchakov, A. B., Filin, S. A., & Karapetyan, D. (2024). Eco-products: Relationship with a healthy lifestyle and trends in consumption of eco-friendly products in Russia. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya* [Economics and Management: Problems, Solutions], 7/2(148), 25–32. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.07.02.004>
- Maksimenko, N. V., & Prokhorov, V. N. (2015). Study of various genotypes of plants from the genus *Tagetes* L. as promising sources of carotenoids for dietary supplements in poultry farming. *Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii* [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy], (2), 109-115.
- Pavlova, S. A. (2024). Spice from *Tagetes patula* Flowers: Its Production Technology and Organoleptic Evaluation of Use in Confectionery Recipes. In *Innovacii v tekhnologiyah i obrazovanii* [Innovations in Technology and Education], (pp. 187-191).
- Pashayev, T., & Mardanly, A. (2017). Bioecological and medicinal properties of saffron species belonging to the genus *Crocus* L. In *Prospects for the Perspektivy vnedreniya innovacionnyh tekhnologij v medicine i farmacii* [Implementation of Innovative Technologies in Medicine and Pharmaceuticals], (pp. 151-155).
- Perfilova, O. V., Bryksina, K. V., & Rodina, Z. Yu. (2023). Use of non-traditional plant materials for the formulation of potato chips. *New Technologies*, 19(3), 68-77. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-3-68-77>
- Petrukhin, K. N., & Abramushkina, A. A. (2024). Study and classification of Caucasian spices and seasonings: History of use, taste, and medicinal properties. In *Kavkazskij dialog* [Caucasian Dialogue], (pp. 198-201).
- Rekhviashvili, E. I., Grevtsova, S. A., Kabulova, M. Yu., & Aylyarova, M. K. (2014). Biotechnological aspects of bread production with the addition of *Calendula officinalis* powder. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 1(119), 63-65.
- Sinyavsky, I. V. & Sinyavskaya, T. A. (2022). Assessment of the ecological and production potential of ownerless lands identified in the Chelyabinsk region, related to the melioration fund. *Agro-Industrial Complex of Russia*, 29(5), 595-602. <https://doi.org/10.55934/10.55934/2587-8824-2022-29-5-595-602>
- Soldatenko, A. V., Pivovarov, V. F., Ivanova, M. I., Bukharov, A. F., & Razin, O. A. (2018). *Edible flowers – a source of phytonutrients in human nutrition. Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe nauchnoe uchrezhdenie «Federal'nyj nauchnyj centr ovoshchevodstva»* [Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Vegetable Growing"].
- Sushina, A. D., & Zemlyakova, E. S. (2019). Development of characteristics and organoleptic evaluation of creamy fondant mass using *Tagetes* L. flowers. *Vestnik molodezhnoj nauki* [Bulletin of Youth Science], 5(22), 37.
- Tikhomirova, G. I. (2010). *Tagetis* – a promising multidisciplinary crop. *Potatoes and Vegetables*, (7), 13.
- Shuvaeva, K. N., Perfilova, O. V., & Potapova, A. A. (2023). The effect of marigold powder on the quality of bread made from first-grade wheat flour. *Nauka i Obrazovanie* [Science and Education], 6(2).
- Wang, M., Tsao, R., Zhang, S., Dong, Z., Yang, R., Gong, J., & Pei, Y. (2006). Antioxidant activity, mutagenicity/anti-mutagenicity, and clastogenicity/anti-clastogenicity of lutein from marigold flowers. *Food and Chemical Toxicology*, 44, 1522-9. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.04.005>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s302>

Микобиота производственной среды молокоперерабатывающих предприятий: сравнительный анализ структуры и распространенности

А. А. Махова, Ю. К. Юшина, Е. В. Зайко, М. А. Грудистова,
В. К. Дерюгин, О. А. Стаханова

Федеральный научный центр пищевых
систем им. В.М. Горбатова РАН, Москва,
Россия

Корреспонденция:

Юшина Юлия Константиновна,
Федеральный научный центр пищевых
систем им. В.М. Горбатова РАН,
109316, ул. Талалихина, 26
E-mail: yu.yushina@fncps.ru

Конфликт интересов:

авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

Поступила: 01.10.2025

Поступила после

рецензирования: 11.12.2025

Принята: 26.12.2025

Copyright: © 2025 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Микробная контаминация плесневыми грибами остается серьезной проблемой для молочной отрасли. Традиционные дезинфектанты часто неэффективны против устойчивых форм, что требует разработки новых подходов к контролю на основе понимания структуры резидентной микобиоты конкретных производств.

Цель работы — сравнительный анализ состава, частоты встречаемости и пространственного распределения микобиоты в воздухе и на поверхностях оборудования трех молокоперерабатывающих предприятий.

Материалы и методы. Исследование проведено на трех предприятиях. Отбор проб воздуха (200 л) осуществляли аспирационным методом с осаждением на агар Сабуро. Смывы с поверхностей отбирали с площади 100 см². Видовую идентификацию грибов и дрожжей проводили методом масс-спектрометрии MALDI-TOF.

Результаты. Установлено, что ядро резидентной микобиоты во всех средах формируют три вида: *Penicillium gladioli* (21,3% в воздухе и 33,3% в смывах), *Penicillium polonicum* (18,0% и 16,7%) и *Cladosporium pseudocladosporioides* (16,4% и 22,2%). Вид *P. polonicum* обнаружен на всех предприятиях. Параллельно выявлены уникальные профили, отражающие специфику каждого производства: на сыродельном заводе идентифицированы *Geotrichum candidum* и почвенный патоген *Thanatephorus cucumeris*; на предприятии с широким ассортиментом зафиксировано максимальное разнообразие пенициллов, а также присутствие *Aspergillus wentii* и *Botrytis cinerea*. Обнаружены скрытые очаги контаминации: *Penicillium chrysogenum* и *P. rubens* выявлялись только в смывах при отрицательных результатах анализа воздуха. Значительную долю (11,5%) составили микроорганизмы, не идентифицированные стандартной базой данных MALDI-TOF.

Выводы. Микробная экосистема производственной среды представляет собой комплекс из универсального ядра высокоадаптированных контаминантов и уникального набора видов, детерминированных технологическими процессами. Полученные данные доказывают необходимость перехода от универсальных протоколов к разработке персонализированных программ микробиологического контроля, основанных на анализе резидентной микобиоты конкретного предприятия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

молокоперерабатывающие предприятия, воздушная среда, микобиота, плесневые грибы, MALDI-TOF масс-спектрометрия, микробная контаминация

Для цитирования: Махова, А.А., Юшина, Ю.К., Зайко, Е.В., Грудистова, М.А., Дерюгин, В.К., & Стаханова О.А. (2025). Микобиота производственной среды молокоперерабатывающих предприятий: сравнительный анализ структуры и распространенности. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 25-36. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s302>



<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s302>

Mycobiota of the Production Environment of Dairy Processing Enterprises: Comparative Analysis of Structure and Prevalence

Anzhelika A. Makhova, Yulia K. Yushina, Elena V. Zaiko,
Maria A. Grudistova, Vyacheslav K. Deryugin, Olesya A. Stakhanova

Gorbatov Research Center for Food
Systems, Moscow, Russia

Correspondence:

Yulia K. Yushina,
Gorbatov Research Center for Food
Systems, 26, Talalikhina St., Moscow,
109316, Russia
E-mail: yu.yushina@fncps.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 01.10.2025

Received in revised form: 11.12.2025

Accepted: 26.12.2025

Copyright: © 2025 The Authors

ABSTRACT

Introduction. Microbial contamination, in particular by mould fungi capable of producing mycotoxins, remains a serious problem for the dairy industry. Traditional disinfection agents are often ineffective against resistant forms of fungi, which actualizes the task of developing new approaches to control based on a deep understanding of the structure of the resident mycobiota of specific productions.

The purpose of this article is to conduct a comparative analysis of the qualitative composition, frequency of occurrence, and spatial distribution of mycobiota in the air and on the surfaces of technological equipment at three different dairy processing plants.

Materials and Methods. The study was conducted at three enterprises. Air samples of 200 L were collected by aspiration with sedimentation on Saburo agar. Surface swabs were collected with sterile sponges and swabs from an area of 100 cm². Species identification of isolated isolates of mold fungi and yeast was carried out by MALDI-TOF mass spectrometry (Autof MS 1000) with a threshold of confidence ≥ 9.0 for the species level

Results. As a result of monitoring, a detailed picture of microbial contamination was formed. It was established that the core of the resident mycobiota in all studied environments is formed by three species: *Penicillium gladioli* (detection frequency of 21.3% in the air and 33.3% in swabs), *Penicillium polonicum* (18.0% and 16.7%, respectively), and *Cladosporium pseudocladosporioides* (16.4% and 22.2%). The *P. polonicum* species was found in all three enterprises. In parallel, unique microbial profiles were identified, reflecting the specifics of each production facility: *Geotrichum candidum* and the soil pathogen *Thanatephorus cucumeris* were identified at the cheese-making facility; the facility with a wide product range recorded the highest diversity of *Penicillium* species, as well as the presence of *Aspergillus wentii* and *Botrytis cinerea*. An important result is the detection of hidden contamination sites, where *Penicillium chrysogenum* and *P. rubens* were only found in swabs with negative air analysis results. A significant proportion (11.5%) consisted of microorganisms not identified by the standard MALDI-TOF database.

Conclusions. The study demonstrates that the microbial ecosystem of the production environment is a complex of a universal core of highly adapted contaminants and a unique set of species determined by technological processes and external sources of contamination. The data obtained prove the critical need to move from universal protocols to the development of personalized programs of microbiological control and monitoring based on a deep analysis of the resident mycobiota of a particular enterprise.

KEYWORDS

dairy processing plants, air environment, mycobiota, mould fungi, MALDI-TOF mass spectrometry, microbial contamination



To cite: Makhova, A.A., Yushina, Yu.K., Zaiko, E.V., Grudistova, M.A., Deryugin, V.K., & Stakhanova, O.A. (2025). Mycobiota of the production environment of dairy processing enterprises: Comparative analysis of structure and prevalence. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 25-36. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s302>

ВВЕДЕНИЕ

Микробная контаминация пищевой продукции, в частности контаминация молока и молочных продуктов микотоксинами, остается одной из наиболее значимых проблем современной пищевой промышленности. Особую актуальность данная проблема приобретает в молочной отрасли, где плесневые грибы, развивающиеся как на самом сырье, так и на поверхностях технологического оборудования, способны продуцировать высокотоксичные вторичные метаболиты (Garnier et al, 2017). Наиболее опасными и хорошо изученными микотоксинами, ассоциированными с молочной продукцией, являются афлатоксин М1 (AFM1) и охратоксин А (ОТА). Афлатоксин М1, являясь гидроксилированным метаболитом афлатоксина В1, попадает в молоко преимущественно по механизму переноса (carry-over) из контаминированных кормов, потребляемых крупным рогатым скотом. Коэффициент такого переноса, по данным исследований, может варьировать от 1 до 6 %, что обуславливает прямую зависимость между уровнем загрязнения кормов и молока. Прямое обсеменение продукции токсигенными плеснями родов *Aspergillus* и *Penicillium* на этапах хранения, транспортировки или переработки также представляет серьезную угрозу, поскольку некоторые микотоксины, такие как охратоксин А, демонстрируют высокую устойчивость к технологическим процессам, включая пастеризацию (Garnier et al, 2017).

Традиционные дезинфицирующие средства на основе четвертичных аммониевых соединений, хлора и перекисных соединений не всегда обеспечивают достаточ-

ную эффективность против устойчивых форм микроскопических грибов (Bernardi et al, 2019). Кроме того, остаточные количества этих соединений могут мигрировать в пищевую продукцию, создавая потенциальные риски для потребителей. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых эффективных и безопасных дезинфицирующих средств для применения на пищевых производствах (Martin et al, 2021).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований явились образцы воздуха и смывы с различных поверхностей объектов производственной среды, отобранные на трех молокоперерабатывающих предприятиях (Таблицы 1–3).

Методика исследования

Отбор проб воздуха с объектов производственной среды

Отбор проб воздуха осуществляли с применением аспирационного пробоотборника Airwel (Alliance bio expertise, Франция). Объем проб воздуха составлял 200 л. Пробы воздуха определенного объема осаждали на агар Сабуро с хлорамфениколом (Oxoid, Великобритания). Полученные образцы инкубировали в термостате Binder (Binder, Германия) при 30 °С в течение 5 суток. Изолированные колонии идентифицировали с применением масс-спектрометра MALDI-TOF Autof ms1000 (Autobio, Китай).

Таблица 1
Идентификация точек отбора образцов с объектов производственной среды на Предприятии 1
Table 1
Identification of Sampling Points within the Production Environment of Enterprise 1

№ образца	Место отбора проб воздуха	№ образца	Место отбора проб смывов
22	Воздух в зоне формовочного стола №1	33	Формовочный стол №1
23	Воздух в зоне формовочного стола №2	34	Формовочный стол №2
24	Воздух в зоне титаника №1	35	Титаник №1
25	Воздух над транспортной лентой	36	Транспортер выход
26	Воздух в зоне трапа №1	37	Трап №1
27	Воздух в зоне трапа №2	38	Трап №2
28	Воздух в зоне формовочного стола №3	39	Формовочный стол №3
30	Воздух в зоне формовочного стола №4	41	Формовочный стол №4
29	Воздух в зоне термоблока, стол №1	40	Термоблок, стол №1
32	Воздух в зоне термоблока, стол №2	43	Термоблок, стол №2
31	Воздух в рабочей зоне ванны №1	42	Борт ванны №1

Таблица 2
Идентификация точек отбора образцов с объектов производственной среды на Предприятии 2
Table 2
Identification of Sampling Points within the Production Environment of Enterprise 2

№ образца	Место отбора проб воздуха	№ образца	Место отбора проб смывов
44	Воздух в зоне сыродельного цеха	44/1	Сыродельный цех (ванны)
45	Воздух в зоне колбасный участок (упаковка)	45/1	Колбасный участок (упаковка)
46	Воздух в зоне цеха по уходу за сырами (упаковка)	46/1	Цех по уходу за сырами (упаковка)
47	Воздух в зоне солильного отделения	47/1	Солильное отделение
48	«Теплая» камера созревания для сыра	48/1	«Теплая» камера созревания для сыра с пропионовокислыми бактериями
49	Воздух в камере обсушки сыра	49/1	Камера обсушки сыра
50	Воздух в камере созревания №1	50/1	Камера созревания №1
51	Воздух в камере созревания №2	51/1	Камера созревания №2
52	Воздух участка упаковки сыров	52/1	Участок упаковки сыров
53	Воздух в зоне ванны сыродельного цеха	53/1	Ванна (сыродельный цех)
54	Воздух в зоне трапа при переходе к участку формовки (сыродельный цех)	54/1	Трап при переходе к участку формовки (сыродельный цех)
55	Воздух в зоне пресса (сыродельный цех)	55/1	Пресса сыродельного цеха

Таблица 3
Идентификация точек отбора образцов с объектов производственной среды на Предприятии 3
Table 3
Identification of Sampling Points within the Production Environment of Enterprise 3

№ образца	Место отбора проб воздуха	№ образца	Место отбора проб смывов
56	Воздух на участке упаковки в гофроящички	56/1	Участок упаковки в гофроящички
57	Воздух на участке жиротопки	57/1	Участок жиротопки
58	Воздух производственного участка №1	58/1	Производственный участок №1
59	Воздух производственного участка №2	59/1	Производственный участок №2
60	Воздух производственного участка №3	60/1	Производственный участок №3
61	Воздух в холодильнике	61/1	Холодильник
62	Воздух на участке приемки молока	62/1	Участок приемки молока
63	Воздух на аппаратном участке №1	63/1	Аппаратный участок №1
64	Воздух на участке фасовки сыворотки №1	64/1	Участок фасовки сыворотки №1
65	Воздух на участке фасовки сыворотки №2	65/1	Участок фасовки сыворотки №2
66	Воздух на участке фасовки в мешки	66/1	Участок фасовки в мешки
67	Воздух на участке сушки	67/1	Участок сушки
68	Воздух на складе №1	68/1	Склад №1
69	Воздух на складе №2	69/1	Склад №2
70	Воздух производственного участка №4	70/1	Производственный участок №4
71	Воздух производственного участка №5	71/1	Производственный участок №5
72	Воздух производственного участка №6 (Конусы)	72/1	Производственный участок №6 (Конусы)
73	Воздух на аппаратном участке №2	73/1	Аппаратный участок №2

Отбор смывов с объектов производственной среды

Смывы с объектов производственной среды на предприятиях отбирали с помощью губки с нейтрализатором (3M Hydra-Sponge, США) со 100 см², а с труднодоступных мест — свабами (стерильными ватными тампонами) с летиновым бульоном (3M™ Swab-Sampler, США) (Юшина, 2022). Из полученных образцов делали ряд десятикратных разведений и проводили посев шпателем на поверхность среды Сабуро с хлорамфениколом (Oxoid, Великобритания). Полученные образцы инкубировали в термостате Binder (Binder, Германия) при 30 °C в течение 5 суток. После культивирования с чашек Петри отбирали колонии с различной морфологией и проводили идентификацию с помощью масс-спектрометрического анализа на приборе MALDI-TOF Autof ms1000 (Autobio, Китай).

Идентификация плесневых грибов

Видовую идентификацию выделенных колоний проводили на приборе MALDI-Tof-MS с помощью масс-спектрометра *Autof MS 1000* (*Autobio Diagnostics*, Китай). Для этого штаммы плесневых грибов переносили на PCA агар (Оболensk, Россия) и культивировали при 25 °C в течение 5 суток (Юшина и др., 2025). По истечении времени ингибирования биомассу с выросших едтничных клеток плесневых грибов вносили в центрифужные микропробирки с 1 см³ 75 % этанола, перемешивали пипетированием в течение 1 мин. Затем центрифугировали 2 мин при 13000 об/мин на центрифуге MiniSpin (Eppendorf, Германия), аккуратно удаляли супернатант. Повторяли центрифугирование и полностью удаляли надосадочную жидкость. Высушивали исследуемый образец в течение 5 мин при 37 °C в термостате (Binder, Германия). Добавляли 30 мкл «лизата 1» из набора «Набор реагентов для предварительной обработки образцов и последующего проведения анализа методом MALDI-TOF на масс-спектрометре» (MSA01, *Autobio Diagnostics Co., Ltd.*, Китай) и оставляли на 10 мин при комнатной температуре. По истечении времени отбирали 1,2 мкл супернатанта, переносили на пластину для образцов (*Autobio Diagnostics Co., Ltd.*, Китай) и высушивали при комнатной температуре. Затем сверху на образец наносили 1,2 мкл матрицы HCCA (α-циано-4-гидроксикоричная кислота, 99 %) из набора «Набор реагентов для предварительной обработки образцов и последующего проведения анализа методом MALDI-TOF на масс-спектрометре» (MSA01, *Autobio Diagnostics Co., Ltd.*, Китай) и опять подсушивали. Платину с образцами помещали в прибор и, используя программу *FlexControl* (получение спектров), запускали оборудование для идентификации микроорганизмов. Полученные результаты анализировали с помощью программного обеспечения: в случае, если значение были ниже 6.0 — результат считался ненадежным и не исполь-

зовался в дальнейшей работе. Результат считался надежным и учитывался при значениях 6.0–9.0 — на уровне рода, 9.0–9.5 — на уровне вида.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка распространенности плесневых грибов на молокоперерабатывающих предприятиях

Проведенный сравнительный микробиологический мониторинг распространения плесневых грибов в воздушной среде и поверхностях производственной среды на трех молокоперерабатывающих предприятиях выявил качественный состав и пространственно-технологическую специфичность распределения контаминирующей микобиоты. Результаты, систематизированные в Таблицах 4, 5 и 6, демонстрируют формирование сложных сообществ микроскопических грибов, структура которых детерминирована как общими закономерностями для подобных производств, так и индивидуальными особенностями каждого предприятия. Сравнительный анализ проб воздуха и смывов позволил выявить зоны персистенции микромицетов на оборудовании и оценить потенциальные пути их аэрозольного распространения.

Мониторинг на предприятии 1 (Таблица 4) показал, что доминирующими таксонами в воздухе выступили представители родов *Cladosporium* и *Penicillium*. Вид *Cladosporium cladosporioides* был обнаружен в воздухе над ключевыми объектами: формовочными столами (№1, №4), транспортной лентой и в зоне трапа №1, что подтверждает его статус универсального компонента аэриобиоты промышленных помещений. При этом, в смывах с этих же поверхностей данный вид отсутствовал, что может указывать на его преимущественно экзогенное (воздушное) происхождение и низкую адгезию к данным типам поверхностей. В отличие от этого, виды рода *Penicillium* (*P. gladioli*, *P. polonicum*, *P. rubens*, *P. chrysogenum*) были выявлены как в воздухе, так и в смывах, демонстрируя способность к колонизации поверхностей. Например, *P. gladioli* был обнаружен одновременно в воздухе и смывах в зоне трапа №1 и формовочного стола №4, а *P. rubens* и *P. chrysogenum* — только в смывах (формовочный стол №1 и термоблок, соответственно). Это характеризует данные зоны на предприятии 1 как участки устойчивой контаминации, где поверхности выступают резервуаром и потенциальным источником вторичного аэрозольного загрязнения. Особого внимания заслуживает комплексная контаминация в зоне трапа №1, где в воздухе выявлены *C. cladosporioides* и *Trichoderma asperelloides*, а на поверхности — *P. gladioli*. Отсутствие обнаруживаемых плесневых грибов в воздухе над термоблоками может быть связано с локальным действием повышенных

Таблица 4
Сравнительный анализ микобиоты воздуха и смывов с объектов производственной среды на Предприятии 1
Table 4
Comparative Analysis of Air and Surface Mycobiota in the Production Environment of Enterprise 1

№ образца	Место отбора образца	Воздух	Смыв
22	Формовочный стол №1	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	<i>Penicillium rubens</i>
23	Формовочный стол №2	<i>Cryptococcus magnus</i>	<i>Rhodotorula graminis</i>
24	Титаник №1	<i>Rhodotorula graminis</i>	Не обнаружено
25	Транспортер выход	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	Не обнаружено
26	Трап №1	<i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Trichoderma asperelloides</i>	<i>Penicillium gladioli</i>
27	Трап №2	<i>Penicillium gladioli</i>	<i>Debaryomyces spp</i>
28	Формовочный стол №3	Не обнаружено	Не обнаружено
30	Формовочный стол №4	<i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Penicillium gladioli</i>	<i>Penicillium gladioli</i> Не обнаружено
29	Термоблок, стол №1	Не обнаружено	<i>Penicillium chryseogen</i>
32	Термоблок, стол №2	Не обнаружено	Не обнаружено
31	Борт ванны №1	<i>Penicillium polonicum</i>	Не обнаружено

Таблица 5
Сравнительный анализ микобиоты воздуха и смывов с объектов производственной среды на Предприятии 2
Table 5
Comparative Analysis of Air and Surface Mycobiota in the Production Environment of Enterprise 2

№ образца	Место отбора образца	Воздух	Смывы
44	Сыродельный цех (ванны)	<i>Geotrichum candidum</i>	Не обнаружено
45	Колбасный участок (упаковка)	<i>Penicillium rugulosum</i>	Не обнаружено
46	Цех по уходу за сырами (упаковка)	<i>Penicillium italicum</i>	<i>Penicillium rugulosum</i>
47	Солильное отделение	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	Не обнаружено
48	«Теплая» камера созревания для сыра с пропионовокислыми бактериями	<i>Cladosporium pseudochalastosporoides</i>	Не обнаружено
49	Камера обсушки сыра	Не обнаружено	Не обнаружено
50	Камера созревания №1	Не обнаружено	Не обнаружено
51	Камера созревания №2	<i>Cladosporium pseudochalastosporoides</i> <i>Thanatephorus cucumeris</i>	Не обнаружено
52	Участок упаковки сыров	<i>Penicillium polonicum</i>	Не обнаружено

температур, однако обнаружение *P. chrysogenum* в смыве с одного из них указывает на возможную выживаемость спор на поверхностях даже в таких зонах.

Анализ микобиоты на предприятии 2 (Таблица 5), характеризуется присутствием в воздухе видов, ассоциированных со специфическими этапами производства. Показательно обнаружение в воздухе сыродельного цеха (ванны) вида *Geotrichum candidum*. В воздухе солильного отделения и камер созревания доминировали представители рода *Cladosporium* (*C. cladosporioides* и *C. pseudochalastosporoides*). Данные смывов с поверхностей на этом предприятии оказались менее показате-

тельными: плесневые грибы были обнаружены только в одной пробе (цех упаковки), где *Penicillium rugulosum* был идентифицирован на поверхности, в то время как в воздухе этой же зоны присутствовал *P. italicum*. Это может свидетельствовать об относительно эффективных санитарных процедурах или о преимущественно воздушном пути распространения контаминации. Однако обнаружение в воздухе камеры созревания №2 типичного почвенного патогена *Thanatephorus cucumeris* указывает на экзогенный источник заноса, а выявление *Penicillium polonicum* в воздухе на участке упаковки создает прямой риск постпроизводственной контаминации готовой продукции.

Таблица 6

Сравнительный анализ микобиоты воздуха и смывов с объектов производственной среды на Предприятии 3

Table 6

Comparative Analysis of Air and Surface Mycobiota in the Production Environment of Enterprise 3

№ образца	Место отбора образца	Воздух	Смывы
56	Участок упаковки в гофроящики	<i>Penicillium polonicum</i> <i>Penicillium verrucosum</i> <i>Penicillium gladioli</i>	Не обнаружено
57	Участок жиротопки	<i>Penicillium gladioli</i> <i>Penicillium camamberti</i> Микроорганизм, отсутствующий в базе данных	Не обнаружено
58	Производственный участок №1	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> <i>Penicillium gladioli</i> <i>Penicillium camamberti</i>	Не обнаружено
59	Производственный участок №2	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> Микроорганизм, отсутствующий в базе данных	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>
60	Производственный участок №3	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> <i>Penicillium gladioli</i> <i>Penicillium polonicum</i>	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>
61	Холодильник	<i>Penicillium gladioli</i>	Не обнаружено
62	Участок приемки молока	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> <i>Penicillium gladioli</i> <i>Penicillium polonicum</i>	<i>Penicillium gladioli</i>
63	Аппаратный участок №1	Микроорганизм, отсутствующий в базе данных	Не обнаружено
64	Участок фасовки сыворотки №1	<i>Penicillium gladioli</i> <i>Penicillium polonicum</i>	Не обнаружено
65	Участок фасовки сыворотки №2	<i>Penicillium polonicum</i> <i>Penicillium gladioli</i>	<i>Penicillium gladioli</i>
66	Участок фасовки в мешки	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> <i>Penicillium gladioli</i> <i>Penicillium polonicum</i> Микроорганизм, отсутствующий в базе данных	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> <i>Penicillium polonicum</i>
67	Участок сушки	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> <i>Penicillium gladioli</i> <i>Penicillium polonicum</i>	<i>Penicillium gladioli</i>
68	Склад №1	<i>Penicillium gladioli</i> <i>Penicillium polonicum</i> Микроорганизм, отсутствующий в базе данных	Не обнаружено
69	Склад №2	<i>Penicillium polonicum</i> <i>Penicillium rugulosum</i> <i>Penicillium camamberti</i> <i>Penicillium aurantiogriseum</i>	<i>Penicillium camamberti</i>
70	Производственный участок №4	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> <i>Aspergillus wentii</i>	Не обнаружено
71	Производственный участок №5	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> <i>Botrytis cinerea</i>	Не обнаружено
72	Производственный участок №6 (Конусы)	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> Микроорганизм, отсутствующий в базе данных	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i>
73	Аппаратный участок №2	<i>Cladosporium pseudocladosporioides</i> Микроорганизм, отсутствующий в базе данных	Не обнаружено

На предприятии 3 (Таблица 6) выявлена наиболее масштабная и комплексная картина контаминации, связанная с большей выборкой образцов. В воздухе абсолютно доминировали представители рода *Penicillium* (*P. polonicum*, *P. gladioli*, *P. verrucosum*, *P. Camemberti* и др.), обнаруживаемые на всех этапах – от приемки молока до упаковки и склада. Вид *P. polonicum* был идентифицирован в воздухе 9 из 18 позитивных проб, а *Cladosporium pseudocladosporioides* – в воздухе 10 различных зон. Критически важным является частое совпадение таксономического состава в пробах воздуха и смывов, что свидетельствует о формировании устойчивых очагов контаминации на поверхностях оборудования. Например, *C. pseudocladosporioides* и *P. gladioli* неоднократно обнаруживались параллельно в воздухе и на поверхностях (участки №2, №3, приемки молока, фасовки в мешки). На участке фасовки сыворотки №2 и сушки *P. gladioli* был найден в обоих типах проб, а на складе №2 *P. camemberti* – в смыве при его наличии в воздухе. Это указывает на то, что поверхности являются постоянным резервуаром для этих видов, способствуя их циркуляции в воздухе. Особую озабоченность вызывает обнаружение в воздухе (без обнаружения в смывах на данных участках) видов с выраженным токсигенным потенциалом – *Aspergillus wentii* и *Botrytis cinerea*, а также высокая частота встречаемости неидентифицированных микроорганизмов, требующих применения методов метагеномного анализа.

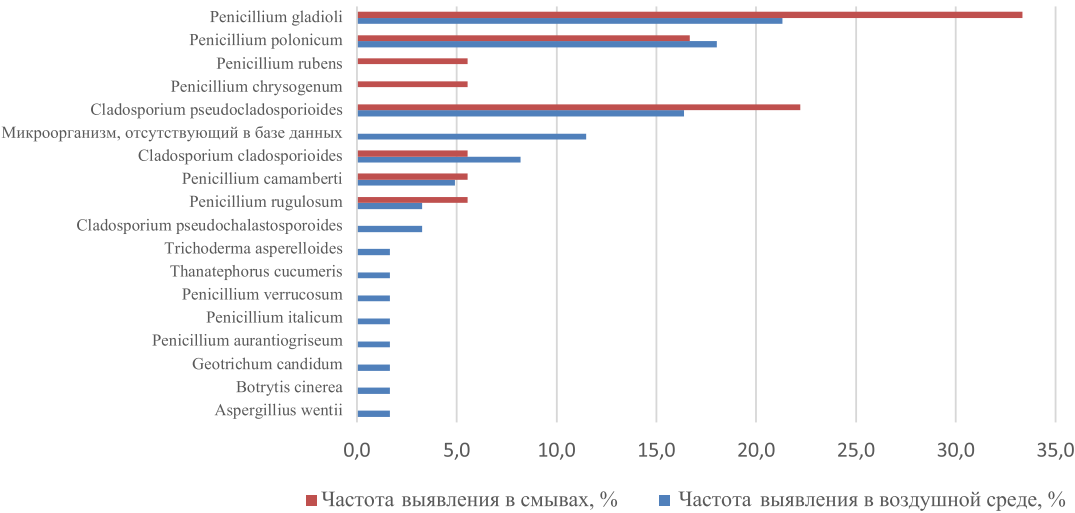
Анализ частоты встречаемости плесневых грибов на молокоперерабатывающих предприятиях

Анализ частоты встречаемости плесневых грибов в производственной среде молокоперерабатывающих предприятий выявил иерархическую структуру и значительные различия в распространенности различных таксонов микроскопических грибов. Результаты представлены на Рисунке 1.

Доминирующим микроорганизмом в обеих исследуемых производственных средах был вид *Penicillium gladioli*, демонстрирующий максимальные значения частоты выявления как в пробах воздуха (21,3 %), так и в смывах с поверхностей (33,3 %). Совместно с видами *Penicillium polonicum* (18,0 % в воздухе, 16,7 % в смывах) и *Cladosporium pseudocladosporioides* (16,4 % в воздухе, 22,2 % в смывах) они формируют устойчивое ядро резидентной микобиоты, совокупная доля которой в пробах с поверхностей достигает 72,2 %. Высокая распространённость *P. polonicum* на всех предприятиях подтверждает его статус тотального контаминанта отрасли, в то время как выраженное преобладание *C. pseudocladosporioides* именно в смывах указывает на его повышенную адгезивную способность.

Сравнительный анализ выявил существенные различия в составе и происхождении контаминантов двух производственных сред. Микробное сообщество поверхностей характеризуется меньшим таксономическим разнообразием и высокой концентрацией вокруг

Рисунок 1
Частота выявления различных видов грибов, циркулирующих на молокоперерабатывающих предприятиях
Figure 1
Frequency of Detection of Various Fungal Species Circulating in Dairy Processing Plants



ограниченного числа адаптированных видов. Критически важным диагностическим признаком стало обнаружение в смывах специфических видов (*Penicillium chrysogenum*, *Penicillium rubens*), отсутствовавших в параллельных пробах воздуха. Данный факт однозначно свидетельствует о наличии скрытых, локализованных очагов персистирующей контаминации, не выявляемых при рутинном мониторинге воздушной среды. В противоположность этому, целый ряд таксонов, включая *Geotrichum candidum*, *Aspergillus wentii*, *Botrytis cinerea*, *Thanatephorus cucumeris*, а также все неидентифицированные с помощью метода MALDI-TOF микроорганизмы (11,5 % находок в воздухе), были обнаружены исключительно в воздушной среде. Их аллохтонное (внешнее) происхождение связано с каналами экзогенного заноса: притоком наружного воздуха, перемещением персонала, поступлением сырья или упаковочных материалов. Присутствие фитопатогенных видов (*B. cinerea*, *T. cucumeris*) служит прямым маркером контаминации, связанной с растительным сырьем.

Значительную часть сообщества, 11,5 %, составили микроорганизмы, не идентифицированные стандартными методами, что подчеркивает ограниченность существующих таксономических баз. Не идентифицированные микроорганизмы могут представлять неизвестные риски, так как их идентификация невозможна в связи с ограниченностью баз данных MALDI-TOF. Они могут включать потенциально опасные виды, которые еще не были описаны.

Параллельно с выявлением общих закономерностей, анализ позволил зафиксировать уникальные микробные профили каждого предприятия, что имеет критическое значение для оценки специфических рисков. На Предприятии 2, специализирующемся на сыроделии, был обнаружен вид *Geotrichum candidum*, что отражает его технологическую связь с процессами созревания и одновременно указывает на потенциальный риск неконтролируемой контаминации. Там же выявление почвенного патогена *Thanatephorus cucumeris* в камере созревания однозначно свидетельствует об экзогенном канале заноса, не выявляемом при анализе лишь общей микрофлоры. На Предприятии 3 была отмечена наибольшая частота встречаемости неидентифицированных изолятов, а также обнаружены нетипичные для молочных производств виды с токсигенным потенциалом (*Aspergillus wentii*, *Botrytis cinerea*), что может сигнализировать о наличии уникальных, слабо изученных экологических ниш или источников загрязнения.

Таким образом, минимальные частоты выявления (от 1,7 % до 3,3 %) характерны для обширной группы из одиннадцати видов, включая *Penicillium rugulosum* (3,3 %), а также различные виды родов *Penicillium*, *Aspergillus*, *Botrytis*, *Trichoderma*, *Thanatephorus* и дрож-

жевые грибы. Оценка уникальной микрофлоры каждого предприятия является фундаментом для разработки персонализированных и экономически эффективных программ микробиологического контроля. В то время как универсальные санитарные протоколы направлены на подавление общих доминантов (например, *Penicillium gladioli*), именно специфические «сигнальные» виды позволяют выявить и нейтрализовать скрытые, локальные источники риска.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенного микологического мониторинга на трех молокоперерабатывающих предприятиях выявили сложную и структурированную экосистему микроскопических грибов, контаминирующих воздушную среду и поверхности технологического оборудования. Полученные данные позволяют не только констатировать факт наличия контаминации, но и проанализировать формирование резидентной микробиоты, оценить специфические профили рисков для каждого производства и критически осмыслить применяемые подходы к контролю в контексте современных научных представлений о пищевой безопасности.

Абсолютное доминирование видов *Penicillium gladioli*, *P. polonicum* и *Cladosporium pseudocladosporioides*, совокупно составляющих более 72 % находок в смывах, свидетельствует не о случайном заносе, а о формировании устойчивого сообщества адаптированных микроорганизмов. Эта концентрированная структура является прямым следствием селективного давления условий пищевого производства (пониженные температуры, высокая влажность, наличие органических субстратов). Особую значимость имеет тотальная распространенность *P. polonicum* на всех предприятиях. Данный вид, как и многие представители рода *Penicillium*, обладает подтвержденным токсигенным потенциалом. В частности, он способен к продукции охратоксина А — микотоксина с выраженными нефротоксическими и потенциально канцерогенными свойствами, накопление которого в молочных продуктах (особенно в сырах) вызывает серьезную озабоченность регуляторных органов (Brooks et al, 2012). Таким образом, выявленное ядро микробиоты трансформирует риск микробной порчи в потенциальную химическую опасность, требующую не только микробиологического, но и токсикологического мониторинга.

Согласно литературным источникам, основными видами, вызывающими порчу молочных продуктов, являются *Candida*, *Galactomyces* и *Yarrowia*, а также *Penicillium*, *Mucor* и *Cladosporium* для дрожжей и плесневых грибов соответственно (Brooks et al, 2012).

Параллельно с общими закономерностями, исследование четко зафиксировало уникальные микробные сообщества, характерные для каждого предприятия, что служит диагностической основой для целевых корректирующих действий. На Предприятии 1 комплексная контаминация зон трапов, сочетающая дрожжи (*Cryptococcus*, *Rhodotorula*) и целлюлозолитические грибы (*Trichoderma*), указывает на локальные проблемы с гигиеной и возможным состоянием упаковочных материалов. Критичным здесь является обнаружение *P. chrysogenum* исключительно в смыве с поверхности термоблока при отрицательном результате анализа воздуха. Это классический пример скрытого резидентного очага, формирующего биопленку и не выявляемого при рутинном мониторинге воздуха, что подчеркивает необходимость комплексного отбора проб. На Предприятии 2 микробный профиль отражает технологическую специфику. Присутствие *Geotrichum candidum* в воздухе логично, однако его неконтролируемая циркуляция, наряду с обнаружением почвенного фитопатогена *Thanatephorus cucumeris* в камере созревания, является четким маркером экзогенных каналов заноса через системы вентиляции или с сырьем. Наиболее тревожный профиль выявлен на Предприятии 3, для которого характерны максимальное видовое разнообразие, устойчивые циклы «поверхность-воздух-поверхность» для *C. pseudocladosporioides* и *P. gladioli*, а также наличие нетипичных токсигенных видов (*Aspergillus wentii*). Эта картина свидетельствует о системном характере проблем, вероятно, связанных с неэффективностью общезаводских санитарных программ и множественными источниками загрязнения. Эти данные подчеркивают необходимость разработки персонализированных протоколов контроля для каждого участка производства, что ранее предлагалось в работах Ropars et al. (2012).

Высокая доля неидентифицированных видов (12,7%) подчеркивает ограничения современных методов анализа. MALDI-TOF масс-спектрометрия, несмотря на свою эффективность для рутинной диагностики, зависит от полноты баз данных. Для решения этой проблемы целесообразно комбинировать MALDI-TOF с секвенированием ITS-регионов или генов 18S рПНК, что позволяет определить филогенетическое положение даже новых видов. В контексте пищевой безопасности такие «неизвестные» микроорганизмы требуют особого внимания, так как они могут продуцировать нетипичные метаболиты или обладать повышенной вирулентностью. Неидентифицированные микроорганизмы указывают на наличие редких или мутировавших штаммов, а также сильное загрязнение из нехарактерных источников.

Присутствие такого видового разнообразия плесневых грибов может указывать на недостаточную эффективность применяемых санитарных процедур, так как биопленки, формируемые *Penicillium*, устойчивы к стан-

дартным дезинфектантам (Simões et al, 2023). Результаты, полученные Edlind et al. (2022), демонстрируют устойчивость *Candida* к перекиси водорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системный сравнительный мониторинг воздушной среды и поверхностей технологического оборудования позволил не только выявить общие для отрасли закономерности контаминации, но и детально описать уникальные микробные профили, детерминированные спецификой каждого производства. В результате работы установлено, что микобиота формирует устойчивую экосистему, состоящую из универсального ядра, представленного высокоадаптированными видами *Penicillium gladioli*, *Cladosporium pseudocladosporioides* и *Penicillium polonicum*, и специфического периферического сообщества. Доминирование этого ядра подтверждает его ключевую роль как основного источника постоянного микробиологического риска. Параллельно выявление уникальных «сигнальных» видов, таких как *Geotrichum candidum* и *Thanatephorus cucumeris* на сыродельном производстве или *Aspergillus wentii* на предприятии с широким ассортиментом, служит точным диагностическим инструментом для идентификации специфических технологических и экзогенных каналов заноса контаминантов.

Основные направления будущих исследований должны быть сосредоточены на углубленной идентификации и оценке рисков с применением метагеномного секвенирования для изучения полного таксономического разнообразия и скрининга генов токсигенности, на проведении долгосрочных количественных мониторинговых исследований для установления корреляций между уровнем контаминации среды и качеством готовой продукции, а также на разработке новых технологий контроля, включая изучение новых дезинфектантов против конкретных выявленных доминантов. Реализация этих направлений будет способствовать переходу к проактивной системе управления микробиологическими рисками, что является неотъемлемым условием устойчивого развития молокоперерабатывающей отрасли и гарантии высочайшего качества и безопасности выпускаемой продукции.

ВКЛАД АВТОРОВ:

Махова А.А.: Разработка и проектирование методологии исследования; создание моделей, написание черновика рукописи

Юшина Ю.К.: Формулирование замысла/идеи исследования, целей и задач; написание рукописи — рецензирование и редактирование

Зайко Е.В.: Осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных/доказательств, написание рукописи — рецензирование и редактирование

Грудистова М.А.: Выполнение экспериментов

Стаханова О.А.: Выполнение экспериментов

Дерюгин В.К.: Выполнение экспериментов

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Anzhelika A. Makhova: Development or design of methodology; creation of models; writing a draft of a manuscript

Yulia K. Yushina: Ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims, manuscript writing — reviewing and editing

Elena V. Zaiko: Conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection, manuscript writing — reviewing and editing

Maria A. Grudistova: Performing the experiments

Vyacheslav K. Deryugin: Performing the experiments

Olesya A. Stakhanova: Performing the experiments

ЛИТЕРАТУРА

- Юшина, Ю. К. (2022). Научные основы реинжиниринга процедур обеспечения микробиологической безопасности мясной продукции [Автореферат доктора технических наук, ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН], Электронная библиотека диссертаций РГБ. <https://search.rsl.ru/ru/record/01011173143>
- Юшина, Ю. К., Зайко, Е. В., Батаева, Д. С., Грудистова, М. А., Махова, А. А., Дерюгин, В. К., & Ареева, Е. В. (2025). Источники и риски контаминации мясной продукции. Дифференцированная оценка роли воздушной среды и технологических поверхностей. *Мясная индустрия*, (11), 44–49. <https://doi.org/10.37861/2618-8252-2025-11-44-48>
- Юшина, Ю. К., Батаева, Д. С., Махова, А. А., Зайко, Е. В., & Грудистова, М. А. (2024). Экологический мониторинг пищевых предприятий методами масс-спектрометрии и метагеномного секвенирования. *Все о мясе*, (5), 26–30. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2024-5-26-30>
- Bernardi, A. O., Garcia, M. V., Copetti, M. V. (2019). Food industry spoilage fungi control through facility sanitization. *Current Opinion in Food Science*, 29, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.07.006>
- Brooks, J. C., Martinez, B., Stratton, J., Bianchini, A., Krokstrom, R., & Hutkins, R. (2012). Survey of raw milk cheeses for microbiological quality and prevalence of foodborne pathogens. *Food Microbiology*, 31(2), 154–158. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.03.013>
- Edlind, T., & Katiyar, S. (2022). Intrinsically High Resistance of *Candida glabrata* to Hydrogen Peroxide and Its Reversal in a Fluconazole-Resistant Mutant. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 66(9), e0072122. <https://doi.org/10.1128/aac.00721-22>
- Garnier, L., Valence, F., & Mounier, J. (2017). Diversity and Control of Spoilage Fungi in Dairy Products: An Update. *Microorganisms*, 5(3), 42. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5030042>
- Garnier, L., Valence, F., Pawtowski, A., Auhustsinava-Galerie, L., Frotté, N., Baroncelli, R., Deniel, F., Coton, E., & Mounier, J. (2017). Diversity of spoilage fungi associated with various French dairy products. *International Journal of Food Microbiology*, 241, 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.10.026>
- Martin, N. H., Torres-Frenzel, P., & Wiedmann, M. (2021). Invited review: Controlling dairy product spoilage to reduce food loss and waste. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 1251–1261. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19130>
- Ropars, J., Cruaud, C., Lacoste, S., & Dupont, J. (2012). A taxonomic and ecological overview of cheese fungi. *International Journal of Food Microbiology*, 155(3), 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.02.005>
- Simões, L. C., Chaves, A. F. A., Simões, M., & Lima, N. (2023). Interactions between *Penicillium brevicompactum*/*Penicillium expansum* and *Acinetobacter calcoaceticus* isolated from drinking water in biofilm development and control. *International Journal of Food Microbiology*, 384, 109980. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109980>

REFERENCES

- Yushina, Yu. K. (2022). *Scientific Foundations of Reengineering Procedures for Ensuring Microbiological Safety of Meat Products [Abstract of a Doctor of Technical Sciences Dissertation, Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbatov of the Russian Academy of Sciences]*, Electronic Library of Dissertations of the Russian State Library. <https://search.rsl.ru/ru/record/01011173143>
- Yushina, Yu. K., Zaiko, E. V., Bataeva, D. S., Grudistova, M. A., Makhova, A. A., Deryugin, V. K., & Ageeva, E. V. (2025). Sources and risks of meat product contamination. Differentiated assessment of the role of the air environment and technological surfaces. *Meat Industry*, (11), 44-49. <https://doi.org/10.37861/2618-8252-2025-11-44-48>
- Yushina, Yu. K., Bataeva, D. S., Makhova, A. A., Zaiko, E. V., & Grudistova, M. A. (2024). Environmental monitoring of food enterprises using mass spectrometry and whole genome sequencing. *Vsyo o myase [All about Meat]*, (5), 26-30. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2024-5-26-30>
- Bernardi, A. O., Garcia, M. V., Copetti, M. V. (2019). Food industry spoilage fungi control through facility sanitization. *Current Opinion in Food Science*, 29, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.07.006>
- Brooks, J. C., Martinez, B., Stratton, J., Bianchini, A., Krokstrom, R., & Hutkins, R. (2012). Survey of raw milk cheeses for microbiological quality and prevalence of foodborne pathogens. *Food Microbiology*, 31(2), 154–158. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.03.013>
- Edlind, T., & Katiyar, S. (2022). Intrinsically High Resistance of *Candida glabrata* to Hydrogen Peroxide and Its Reversal in a Fluconazole-Resistant Mutant. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 66(9), e0072122. <https://doi.org/10.1128/aac.00721-22>
- Garnier, L., Valence, F., & Mounier, J. (2017). Diversity and Control of Spoilage Fungi in Dairy Products: An Update. *Microorganisms*, 5(3), 42. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5030042>
- Garnier, L., Valence, F., Pawtowski, A., Auhustsinava-Galerie, L., Frotté, N., Baroncelli, R., Deniel, F., Coton, E., & Mounier, J. (2017). Diversity of spoilage fungi associated with various French dairy products. *International Journal of Food Microbiology*, 241, 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.10.026>
- Martin, N. H., Torres-Frenzel, P., & Wiedmann, M. (2021). Invited review: Controlling dairy product spoilage to reduce food loss and waste. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 1251–1261. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19130>
- Ropars, J., Cruaud, C., Lacoste, S., & Dupont, J. (2012). A taxonomic and ecological overview of cheese fungi. *International Journal of Food Microbiology*, 155(3), 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.02.005>
- Simões, L. C., Chaves, A. F. A., Simões, M., & Lima, N. (2023). Interactions between *Penicillium brevicompactum*/*Penicillium expansum* and *Acinetobacter calcoaceticus* isolated from drinking water in biofilm development and control. *International Journal of Food Microbiology*, 384, 109980. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109980>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s275>

Использование гидролизата кератина, полученного микробной конверсией куриного пера, в косметической сыворотке для ухода за волосами

К. Э. Бетехтин, Е. Р. Вольнова, Л. Э. Розанцева, Н. Г. Машенцева

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

Корреспонденция:

Машенцева Наталья Геннадьевна,
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
125080, Россия, Москва,
Волоколамское шоссе, 11
E-mail: natali-mng@yandex.ru

Конфликт интересов:

авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 07.05.2025

Поступила после

рецензирования: 12.09.2025

Принята: 26.12.2025

Copyright: © 2025 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Гидролизаты кератина эффективно восстанавливают структуру волос, формируя защитную пленку и придавая им эластичность. Традиционные химические методы получения кератина неэкологичны, тогда как биотехнологический подход с использованием кератинолитических микроорганизмов представляет собой экологически устойчивую альтернативу. Однако доступность промышленных кератиназов ограничена: на мировом рынке представлено лишь несколько препаратов, а в России — это единственный препарат «Кератиназа» компании ООО «Торговый дом „Биопрепарат“».

Цель. Разработать биотехнологический метод получения гидролизата кератина с использованием новых штаммов *B. licheniformis* БАЛ-1 и БАЛ-2 и оценить его эффективность в составе косметической сыворотки для волос.

Материалы и методы. Исследование проводили с использованием штаммов *B. licheniformis* БАЛ-1 и БАЛ-2, куриных перьев бройлеров (влажность 75 %), клеточных линий SPEV и MDBK для биотестирования

Культивирование осуществляли на модифицированной среде с пером (5 г/100 мл) при 28 °C и 80 об/мин в течение 72 ч. Оптимизировали следующие параметры: температуру (20–40 °C), перемешивание (80–160 об/мин), содержание пера (5–20 г), добавление в питательную среду мочевины (до 8 г). Кератинозную активность определяли спектрофотометрически.

Результаты. Оптимизация условий повысила кератинозную активность в 2,4 раза: до 39 КА/см³ (БАЛ-1) и 44 КА/см³ (БАЛ-2). Гидролизат показал безопасность на клеточных линиях SPEV и MDBK (жизнеспособность клеток ≥ 65 %). Разработанная сыворотка (3 % гидролизата) при тестировании на фокус-группе ($n = 5$, 2 месяца) улучшила состояние волос: 100 % участниц отметили повышение гладкости, 80 % — улучшение упругости и блеска.

Выводы. Разработанный метод ферментативного гидролиза перьев эффективен для создания косметического ингредиента — гидролизата кератина. Дальнейшие исследования будут направлены на определение биологически активных пептидов в перьевом гидролизате и оценку их вклада в повышение эффективности косметической сыворотки для волос.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

биоконверсия, *B. licheniformis*, кератинозная активность, биотестирование, косметическая сыворотка, микроскопия, трихоскопия

Для цитирования: Бетехтин, К. Э., Вольнова, Е. Р., Розанцева, Л. Э., & Машенцева, Н. Г. (2025). Использование гидролизата кератина, полученного микробной конверсией куриного пера, в косметической сыворотке для ухода за волосами. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 37-55. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s275>



<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s275>

The Use of Keratin Hydrolysate Obtained by Microbial Conversion of Chicken Feathers as Part of a Cosmetic Serum for Hair Care

Kirill E. Betekhtin, Ekaterina R. Volnova, Lyubov E. Rozantseva, Natalia G. Mashentseva

Russian Biotechnological University
(BIOTECH University), Moscow, Russia

Correspondence:

Natalia G. Mashentseva,
Russian Biotechnological University,
11, Volokolamskoe highway,
Moscow, 125080, Russia
E-mail: natali-mng@yandex.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 07.05.2025

Received in revised form: 12.09.2025

Accepted: 26.12.2025

Copyright: © 2025 The Authors

ABSTRACT

Introduction. Keratin hydrolysates have been shown to be effective in restoring hair structure, forming a protective film, and providing elasticity. Traditional chemical methods for producing keratin, however, are not environmentally friendly. A biotechnological approach using keratinolytic microorganisms presents a more sustainable alternative. Although several keratinase drugs are available on the market, only one is produced in Russia, by Biopreparat Trading House.

Purpose. This study aims to develop a biotechnological method for producing keratin hydrolysate using two newly isolated strains of *Bacillus licheniformis*, BAL-1 and BAL-2, and to assess its efficacy in a cosmetic hair serum formulation.

Materials and methods. *Bacillus licheniformis* strains BAL-1 and BAL-2 were used for the study. Chicken feathers with a moisture content of 75% were used as a source of keratin. SPEV and MDBK cell lines were employed for biotesting.

Cultivation was carried out on a modified medium with feather at 5 g/100 ml at 28 °C and 80 rpm for 72 hours. The parameters were optimized to include temperature (20–40 °C), stirring (80–160 rpm), feather content (5–20 g), and adding up to 8 g of urea to the nutrient medium. Keratinase activity was determined spectrophotometrically.

Results. Optimization of the conditions resulted in an increase in keratinase activity by 2.4 times, up to 39 KA/cm³ for BAL-1 and 44 KA/cm³ for BAL-2. The hydrolysate was safe for use on SPEV and MDBK cell lines, with cell viability ≥65 %. The serum (containing 3 % hydrolysate) improved hair condition in a focus group of 5 people over 2 months, with 100 % reporting increased smoothness and 80 % reporting elasticity and shine.

Conclusions. The developed method of enzymatic hydrolysis of feathers has been shown to be effective in creating a cosmetic ingredient, keratin hydrolysate. Future research will focus on identifying biologically active peptides in feather hydrolysate and assessing their potential contribution to the efficacy of cosmetic hair serums.

KEYWORDS

bioconversion, *Bacillus licheniformis*, keratinase activity, biotesting, cosmetic serum, microscopy, trichoscopy



To cite: Betekhtin, K. E., Volnova, E. R., Rozantseva, L. E., & Mashentseva, N. G. (2025). The use of keratin hydrolysate obtained by microbial conversion of chicken feathers as part of a cosmetic serum for hair care. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 37-55. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s275>

ВВЕДЕНИЕ

Кератин представляет собой стабильный, нерастворимый и волокнистый структурный белок, обнаруженный в эпителиальных (мягкий кератин) и защитных тканях, таких как волосы, ногти, шерсть, перья и рога (твердые кератины) (Coulombe et al., 2002). По вторичной структуре кератины можно разделить на α -кератин и β -кератин (Meyers et al., 2008). β -кератин богат β -складчатыми листами, образующими супрамолекулярные пучки фибрилл (Bodde et al., 2011), а α -кератин состоит из α -спирально закрученных клубков, самоорганизующихся в промежуточные нити (Meyers et al., 2008; Xiao X.I. et al., 2017). Прочность кератина обусловлена указанными плотно упакованными конфигурациями α -спиралей и β -листов. Кератины отличаются высоким содержанием дисульфидных связей, что обеспечивает их прочность и химическую стабильность. Соотношение α - и β -кератинов значительно варьируется в зависимости от источника (Lange et al., 2016). Например, волосы в основном состоят из α -кератина, а перья — из β -кератина (Korniłowicz-Kowalska et al., 2011; Fraser et al., 2008).

Кератин встречается в природе главным образом в перьях, шерсти, рогах, ногтях, волосах и является структурным компонентом кожи позвоночных (Bradbury, 1973). В корне волоса волокна находятся две основные группы белков: α -кератины с низким значением серосодержащих аминокислот (ММ 40–60 кДа) и матриксные белки с высоким содержанием указанных аминокислот (ММ 10–25 кДа) (Mohamed et al., 2021). В совокупности волосное волокно состоит на 50–60 % из α -кератинов и на 20–30 % из матриксных белков (Wang et al., 2016). α -кератины агрегируются, образуя микроволокнистые структуры, известные как промежуточные кератиновые нити, которые придают волокну волоса прочность. Белки матрикса, кератин-ассоциированные белки, функционируют в первую очередь как дисульфидный сшивающий агент или «клей», который укрепляет кортикальную суперструктуру волос (Xiao et al., 2017).

Повреждение волос, обусловленное негативным воздействием окружающей среды, неправильным косметическим уходом или его отсутствием, сопровождается различными разрушениями основных структурных единиц волоса — α - и β -кератина, имеющего структуру филамент-матрикса (Bloch et al., 2019). Для снижения негативного влияния на волосы или устранения последствий повреждения используют косметические средства: шампуни, маски, бальзамы, лосьоны, сыворотки. В последнее десятилетие активным ингредиентом указанных средств стал кератин и его гидролизованные формы.

Согласно целому ряду публикаций интактный кератин, выделенный, например, из овечьей шерсти, рогов и верхнего кожного слоя сельскохозяйственных животных (Barba et al., 2010; Savaides et al., 2014; Tinoco et al., 2021; Cruz et al., 2017; Hatsbach de Paula et al., 2022), обладает низкой способностью встраиваться в поврежденный стержень волоса. Это связано в первую очередь с его высокой молекулярной массой, а также с тем, что он представляет собой прочно сшитый белок с многочисленными дисульфидными связями, но всего с несколькими доступными для взаимодействия нуклеофильными тиоловыми группами. Именно с нуклеофильными тиоловыми группами связано сродство кератина с волосами. Следовательно, разработка технологий производных кератина, обладающих повышенной реакционной способностью за счет содержания свободных активированных сульфгидрильных групп, будет способствовать созданию косметических средств с усиленным и постоянным эффектом «связывания» с волосами (Leichner et al., 2019).

Одними из самых перспективных производных кератина в отношении восстановления структуры волос являются гидролизаты кератина. По данным ряда исследований, гидролизаты кератина способствуют формированию защитной пленки, встраиваясь в кутикулу волос, улучшают их структуру и повышают эластичность. Структурные элементы природного кератина (пептиды и аминокислоты) способны проникать в кожу и внутренний слой волос, обеспечивая питание и восстановление (Sinkiewicz et al., 2018; Chilakamarthy et al., 2021; Liu et al., 2021; Malinauskyte et al., 2021).

В настоящее время для получения гидролизатов кератина из шелкопряда, овечьей шерсти, свиной щетины и перьевых отходов в мировой и отечественной практике используются традиционные технологии, основанные на применении агрессивных химических веществ (кислоты, щелочи и растворы солей высокой концентрации), что приводит к высоким технологическим и эксплуатационным расходам, а также увеличивает экологическую нагрузку (Altman et al., 2003; Tasaki, 2021; Deb-Choudhury, 2016). В качестве более экологичной альтернативы получения кератина был предложен способ гидролиза кератина перегретым водяным паром (Bhavsar et al., 2016). Однако было показано, что гидролиз указанным способом приводит к разрушению пептидных связей и глубокой деградации белка (Ji et al., 2014).

Наибольшим потенциалом с точки зрения экологичности и получения гидролизатов кератина, содержащих биоактивные пептиды, обладают биотехнологические методы, в частности микробная конверсия (Lange et al., 2016). На сегодняшний день поиск, исследования и производство кератина чрезвычайно актуальны и в России, и в мире. Исходя из результатов ранее проведенных исследова-

ний, для осуществления микробного гидролиза кератин-содержащего сырья уже были использованы бактерии рода *Lysobacter* (Allpress et al., 2002), *Bacillus* (Balaji et al., 2008), *Streptomyces rimosus* (He et al., 2018), *Nocardia* (Bhari et al., 2019), *Fusiformis nodosus* (Yang, Reddy, 2013), грибы рода *Scopulariopsis* (Anbu et al., 2005), *Aspergillus* (Anitha, Palanivelu, 2013), *Ctenomyces* (Gupta et al., 2013), *Penicillium* (He et al., 2018), *Fusarium* (Pawar et al., 2018), дрожжи *Candida* (Wan et al., 2018) и др. Несмотря на достаточно интенсивное накопление данных о разнообразии кератинолитических микроорганизмов, ассортимент промышленных кератиназ зарубежом достаточно ограничен (Valkerase®, Versazyme® и Prionzyme®), в России представлен лишь один коммерческий ферментный препарат с кератиназной активностью — Кератиназа (производитель ООО «Торговый дом „Биопрепарат“»).

Актуальность исследования обусловлена тем, что кератиназная активность микроорганизмов является ключевым фактором в биоконверсии кератина, однако не гарантирует безопасного и эффективного превращения отходов в полезные продукты. Критически важен целенаправленный поиск и отбор безопасных штаммов-продуцентов кератиназы, способных эффективно разлагать кератин без образования токсичных побочных продуктов. Кроме того, оптимизация состава питательной среды и параметров культивирования имеет решающее значение для повышения выхода целевых продуктов биоконверсии и обеспечения стабильности процесса. Таким образом, разработка эффективных и безопасных биотехнологических решений для переработки кератинсодержащих отходов требует комплексного подхода, включающего селекцию штаммов, оптимизацию условий культивирования и контроль безопасности конечных продуктов.

С учетом обозначенных проблем **целью** настоящего исследования является разработка биотехнологических решений получения гидролизата кератина с использованием кератиназ новых штаммов *B. licheniformis* БАЛ-1 и БАЛ-2 и исследование его косметической эффективности в составе сыворотки для волос. Для достижения цели сформулированы задачи: 1) повысить кератиназную активность штаммов, способных расти на среде с единственным источником углерода в виде пера; 2) определить рациональные параметры ферментативного гидролиза кератинсодержащего сырья; 3) оценить безопасность полученного гидролизата кератина на клеточных тест-системах методом биотестирования; 4) разработать рецептуру косметической сыворотки с гидролизатом кератина с определением показателей качества и микробиологической безопасности; 5) определить косметическую эффективность сыворотки с помощью фокус-групп, микро- и трихоскопирования волос.

В рамках исследования для более эффективного использования перьевых отходов было предложено предварительное расщепление перьев протеолитическими микроорганизмами. Таким образом, использование перьев птицы в качестве субстрата для ферментации микроорганизмами, разлагающими кератин, может быть более экологичным подходом для создания гидролизатов кератина и косметических средств на его основе, способствующих восстановлению волос.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектами исследования были: (1) штаммы *Bacillus licheniformis* БАЛ-1 и БАЛ-2 — природные изоляты, выделенные из вод Балтики, депонированные во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (ВКПМ) с присвоенными номерами В-14243 и В-14244; (2) куриное перо бройлеров, полученное с промышленной линии ощипывания птицы на базе ГК «Черкизово» с массовой долей влаги 75 %, содержащее включения крови; (3) гидролизаты кератина, очищенные от бактериальной биомассы продуцента; (4) косметическая сыворотка для волос с гидролизатом кератина куриного пера.

Кератиназная активность, вырабатываемая на базальной питательной среде, составляла для штамма *B. licheniformis* БАЛ-1 — $16,2 \pm 0,3$ КА/см³, штамма *B. licheniformis* БАЛ-2 — $18,3 \pm 0,2$ КА/см³. Подробная информация о способности штаммов разрушать кератин пера описана в публикации Bethekhtin, K. E. et al., 2024. Согласно полученным результатам (Bethekhtin, K. E. et al., 2024), была идентифицирована смесь фрагментов а. п. 47–619 Keratin, type I cytoskeletal 9 (KRT9) и 46–549 Keratin, type II cytoskeletal 1 (KRT1) при ферментации куриного пера бройлеров штаммом БАЛ-1.

Для получения косметической сыворотки для волос с гидролизатом кератина куриного пера использовали следующие косметические ингредиенты: циклометикон (ООО Mendeleev.shop, Россия), диметикон (ООО «Джетта кемикал», Россия), каприлик (ООО «ХимфармПродукт», Россия), моностеарат глицерина (ООО «Химпитекторг групп», Россия), PEG-75 Lanolin flakes FD (ООО «Зельвар», Россия), полисорбат-20 (ООО «Русхим», Россия), пликватриум-7 (ООО «Химпитекторг групп», Россия), Flocare ET 58 (ООО «Косметические решения», Россия), лимонная кислота (ООО «ХимПитекторг групп», Россия), гидролизат кератина (получен в лабораторных условиях кафедры биотехнологии и биоорганического синтеза ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ»), Д-пантенол (ООО «Джетта кемикал», Россия), отдушка (ООО «Оптовик», Россия), Euxyl PE 9010 (дистрибьютор Natur Free, Германия).

Оборудование

Культивирование штаммов осуществляли в шейкере-инкубаторе ES-20/60 (Biosan, Латвия). Для очистки культуральной жидкости использовали систему вакуумной фильтрации Corning 250 см³ с фильтрами PES и мембраной 0,22 мкм (Китай).

Для получения косметической сыворотки для волос и подтверждения её соответствия требованиям нормативной документации в части качества и безопасности было использовано следующее оборудование: весы лабораторные электронные M-ER 122ACFJR-150.005 LCD Accurate (M-ER, Южная Корея); магнитная мешалка с подогревом TAGLER Lab Technology (ООО «НПТ Таглер», Россия); погружной блендер Moulinex (Groupe SEB, Китай); pH-метр pH-150МИ (ООО «Измерительная техника», Россия); лабораторная центрифуга ОПН-8 (ОАО ТНК «Дастан», Россия); термостат электрический суховоздушный ТС-1/80 (Смоленское СКТБ СПУ, Россия), ротационный вискозиметр Brookfield Visco Basic Plus (Fungilab S.A., Испания), поверенное лабораторное оборудование аккредитованного испытательного лабораторного центра ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Москве» для исследования микробиологической безопасности косметической сыворотки; микроскоп Levenhuk 720B (Levenhuk, США) для микроскопирования при увеличении 40х, дерматоскоп Aramo Smart Wizard ASW-300 (Aram Huvis, Южная Корея) для трихоскопирования при линзе 200х.

Участники

Для определения эффективности косметической сыворотки с гидролизатом кератина куриного пера была

собрана женская фокус-группа. Все участницы были проинформированы о цели и задачах исследования и присоединились к нему добровольно. Подробная информация о составе фокус-группы приведена в Таблице 1.

Респонденты были отобраны таким образом, чтобы охватить разные возрастные группы целевой аудитории, активно использующей сыворотки для волос, а также представить различные типы волос и подходы к уходу за ними.

Методы и процедура исследования

В работе использовались утвержденные и специальные методы исследования.

Последовательность этапов настоящего исследования приведена в виде структурной схемы (Рисунок 1).

Процедура культивирования *B. licheniformis*

Состав базовой питательной среды и условия культивирования *B. licheniformis* соответствовали данным, представленным в паспорте штаммов.

Ферментация пера цыплят-бройлеров проводилась в колбе объемом 750 см³, содержащей 100 см³ модифицированной минерально-питательной среды с составом (г/дм³): КН₂РО₄ – 2; (NH₄)₂SO₄ – 2; MgSO₄·7H₂O – 0,125; NaCl – 0,5; FeSO₄·7H₂O – 0,002. Значение pH среды поддерживали на уровне 7,5, после чего добавляли 5 г измельченного пера. Штаммы *B. licheniformis* БАЛ-1

Таблица 1
Характеристика фокус-группы
Table 1
Characteristics of the Focus Group

Участник	Возраст, лет	Тип волос	Модификации волос	Термическая обработка	Частота использования средства (в неделю)
1	18	Сухие, пористые, вьющиеся	Отсутствует	После каждого мытья головы – плойка	2
2	21	Сухие, тонкие, прямые	Осветление, окрашивание	После каждого мытья головы – фен	3
3	26	Сухие тонкие с небольшой волной	Осветление, окрашивание	После каждого мытья головы – фен	2
4	28	Плотные, волнистые с жирной кожей головы	Отсутствует	Химическое выпрямление, окрашивание	2
5	61	Сухие, волнистые (присутствует седина)	Осветление, окрашивание	После каждого мытья головы – плойка	3

Рисунок 1
Структурная схема исследования
Figure 1
Study Flow Chart



и БАЛ-2 вводили в концентрации 1×10^7 КОЕ/см³. Процесс ферментации осуществляли в течение 72 ч при температуре 28 °С с постоянным перемешиванием. В ходе эксперимента варьировали условия культивирования: температуру — в диапазоне от 20 °С до 40 °С с шагом изменения около $2,0 \pm 1,0$ °С при постоянной скорости перемешивания 80 об/мин; скорость перемешивания — от 80 до 160 об/мин с шагом 20 об/мин; количество измельченного пера — от 5 до 20 г; внесение дополнительного источника азота (мочевины) — в диапазоне от 0 до 8 г (Bethekhtin et al., 2024).

Методика определения кератиназной активности

В объем 1 см³ реакционной буферной среды с суспензией кератина (1 см³) добавляли 1 см³ раствора фермента. Смесь инкубировали при 37 °С в течение 1 ч, после чего реакцию прекращали, добавляя 2 см³ 5%-го раствора трихлоруксусной кислоты (ТХУ), и проводили фильтрацию. За одну единицу кератиназной активности прини-

мали такое количество фермента, которое за 10 мин вызывало снижение оптической плотности на 0,01 при длине волны 280 нм (отношение проходящего к падающему свету) (Bethekhtin et al., 2024).

Методика повышения кератиназной активности

Для повышения кератиназной активности применяли такие методы, как изменение температуры культивирования от 28 °С до 40 °С, повышение скорости перемешивания в диапазоне от 90 до 160 об/мин, внесение дополнительного источника углерода, азота и белка.

Методика проведения биотестирования на культурах SPEV и MDBK

Культуры клеток выращивали при 37 °С в стерильных пластиковых культуральных флаконах объемом 50 см³. В каждый флакон вносили 2 см³ суспензии кле-

ток со снятого монослоя и доводили объем до 10 см³ модифицированной средой Dulbecco's Modified Eagle Medium (ДМЕМ). В среду ДМЕМ предварительно вносили 5–10 % сыворотки крупного рогатого скота (КРС). В каждый флакон вносили по 0,5 см³; 0,75 см³ и 1 см³ исследуемого образца. Биотестирование проводили согласно процедуре, описанной в патенте RU (11) 2 604 802(13) C1 (Klabukova D. L. et al., 2016). К выросшему монослою вносили тест-объект и инкубировали в течение 1 ч при 37 °С. По истечению указанного времени среду удаляли, промывали раствором Версена, вносили свежую питательную среду и инкубировали 24 ч при 37 °С.

Методика подсчета культуры клеток

Для снятия монослоя клетки промывали 2 см³ 0,02 %-м раствором Версена, распределяя раствор Версена по монослою, потом сливали. Затем вносили смесь 0,02 %-го раствора Версена и 0,25 %-го раствора трипсина в соотношении 3 : 1. Закрывали флакон, встряхивали горизонтальными движениями и помещали в термостат на 10 мин при 37 °С. После снятия монослоя инактивировали трипсин, добавляя среду ДМЕМ до 10 см³ (данное разведение учитывалось при последующем подсчете).

Далее отбирали 1 см³ суспензии стерильной одноразовой пипеткой в микроцентрифужные пробирки «Эппендорф». Добавляли пипеткой в пробирку 0,1 см³ 0,1 %-го раствора трипанового синего и тщательно перемешивали. Затем помещали каплю суспензии на край покровного стекла так, чтобы она заполнила камеру Горяева. Дважды проводили подсчет количества клеток в 15 больших квадратах. Концентрацию клеток в 1 см³ рассчитывали по формуле:

$$X = a \times 15 \times 1111 \times 1,1, \quad (1)$$

где a — количество жизнеспособных клеток в 15 квадратах;
15 — общее количество квадратов;
1111 — коэффициент, необходимый для определения концентрации в 1 см³;
1,1 — поправка на разведение красителем.

Разработка рецептуры косметической сыворотки и анализ её показателей качества и микробиологической безопасности

На этапе разработки рецептуры в первую очередь были подобраны косметические ингредиенты. Было определено, что основными действующими веществами в сыворотке будут силиконы и гидролизат кератина. Силиконы, воздействуя на чешуйки кутикулы волоса, образуют окклюзионный слой, препятствующий испарению влаги. Гидролизат кератина помогает восстановить структуру и эластичность волос, а также защищает пряди от естественной потери влаги, встраиваясь в поврежденные участки.

На основании расчета гидрофильно-липофильных балансов в качестве эмульгаторов были выбраны PEG-75, полисорбат 20 и моностеарат глицерина. Они характеризуются высокими увлажняющими свойствами, позволяют контролировать пенообразование, способствуют получению устойчивой эмульсии. В качестве загустителя был выбран Flocare благодаря хорошему растворению в воде и формированию прозрачной гелеобразной текстуры. Лимонная кислота выступала как регулятор pH среды, Эуксил — в роли консерванта.

Для увеличения эффективности средства в состав были введены поликватерниум-7, действующий как антистатик, увлажняющий агент и стайлер, Д-пантенол использовали для придания упругости волосам. В качестве органического эмоленга в состав сыворотки был введен каприлик.

Процедура разработки сыворотки для волос в лабораторных условиях включала: определение последовательности введения ингредиентов, подбор подходящих температурных условий, изучение изменения физико-химических и органолептических показателей при изменении массовых долей ингредиентов.

Для определения показателей качества готовой сыворотки для волос использовали следующие методы: органолептический анализ (ГОСТ 29188.0–2014¹); измерение водородного показателя потенциометрическим методом (ГОСТ 29188.2–2014²); оценку коллоидной и термостабильности (ГОСТ 29188.3–91³); определение динамической вязкости на вискозиметре Брукфильда.

¹ ГОСТ 29188.0-2014 (2019). Продукция парфюмерно-косметическая. Правила приемки, отбор проб, методы органолептических испытаний и испытаний по физико-химическим показателям. — М.: Стандартинформ.

² ГОСТ 29188.2-2014 (2019). Продукция парфюмерно-косметическая. Методы определения физико-химических показателей. — М.: Стандартинформ.

³ ГОСТ 29188.3-91 (1993). Изделия косметические. Методы определения стабильности эмульсии и воды. — М.: Стандартинформ.

Показатели микробиологической безопасности были установлены в соответствии с ТР ТС 009/2011⁴ и ГОСТ ISO 18416–2018⁵, ГОСТ ISO 21150–2018⁶, ГОСТ ISO 22717–2018⁷, ГОСТ ISO 22718–2018⁸, ГОСТ ISO 21149–2020⁹.

Исследование косметической
эффективности сыворотки с гидролизатом
кератина

Для определения положительного влияния сыворотки с гидролизатом кератина куриного пера на состояние и структуру волос была собрана женская фокус-группа. Респонденты использовали сыворотку в течение двух месяцев: после каждого мытья головы наносили её на влажные волосы, которые далее подвергались температурному воздействию при сушке и укладке.

О влиянии сыворотки с гидролизатом кератина на состояние и структуру волос судили на основании визуальной оценки, результатов микроскопирования и трихоскопирования волос до и после применения средства.

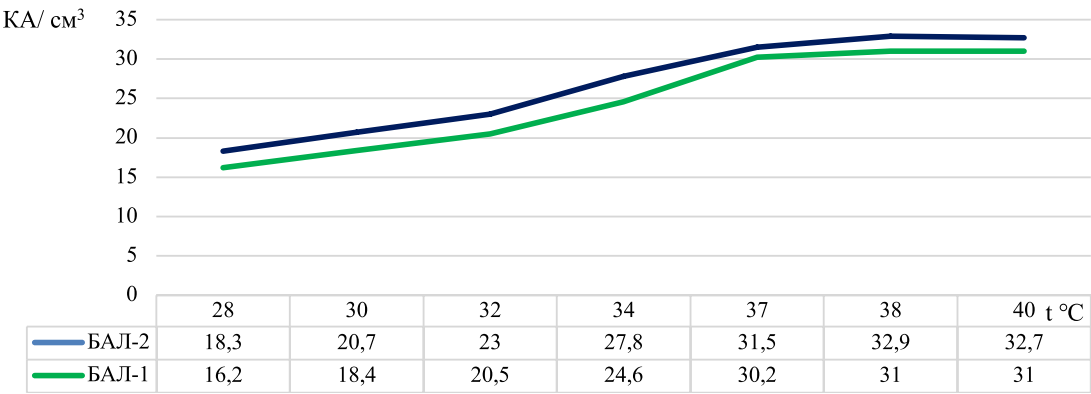
Анализ данных

Обработку экспериментальных данных проводили с помощью программы Excel с использованием функций: СРЗНАЧ – для расчета среднего значения выборки; СТАНДОТКЛОН – для определения стандартного отклонения выборки; СТЬЮДРАСПОБР – для нахождения коэффициента Стьюдента при $p = 0,95$, $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $n - 1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе исследовали влияние температуры, частоты перемешивания, концентрации пера и мочевины в среде для определения рациональных параметров культивирования и повышения кератиназной активности *B. licheniformis* БАЛ-1 и БАЛ-2. На Рисунках 2–5 приведены результаты ферментации при варьировании указанных параметров.

Рисунок 2
Влияние температурных режимов на кератиназную активность
Figure 2
The Effect of Temperature Conditions on Keratinase Activity



⁴ Технический регламент Таможенного союза 009/2011 «О безопасности парфюмерно-косметической продукции» (2023) // Решение Комиссии Таможенного союза от [дата принятия]. – М.

⁵ ГОСТ ISO 18416-2018 (2020). Продукция парфюмерно-косметическая. Микробиология. Обнаружение *Candida albicans*. – М.: Стандартинформ.

⁶ ГОСТ ISO 21150-2018 (2023). Продукция парфюмерно-косметическая. Методы испытаний ингредиентов и составов на микробиологическую стабильность. – М.: Стандартинформ.

⁷ ГОСТ ISO 22717-2018 (2023). Продукция парфюмерно-косметическая. Методы испытаний и оценки микробиологической безопасности продукции и компонентов упаковки. – М.: Стандартинформ.

⁸ ГОСТ ISO 22718-2018 (2023). Продукция парфюмерно-косметическая. Микробиология. Обнаружение и подсчет *Escherichia coli*. – М.: Стандартинформ.

⁹ ГОСТ ISO 21149-2020 (2021). Продукция парфюмерно-косметическая. Микробиология. Подсчет и обнаружение мезофильных аэробных бактерий. – М.: Стандартинформ.

Рисунок 3
Динамика изменения кератиназной активности в зависимости от частоты перемешивания среды

Figure 3
Dynamics of Changes in Keratinase Activity Depending on the Frequency of Medium Stirring

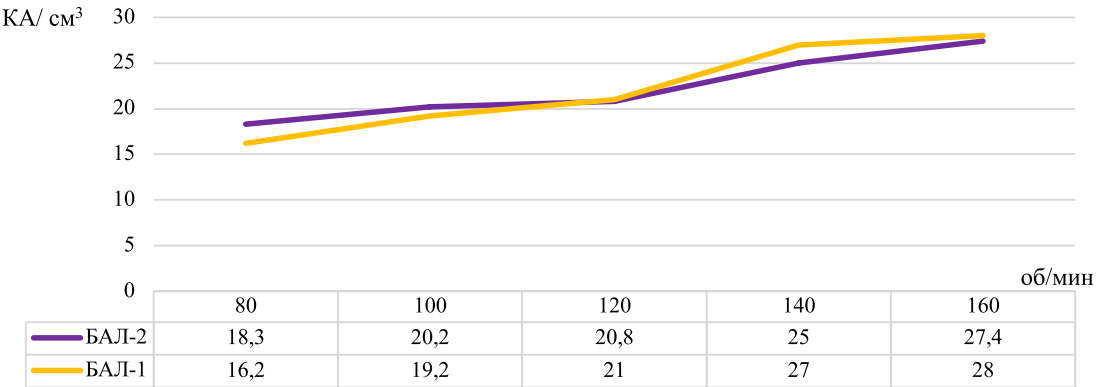


Рисунок 4
Влияние дозировки куриного пера в среде на изменение кератиназной активности

Figure 4
The Effect of Chicken Feather Dosage in the Medium on Changes in Keratinase Activity

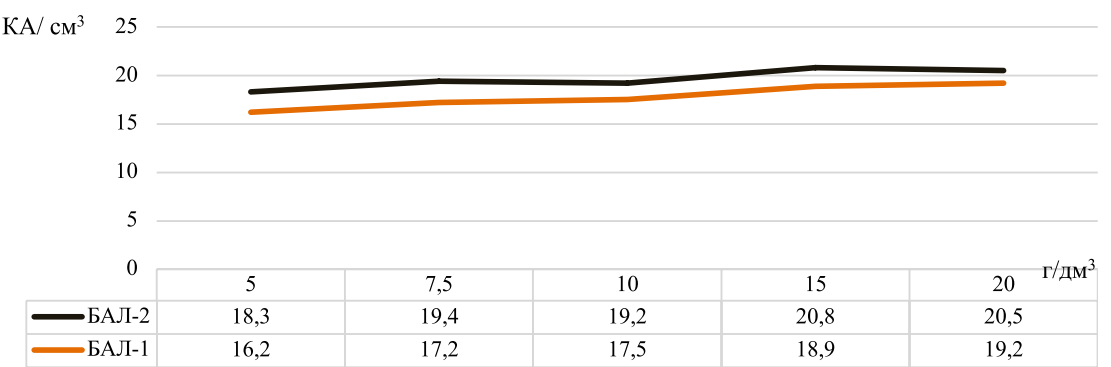
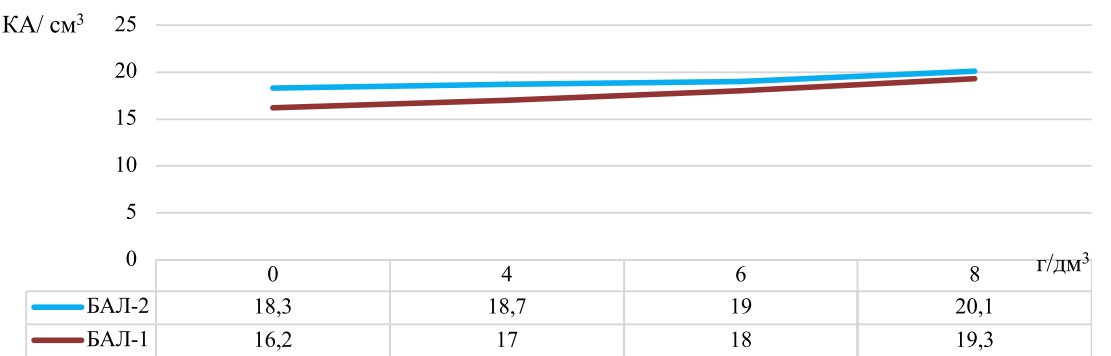


Рисунок 5
Влияние концентрации вносимой мочевины на кератиназную активность

Figure 5
The Effect of Applied Urea Concentration on Keratinase Activity



Далее штаммы *B. licheniformis* БАЛ-1 и БАЛ-2 культивировали при параметрах с максимальной кератиназной активностью: $t = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$, числе оборотов при перемешивании 160 об/мин, внесении измельченного пера до 15 г/дм³ и мочевины до 8 г/дм³. При указанных условиях кератиназная активность увеличилась в 2,4 раза по сравнению с первоначальной: у штамма БАЛ-1 – с 16,2 КА/см³ до 39 КА/см³, а у БАЛ-2 – с 18,3 КА/см³ до 44 КА/см³.

Полученную культуральную жидкость пропускали через ватно-марлевый тампон и фильтровали через систему

вакуумной фильтрации Corning 250 см³, полученный гидролиз кератина без остатков пера и биомассы продуцента использовался далее в экспериментах.

Для определения безопасности полученного гидролизата кератина провели биотестирование на культурах клеток SPEV и MDBK: в каждый монослой клеточной линии вносили по 0,5; 0,75 и 1 см³ гидролизата кератина. Результаты представлены на Рисунках 6 и 7.

Рисунок 6
Монослой клеточной, линии SPEV и MDBK после внесения проб гидролизата кератина (объектив 10×)

Figure 6
Monolayer of SPEV and MDBK Cell Lines after Addition of Keratin Hydrolysate Samples (10× objective)

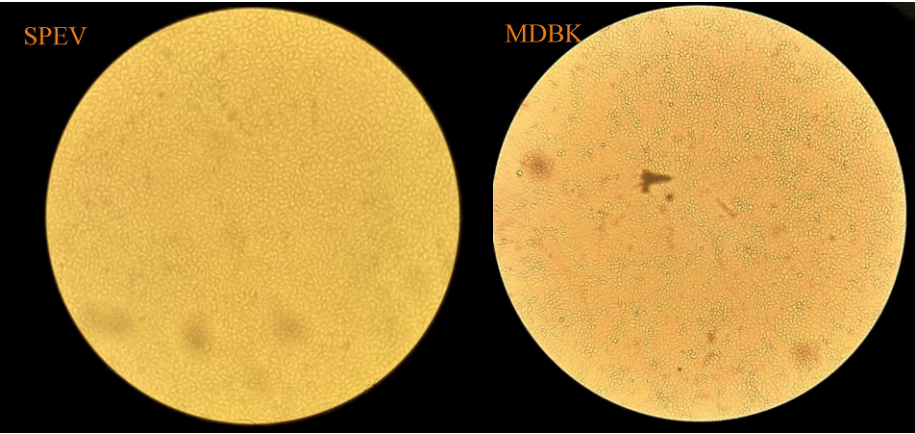
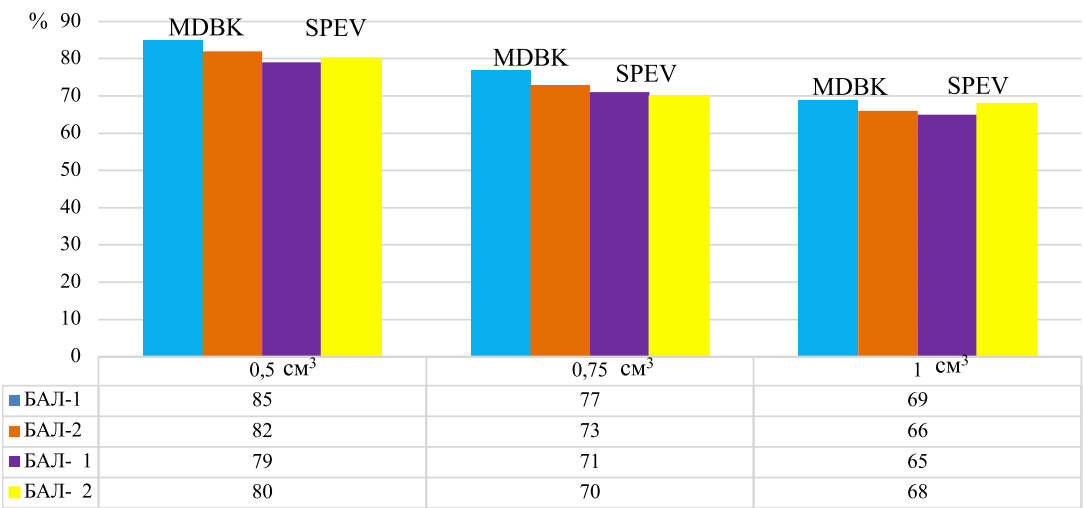


Рисунок 7
Содержание жизнеспособных клеток в культурах MDBK и SPEV после внесения проб гидролизата кератина в объеме 0,5; 0,75 и 1 см³, %

Figure 7
Viable Cell Content in MDBK and SPEV Cultures after Addition of Keratin Hydrolysate Samples in Volumes of 0.5, 0.75, and 1 cm³, %



Жизнеспособность культур MDBK и SPEV после внесения исследуемых образцов не снижалась ниже 65 %, что свидетельствует о безопасности гидролизата кератина.

Полученный гидролизат кератина использовался для составления лабораторных образцов сыворотки для волос. Гидролизат кератина, полученный путем расщепления кератина на более мелкие пептиды и аминокислоты, обладает рядом ценных свойств, которые делают его полезным ингредиентом в косметических средствах для волос. Благодаря небольшому размеру пептидов, гидролизат кератина легко проникает в кортекс волоса, укрепляя его изнутри.

В результате эмпирического подбора массовых долей косметических ингредиентов и оценки их влияния на качественные показатели сыворотки в лабораторных условиях была получена следующая рецептура (Таблица 2).

Таблица 2
Рецептура сыворотки для волос с гидролизатом кератина
Table 2
Hair Serum Formula with Hydrolyzed Keratin

Наименование косметического ингредиента	Массовая доля, %
Вода	80,25
Моностеарат глицерина	4,00
Гидролизат кератина	3,00
Диметикон	2,50
Циклометикон	2,00
Поликватерниум-7	2,00
Каприлик	1,50
Полисорбат-20	1,50
Д-пантенол	1,00
Отдушка	1,00
PEG 75 Lanolin flakes FD	0,50
Euxyl PE	0,50
Лимонная кислота	0,15
Flocare	0,10

Полученный образец сыворотки был исследован по основным показателям качества и микробиологической безопасности. Результаты представлены в Таблице 3.

Таблица 3
Показатели качества и микробиологической безопасности косметической сыворотки с гидролизатом кератина куриного пера
Table 3
Quality and Microbiological Safety Indicators of Cosmetic Serum with Hydrolyzed Chicken Feather Keratin

№ п/п	Наименование показателя	Результаты
<i>Органолептические показатели</i>		
1	Внешний вид	Свойственный сыворотке
2	Консистенция	Однородная, водянистая
3	Цвет	Молочно-белый, естественный
4	Запах	Приятный, ненавязчивый, в течении дня остается на волосах
<i>Физико-химические показатели</i>		
5	Водородный показатель pH	4,3 ± 1,2
6	Вязкость	25,6 ± 3,7
7	Коллоидная стабильность	Стабилен
8	Термостабильность	Стабилен
<i>Микробиологические показатели</i>		
9	<i>Candida albicans</i> , не допускается в 0,1 г (мл), г (мл)	не обнаружено в 0,1 г (мл)
10	<i>Escherichia coli</i> , не допускается в 0,1 г (мл), г (мл)	не обнаружено в 0,1 г (мл)
11	Бактерии вида <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , не допускается в 0,1 г (мл), г (мл)	не обнаружено в 0,1 г (мл)
12	Бактерии вида <i>Staphylococcus aureus</i> , не допускается в 0,1 г (мл), г (мл)	не обнаружено в 0,1 г (мл)
13	Общее количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов, КОЕ/г (мл)	менее 1,0 × 10 ¹

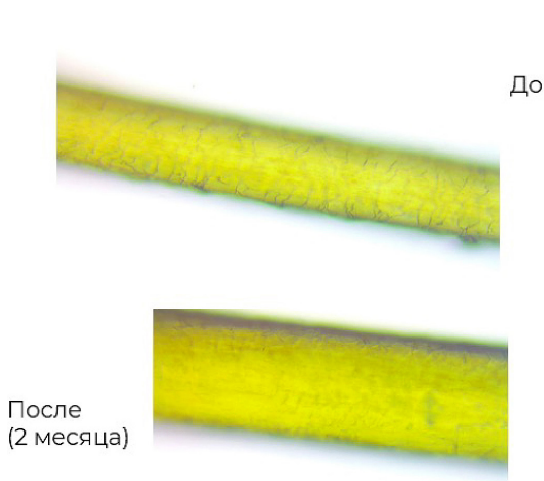
Далее полученную сыворотку в течение двух месяцев тестировала группа респондентов. Результаты применения сыворотки представлены на Рисунке 8.

Рисунок 8
Фотографии состояния волос участниц: исходное и после двух месяцев использования сыворотки с гидролизатом кератина
Figure 8
Photos of the Participants' Hair Condition: Initial and after Two Months of Using the Keratin Hydrolysate Serum



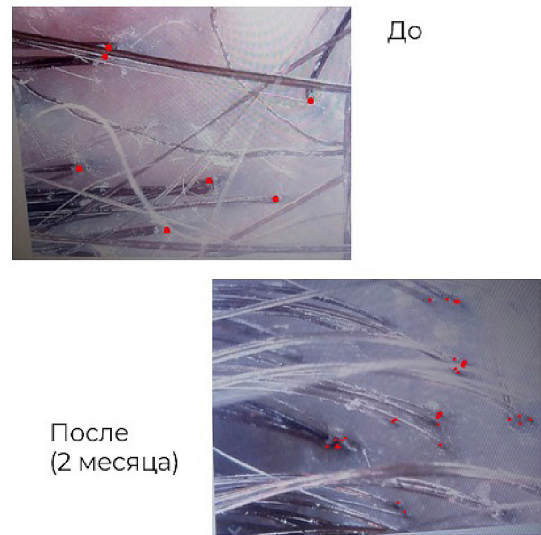
Только визуальная оценка не дает полного представления о влиянии гидролизата на структуру волос, поэтому была проведена диагностика с помощью микроскопа. Структура верхнего слоя волоса представлена чешуйками, которые при механическом воздействии приподнимаются, из-за чего волосы становятся пористыми, сухими и хрупкими. Степень связывания с волосами гидролизата кератина была оценена с помощью микроскопа Levenhuk 720B. Результат приведен на Рисунке 9.

Рисунок 9
Микроскопическое исследование волоса до и после двух месяцев использования сыворотки с гидролизатом кератина
Figure 9
Microscopic Examination of Hair before and after Two Months of Using a Serum with Hydrolyzed Keratin



Для общей оценки благоприятного влияния сыворотки с гидролизатом кератина куриного пера на состояние волос и кожи головы провели трихоскопию (Рисунок 10).

Рисунок 10
Трихоскопия Aramo Smart Wizard ASW-300 при линзе 200x
Figure 10
Aramo Smart Wizard ASW-300 Trichoscopy with a 200x Lens



ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе была создана минерально-питательная среда, обеспечивающая высокую кератиназную активность штаммов *Bacillus licheniformis*. Для приготовления 100 см³ среды использовали следующие компоненты (г/дм³): KН₂РO₄ — 2; (NН₄)₂SO₄ — 2; MgSO₄·7Н₂O — 0,125; NaCl — 0,5; CO(NH₂)₂ — 8; FeSO₄·7Н₂O — 0,002. Значение pH-среды регулировали до 7,5, после чего добавляли 15 г/дм³ измельченного пера. Штаммы *B. licheniformis* БАЛ-1 и БАЛ-2 вводили в концентрации 1×10⁷ КОЕ/см³. Ферментацию пера проводили при температуре 37 °С в течение 72 ч с постоянным перемешиванием при скорости вращения мешалки 160 об/мин.

Полученные данные соответствуют сведениям из литературы. Так, в исследовании (Fakhfakh et al., 2009) был выделен микроорганизм, способный разлагать перья, из загрязненной реки и идентифицирован как *Bacillus licheniformis* RPK. Этот изолят проявил высокую активность протеаз при культивировании на среде с куриным пером. В ходе выращивания наблюдалась полная деградация перьев. Максимальная протеазная активность (4150 Ед/см³ при использовании казеина и 37,35 Ед/см³ при применении кератина в качестве субстрата) была достигнута при культивировании штамма на среде, содержащей 7,5 г/дм³ куриных перьев; 2 г/дм³ дрожжевого экстракта; 0,5 г/дм³ NaCl; 0,1 г/дм³ MgSO₄·7Н₂O; 0,7 г/дм³ KН₂РO₄ и 1,4 г/дм³ K₂НРО₄, при температуре 37 °С в течение 48 ч. Однако в данной работе применяли более высокую скорость перемешивания (200 об/мин) и дополнительный источник азота (дрожжевой экстракт), что повлияло на кератиназную активность.

Другой штамм *B. licheniformis*, описанный в работе Abdel-Fattah (Abdel-Fattah et al., 2018), показал увеличение продукции кератиназы в 2,9 раза (до 72 Е/мл) после оптимизации состава среды, включающей источники углерода (глюкоза, галактоза), азота (кукурузный экстракт, мочевины), и физико-химических параметров (pH 6, температура 42 °С). В нашем исследовании также использовались мочевины и сульфат аммония в качестве источников азота, однако концентрации и условия культивирования отличались, что могло повлиять на эффективность ферментации.

Таким образом, разработанная нами среда обеспечивает эффективное культивирование *B. licheniformis* с высокой кератиназной активностью, что подтверждается сравнением с литературными данными. Дальнейшая

оптимизация, включая варьирование источников углерода и азота, а также параметров ферментации (температура, pH, аэрация), может способствовать увеличению выхода фермента.

Полученные нами гидролизаты кератина прошли биотестирование. Жизнеспособность культур MDBK и SPEV после внесения исследуемых образцов в монослой составила 65–85 %, что свидетельствует о безопасности гидролизата кератина при использовании данных клеточных линий. Принципиальная возможность применения клеточной линии ЛЭЧ при оценке относительной токсичности готовых кремовых композиций была апробирована Дециной А. М. и Мартынец Л. Д. (Decina, A. N. et al., 2002). Предварительные данные указывают на достаточную чувствительность метода вне зависимости от типа кремовой основы, используемой разработчиками.

На основе полученного гидролизата кератина была разработана рецептура косметической сыворотки для волос. В лабораторных условиях приготовили серии образцов сыворотки и оценили их качественные показатели. В результате были определены рациональные массовые доли косметических ингредиентов, включая: моностеарат глицерина — 4,0 %; гидролизат кератина — 3,0 %; диметикон — 2,5 %; циклометикон — 2,0 %; поликватерниум-7 — 2,0 %; каприлик — 1,5 %; полисорбат-20 — 1,5 %; Д-пантенол — 1,0 %; отдушка — 1,0 %; PEG 75 — 0,5 %; Эуксил — 0,5 %; лимонная кислота 0,15 %; Floccare — 0,1 %; вода очищенная до 100 %. Полученная сыворотка отвечала всем требованиям нормативной документации по показателям качества и микробиологической безопасности (ТР ТС 009/2011 и ГОСТ 31460-2012¹⁰).

Разработанный состав косметической сыворотки сопоставим с другим ранее разработанными формулами эмульсионных средств с гидролизатами кератина. В работе Pavel Mokrejš и соавторов представлена косметическая эмульсионная мазь с гидролизатом кератина из куриных перьев, содержащая воду, парафин, вазелиновое масло, цетеариловый спирт, лаурет-4, гидроксид натрия, карбомер, метилпарабен, пропилпарабен (Mokrejš, P. et al., 2018). В другой работе, Eser Eke BayraMoglu и соавторов, была разработана эмульсионная формула, содержащая экстракт календулы, цетеариловый спирт, изопропилмиристан, гидролизат кератина из козьей шерсти, буру, ланолин, Твин 60, глицерин, пчелиный воск (BayraMoglu E. E. et al., 2014). Принципиальное отличие данной рецептуры от нашей — это тип эмульсии. В работе Eser Eke BayraMoglu получена обратная эмульсия (BayraMoglu E. E. et al., 2014). Данный факт в последующем позволит разработать линейки косметических продуктов различного функционала.

¹⁰ ГОСТ 31460-2012 (2019). Кремы косметические. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ.

В ходе исследования (фокус-группы) косметической эффективности сыворотки с гидролизатом кератина методом было установлено, что волосы у респондентов стали более гладкими, упругими, блестящими и легче поддавались укладке. Все участники исследования остались довольны результатом и выразили заинтересованность в регулярном использовании разработанной сыворотки.

Исходя из того, что визуальная оценка состояния волос носит субъективный характер, для подтверждения эффективности сыворотки провели микроскопирование волос до и после применения средства. На Рисунке 9 представлены волосы респондента под номером 1, так как именно на натуральных кудрявых сухих волосах эффект от применения сыворотки был наиболее явным. На Рисунке 9 (до) заметны микротрещины между чешуйками и шероховатая поверхность стержня волоса. На Рисунке 9 (после) показан снимок волос после использования сыворотки (в течение 2 месяцев). Видно, что микротрещины заполнены. Можно сделать вывод, что в составе гидролизата кератина присутствуют серосодержащие пептиды. Кератиназы *B. licheniformis*, обладая широкой субстратной специфичностью, гидролизуют пептидные связи вблизи различных аминокислотных остатков. Точные сайты расщепления зависят от конкретной кератиназы и ее аминокислотной последовательности. Однако ключевым фактором, определяющим способность кератиназ к гидролизу кератина, является их способность расщеплять дисульфидные связи. Данный результат соотносится с проведенными ранее исследованиями. В исследовании (Fernandes et al., 2012) одновременное применение протеиндисульфидизомеразы (PDI) успешно способствовало ковалентному прикреплению цистеинсодержащих пептидов, полученных из кератина, к обесцвеченным волосам. В работе (Barba et al., 2010) химическая реактивность остатков цистеина в кератине по отношению к волосам была улучшена за счет предупреждения их от окисления с помощью тиоловой защиты во время окислительного сульфитолиза с образованием S-сульфированного производного.

На основании данных трихоскопии было установлено, что общее состояние кожи волосистой части головы хорошее. По результатам, представленным на Рисунке 10, видно, что через два месяца применения сыворотки с гидролизатом кератина количество активных волосных фолликулов увеличилось практически в 3 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что косметическая сыворотка с гидролизатом кератина (полученным из куриных перьев путем ферментации *B. licheniformis*) оказывает благоприятное воздействие на состояние волос и кожи головы. Респонденты указали, что средство с поставленными задачами справляется. Микроскопия и трихоскопия показали, что сыворотка воздействует как на внешние, так и на внутренние системы волоса.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение биологически активных пептидов в перьевом гидролизате и оценку их вклада в повышение эффективности косметической сыворотки для волос.

ВКЛАД АВТОРОВ

Бетехтин К.Э.: осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных/ доказательств, создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Вольнова Е.Р.: формулирование идеи исследования, целей и задач, административное управление планированием и проведением исследования, создание и подготовка результатов исследования: визуализация результатов исследования и полученных данных, создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

Розанцева Л.Э.: создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

Машенцева Н.Г.: научное руководство, формулирование идеи исследования, целей и задач, административное управление планированием и проведением исследования, создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Betekhtin K.E.: conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection, preparation, creation and/or presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation)

Volnova E.R.: formulation or evolution of overarching research goals and aims, management and coordination responsibility for the research activity planning and execution, preparation, creation and/or presentation of the published work, specifically visualization/data presentation, preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically

critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

Rozantseva L.E.: preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision - including pre- or post-publication stages.

Mashentseva N.G.: supervision, formulation or evolution of overarching research goals and aims, management and coordination responsibility for the research activity planning and execution, preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision - including pre- or post-publication stages

ЛИТЕРАТУРА

- Бетехтин, К. Э., Сазонова, О. И., Соколов, С. Л., Ковалев, Л. И., Ковалева, М. А., Машенцева, Н. Г., & Неретина, А. Н. (2024). Новые штаммы *Bacillus licheniformis*, их идентификация и ферментативная активность при переработке пера в кормовую добавку. *Сельскохозяйственная биология*, 59 (2), 385-406. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.2.385rus>
- Abdel-Fattah, A. M., El-Gamal, M. S., Ismail, S. A., Emran, M. A., & Hashem, A. M. (2018). Biodegradation of feather waste by keratinase produced from newly isolated *Bacillus licheniformis* ALW1. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 16(2), 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.05.005>
- Allpress, J. D., Mountain, G., & Gowland, P. C. (2002). Production, purification and characterization of an extracellular keratinase from *Lysobacter* NCIMB 9497. *Letters in Applied Microbiology*, 34(4), 337-342. <https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.2002.01093.x>
- Altman, G. H., Diaz, F., Jakuba, C., Calabro, T., Horan, R. L., Chen, J., Lu, H., Richmond, J., & Kaplan, D. L. (2003). Silk-based biomaterials. *Biomaterials*, 24(3), 401-416. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00353-8](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00353-8)
- Anbu, P., Gopinath, S. C. B., Hilda, A., Priya, T. L., & Annadurai, G. (2005). Purification of keratinase from poultry farm isolate—*Scopulariopsis brevicaulis* and statistical optimization of enzyme activity. *Enzyme and Microbial Technology*, 36(5), 639-647. <https://doi.org/10.1016/j.enzmtec.2004.07.019>
- Anitha, T. S., & Palanivelu, P. (2013). Purification and characterization of an extracellular keratinolytic protease from a new isolate of *Aspergillus parasiticus*. *Protein Expression and Purification*, 88(2), 214-220. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2013.01.007>
- Balaji, S., Kumar, M. S., Karthikeyan, R., Kumar, R., Kirubanandan, S., Sridhar, R., & Sehgal, P. K. (2008). Purification and characterization of an extracellular keratinase from a hornmeal-degrading *Bacillus subtilis* MTCC (9102). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24(11), 2741-2745. <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9782-7>
- Barba, C., Martí, M., Manich, A. M., Carilla, J., Parra, J. L., & Coderch, L. (2010). Effect of wool keratin proteins and peptides on hair water sorption kinetics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 102(1), 43-48. <https://doi.org/10.1007/s10973-010-0936-0>
- Bayramoglu, E. E., Yorgancioglu, A., Yeldiyar, G., & Onem, E. (2014). Extraction of keratin from unhairing wastes of goat skin and creating new emulsion formulations containing keratin and calendula flower (*Calendula officinalis* L.). *Journal of the American Leather Chemists Association*, 109(13), 49-55.
- Bhari, R., Kaur, M., & Singh, R. S. (2019). Thermostable and halotolerant keratinase from *Bacillus aerius* NSMk2 with remarkable dehairing and laundry applications. *Journal of Basic Microbiology*, 59(6), 555-568. <https://doi.org/10.1002/jobm.201900001>
- Bhavsar, P., Zoccola, M., Patrucco, A., Montarsolo, A., Mossotti, R., Rovero, G., Giansetti, M., & Tonin, C. (2016). Superheated Water Hydrolysis of Waste Wool in a Semi-Industrial Reactor to Obtain Nitrogen Fertilizers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(12), 6722-6731. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01664>

- Bloch, L. D., Goshiyama, A. M., Dario, M. F., Escudeiro, C. C., Sarruf, F. D., Velasco, M. V. R., & Baby, A. R. (2019). Chemical and physical treatments damage Caucasian and Afro-ethnic hair fiber: analytical and image assays. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 33(11), 2158-2167. <https://doi.org/10.1111/jdv.15761>
- Hatsbach de Paula, J. N., Basilio, F. M. A., & Mulinari-Brenner, F. A. (2022). Effects of chemical straighteners on the hair shaft and scalp. *Anais Brasileiros de Dermatologia*, 97(2), 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.abd.2021.02.010>
- Bodde, S., Meyers, M., & McKittrick, J. (2011). Correlation of the mechanical and structural properties of cortical rachis keratin of rectrices of the Toco Toucan (*Ramphastos toco*). *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 4(5), 723-732. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.01.010>
- Bradbury, J. H. (1973). The structure and chemistry of keratin fibers. *Advances in Protein Chemistry*, 27, 111-211. [https://doi.org/10.1016/S0065-3233\(08\)60447-7](https://doi.org/10.1016/S0065-3233(08)60447-7)
- Chilakamarry, C. R., Mahmood, S., Saffe, S. N. B. M., Arifin, M. A. B., Gupta, A., Sikkandar, M. Y., Begum, S. S., & Narasaiah, B. (2021). Extraction and application of keratin from natural resources: A review. *3 Biotech*, 11(5), 220. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02734-7>
- Coulombe, P. A., & Omary, M. B. (2002). «Hard» and «soft» principles defining the structure, function and regulation of keratin intermediate filaments. *Current Opinion in Cell Biology*, 14(1), 110-122. [https://doi.org/10.1016/S0955-0674\(01\)00301-5](https://doi.org/10.1016/S0955-0674(01)00301-5)
- Cruz, C. F., Martins, M., Egipto, J., Osório, H., Ribeiro, A., & Cavaco-Paulo, A. (2017). Peptide-protein interactions within human hair keratins. *International Journal of Biological Macromolecules*, 101, 805-814. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.190>
- Deb-Choudhury, S., Plowman, J. E., Harland, D. P., & Clerens, S. (2016). Isolation and analysis of keratins and keratin-associated proteins from hair and wool. *Methods in Enzymology*, 568, 279-301. <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2015.09.024>
- Децина, А. Н., & Мартынец, Л. Д. (2002). Выбор клеточной тест-системы для оценки сырья в производстве косметических и некоторых лекарственных средств. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, (5-6), 66-69.
- Fakhfakh, N., Kanoun, S., Manni, L., & Nasri, M. (2009). Production and biochemical and molecular characterization of a keratinolytic serine protease from chicken feather-degrading *Bacillus licheniformis* RPK. *Canadian Journal of Microbiology*, 55(4), 427-436. <https://doi.org/10.1139/W08-142>
- Fernandes, M., & Cavaco-Paulo, A. (2012). Protein disulphide isomerase-mediated grafting of cysteine-containing peptides onto over-bleached hair. *Biocatalysis and Biotransformation*, 30(1), 10-19. <https://doi.org/10.3109/10242422.2012.644435>
- Fraser, R. D. B., & Parry, D. A. D. (2008). Molecular packing in the feather keratin filament. *Journal of Structural Biology*, 162(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2008.01.011>
- Gupta, R., Sharma, R., & Beg, Q. K. (2013). Revisiting microbial keratinases: Next generation proteases for sustainable biotechnology. *Critical Reviews in Biotechnology*, 33(2), 216-228. <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.685051>
- He, Z., Sun, R., Tang, Z., Bu, T., Wu, Q., Li, C., & Li, Z. (2018). Biodegradation of feather waste keratin by the keratin-degrading strain *Bacillus subtilis* 8. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(2), 314-322. <https://doi.org/10.4014/jmb.1708.08077>
- Ji, Y., Chen, J., Lv, J., Li, Z., Xing, L., & Ding, S. (2014). Extraction of keratin with ionic liquids from poultry feather. *Separation and Purification Technology*, 132, 577-583. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.06.009>
- Klabukova, D. L., Mashentseva, N. G., Nikonov, I. N., Fisinin, V. I., Chebotareva, S. E., & Chebotarev, I. I. (2016). Способ определения безопасности пищевых ингредиентов с помощью клеточных тест-систем [Method for determining the safety of food ingredients using cellular test systems] (Patent No. RU 2604802C1). *Russian Agency for Patents and Trademarks*. <https://new.fips.ru/>
- Korniłowicz-Kowalska, T., & Bohacz, J. (2011). Biodegradation of keratin waste: Theory and practical aspects. *Waste Management*, 31(8), 1689-1701. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.024>
- Lange, L., Huang, Y., & Busk, P. K. (2016). Microbial decomposition of keratin in nature—a new hypothesis of industrial relevance. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(5), 2083-2096. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-7262-1>
- Lechner, C., Steinbring, C., Baus, R. A., Baecker, D., Gust, R., & Bernkop-Schnürch, A. (2019). Reactive keratin derivatives: A promising strategy for covalent binding to hair. *Journal of Colloid and Interface Science*, 534, 533-541. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.09.057>

- Liu, Y., Liu, J., & Xiao, J. (2023). Enzymatic crosslinking of amino acids improves the repair effect of keratin on hair fibre. *Polymers*, 15(9), 2210. <https://doi.org/10.3390/polym15092210>
- Malinauskyte, E., Shrestha, R., Cornwell, P. A., Gourion-Arsiquaud, S., & Hindley, M. (2021). Penetration of different molecular weight hydrolyzed keratins into hair fibers and their effects on the physical properties of textured hair. *International Journal of Cosmetic Science*, 43(1), 26-37. <https://doi.org/10.1111/ics.12672>
- Meyers, M. A., Chen, P.-Y., Lin, A. Y.-M., & Seki, Y. (2008). Biological materials: Structure and mechanical properties. *Progress in Materials Science*, 53(1), 1-206. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2007.05.004>
- Mohamed, J. M. M., Alqahtani, A., Al Fatease, A., Alqahtani, T., Khan, B. A., Ashmitha, B., & Vijaya, R. (2021). Human hair keratin composite scaffold: characterisation and biocompatibility study on NIH 3T3 fibroblast cells. *Pharmaceuticals*, 14(8), 781. <https://doi.org/10.3390/ph14080781>
- Mokrejš, P., Pavlačková, J., Janáčová, D., & Huťta, M. (2018). Hydration and barrier properties of emulsions with the addition of keratin hydrolysate. *Cosmetics*, 5(4), 64. <https://doi.org/10.3390/cosmetics5040064>
- Pawar, V. A., Prajapati, A. S., Akhani, R. C., Patel, D. H., & Subramanian, R. B. (2018). Molecular and biochemical characterization of a thermostable keratinase from *Bacillus altitudinis* RBDV1. *3 Biotech*, 8(2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1130-5>
- Savaides, A., & Tasker, R. (2014). Formulations and methods for straightening and revitalizing hair (U.S. Patent No. US2014/0261518A1). U.S. Patent and Trademark Office.
- Sinkiewicz, I., Staroszczyk, H., & Śliwińska, A. (2018). Solubilization of keratins and functional properties of their isolates and hydrolysates. *Journal of Food Biochemistry*, 42(2), e12494. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12494>
- Tasaki, K. (2020). A novel thermal hydrolysis process for extraction of keratin from hog hair for commercial applications. *Waste Management*, 104, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.011>
- Tinoco, A., Gonçalves, D., Silva, C., Loureiro, A., Dias, M., & Cavaco-Paulo, A. (2021). Keratin:Zein particles as vehicles for fragrance release on hair. *Industrial Crops and Products*, 159, 113067. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113067>
- Wan, M.-Y., Dong, G., Yang, B.-Q., & Feng, H. (2016). Identification and characterization of a novel antioxidant peptide from feather keratin hydrolysates. *Biotechnology Letters*, 38(4), 643-649. <https://doi.org/10.1007/s10529-015-2016-9>
- Wang, B., Yang, W., McKittrick, J., & Meyers, M. A. (2016). Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration. *Progress in Materials Science*, 76, 229-318. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.06.001>
- Xiao, X. L., Hu, J. L., Gui, X. T., & Qian, K. (2017). Shape memory investigation of alpha-keratin fibers as multi-coupled stimuli of responsive smart materials. *Polymers*, 9(3), 87. <https://doi.org/10.3390/polym9030087>
- Yang, Y., & Reddy, N. (2013). Utilizing discarded plastic bags as matrix material for composites reinforced with chicken feathers. *Journal of Applied Polymer Science*, 130(1), 307-312. <https://doi.org/10.1002/app.39173>

REFERENCES

- Abdel-Fattah, A. M., El-Gamal, M. S., Ismail, S. A., Emran, M. A., & Hashem, A. M. (2018). Biodegradation of feather waste by keratinase produced from newly isolated *Bacillus licheniformis* ALW1. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 16(2), 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.05.005>
- Allpress, J. D., Mountain, G., & Gowland, P. C. (2002). Production, purification and characterization of an extracellular keratinase from *Lysobacter* NCIMB 9497. *Letters in Applied Microbiology*, 34(4), 337-342. <https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.2002.01093.x>
- Altman, G. H., Diaz, F., Jakuba, C., Calabro, T., Horan, R. L., Chen, J., Lu, H., Richmond, J., & Kaplan, D. L. (2003). Silk-based biomaterials. *Biomaterials*, 24(3), 401-416. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00353-8](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00353-8)
- Anbu, P., Gopinath, S. C. B., Hilda, A., Priya, T. L., & Annadurai, G. (2005). Purification of keratinase from poultry farm isolate—*Scopulariopsis brevicaulis* and statistical optimization of enzyme activity. *Enzyme and Microbial Technology*, 36(5), 639-647. <https://doi.org/10.1016/j.enzmtec.2004.07.019>
- Anitha, T. S., & Palanivelu, P. (2013). Purification and characterization of an extracellular keratinolytic protease from a new isolate of *Aspergillus parasiticus*. *Protein Expression and Purification*, 88(2), 214-220. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2013.01.007>

- Balaji, S., Kumar, M. S., Karthikeyan, R., Kumar, R., Kirubanandan, S., Sridhar, R., & Sehgal, P. K. (2008). Purification and characterization of an extracellular keratinase from a hornmeal-degrading *Bacillus subtilis* MTCC (9102). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24(11), 2741–2745. <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9782-7>
- Barba, C., Martí, M., Manich, A. M., Carilla, J., Parra, J. L., & Coderch, L. (2010). Effect of wool keratin proteins and peptides on hair water sorption kinetics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 102(1), 43–48. <https://doi.org/10.1007/s10973-010-0936-0>
- Bayramoglu, E. E., Yorgancioglu, A., Yeldiyar, G., & Onem, E. (2014). Extraction of keratin from unhairing wastes of goat skin and creating new emulsion formulations containing keratin and calendula flower (*Calendula officinalis* L.). *Journal of the American Leather Chemists Association*, 109(13), 49–55.
- Betekhtin, K. E., Sazonova, O. I., Sokolov, S. L., Kovalev, L. I., Kovaleva, M. A., Mashentseva, N. G., & Neretina, A. N. (2024). New strains of *Bacillus licheniformis*, their identification and enzymatic activity in the processing of feathers into a feed additive. *Agricultural Biology*, 59(2), 385–406. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2024.2.385rus>. (In Russian)
- Bhari, R., Kaur, M., & Singh, R. S. (2019). Thermostable and halotolerant keratinase from *Bacillus aerius* NSMk2 with remarkable dehairing and laundry applications. *Journal of Basic Microbiology*, 59(6), 555–568. <https://doi.org/10.1002/jobm.201900001>
- Bhavsar, P., Zoccola, M., Patrucco, A., Montarsolo, A., Mossotti, R., Rovero, G., Giansetti, M., & Tonin, C. (2016). Superheated Water Hydrolysis of Waste Wool in a Semi-Industrial Reactor to Obtain Nitrogen Fertilizers. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(12), 6722–6731. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01664>
- Bloch, L. D., Goshiyama, A. M., Dario, M. F., Escudeiro, C. C., Sarruf, F. D., Velasco, M. V. R., & Baby, A. R. (2019). Chemical and physical treatments damage Caucasian and Afro-ethnic hair fiber: analytical and image assays. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 33(11), 2158–2167. <https://doi.org/10.1111/jdv.15761>
- Hatsbach de Paula, J. N., Basilio, F. M. A., & Mulinari-Brenner, F. A. (2022). Effects of chemical straighteners on the hair shaft and scalp. *Anais Brasileiros de Dermatologia*, 97(2), 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.abd.2021.02.010>
- Bodde, S., Meyers, M., & McKittrick, J. (2011). Correlation of the mechanical and structural properties of cortical rachis keratin of rectrices of the Toco Toucan (*Ramphastos toco*). *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 4(5), 723–732. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.01.010>
- Bradbury, J. H. (1973). The structure and chemistry of keratin fibers. *Advances in Protein Chemistry*, 27, 111–211. [https://doi.org/10.1016/S0065-3233\(08\)60447-7](https://doi.org/10.1016/S0065-3233(08)60447-7)
- Chilakamarry, C. R., Mahmood, S., Saffe, S. N. B. M., Arifin, M. A. B., Gupta, A., Sikkandar, M. Y., Begum, S. S., & Narasaiah, B. (2021). Extraction and application of keratin from natural resources: A review. *3 Biotech*, 11 (5), 220. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02734-7>
- Coulombe, P. A., & Omary, M. B. (2002). «Hard» and «soft» principles defining the structure, function and regulation of keratin intermediate filaments. *Current Opinion in Cell Biology*, 14(1), 110–122. [https://doi.org/10.1016/S0955-0674\(01\)00301-5](https://doi.org/10.1016/S0955-0674(01)00301-5)
- Cruz, C. F., Martins, M., Egipto, J., Osório, H., Ribeiro, A., & Cavaco-Paulo, A. (2017). Peptide-protein interactions within human hair keratins. *International Journal of Biological Macromolecules*, 101, 805–814. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.190>
- Deb-Choudhury, S., Plowman, J. E., Harland, D. P., & Clerens, S. (2016). Isolation and analysis of keratins and keratin-associated proteins from hair and wool. *Methods in Enzymology*, 568, 279–301. <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2015.09.024>
- Decina, A. N., & Martynets, L. D. (2002). Vybór kletочноy test-sistemy dlya otsenki syr'ya v proizvodstve kosmeticheskikh i nekotorykh lekarstvennykh sredstv [The choice of a cellular test system for the evaluation of raw materials in the production of cosmetics and some medicinal products]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Pishchevaya Tekhnologiya* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Food Technology], (5–6), 66–69.
- Fakhfakh, N., Kanoun, S., Manni, L., & Nasri, M. (2009). Production and biochemical and molecular characterization of a keratinolytic serine protease from chicken feather-degrading *Bacillus licheniformis* RPK. *Canadian Journal of Microbiology*, 55(4), 427–436. <https://doi.org/10.1139/W08-142>
- Fernandes, M., & Cavaco-Paulo, A. (2012). Protein disulphide isomerase-mediated grafting of cysteine-containing peptides onto over-bleached hair. *Biocatalysis and Biotransformation*, 30(1), 10–19. <https://doi.org/10.3109/10242422.2012.644435>
- Fraser, R. D. B., & Parry, D. A. D. (2008). Molecular packing in the feather keratin filament. *Journal of Structural Biology*, 162(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2008.01.011>

- Gupta, R., Sharma, R., & Beg, Q. K. (2013). Revisiting microbial keratinases: Next generation proteases for sustainable biotechnology. *Critical Reviews in Biotechnology*, 33(2), 216-228. <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.685051>
- He, Z., Sun, R., Tang, Z., Bu, T., Wu, Q., Li, C., & Li, Z. (2018). Biodegradation of feather waste keratin by the keratin-degrading strain *Bacillus subtilis* 8. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(2), 314-322. <https://doi.org/10.4014/jmb.1708.08077>
- Ji, Y., Chen, J., Lv, J., Li, Z., Xing, L., & Ding, S. (2014). Extraction of keratin with ionic liquids from poultry feather. *Separation and Purification Technology*, 132, 577-583. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.06.009>
- Klabukova, D. L., Mashentseva, N. G., Nikonov, I. N., Fisinin, V. I., Chebotareva, S. E., & Chebotarev, I. I. (2016). *Sposob opredeleniya bezopasnosti pishchevykh ingredientov s pomoshch'yu kletochnykh test-sistem* [Method for determining the safety of food ingredients using cellular test systems] (Patent No. RU 2604802C1). Russian Agency for Patents and Trademarks. <https://new.fips.ru/>
- Korniłowicz-Kowalska, T., & Bohacz, J. (2011). Biodegradation of keratin waste: Theory and practical aspects. *Waste Management*, 31(8), 1689-1701. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.024>
- Lange, L., Huang, Y., & Busk, P. K. (2016). Microbial decomposition of keratin in nature—a new hypothesis of industrial relevance. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(5), 2083-2096. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-7262-1>
- Leichner, C., Steinbring, C., Baus, R. A., Baecker, D., Gust, R., & Bernkop-Schnürch, A. (2019). Reactive keratin derivatives: A promising strategy for covalent binding to hair. *Journal of Colloid and Interface Science*, 534, 533-541. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.09.057>
- Liu, Y., Liu, J., & Xiao, J. (2023). Enzymatic crosslinking of amino acids improves the repair effect of keratin on hair fibre. *Polymers*, 15(9), 2210. <https://doi.org/10.3390/polym15092210>
- Malinauskite, E., Shrestha, R., Cornwell, P. A., Gourion-Arsiquaud, S., & Hindley, M. (2021). Penetration of different molecular weight hydrolyzed keratins into hair fibers and their effects on the physical properties of textured hair. *International Journal of Cosmetic Science*, 43(1), 26-37. <https://doi.org/10.1111/ics.12672>
- Meyers, M. A., Chen, P.-Y., Lin, A. Y.-M., & Seki, Y. (2008). Biological materials: Structure and mechanical properties. *Progress in Materials Science*, 53(1), 1-206. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2007.05.004>
- Mohamed, J. M. M., Alqahtani, A., Al Fatease, A., Alqahtani, T., Khan, B. A., Ashmitha, B., & Vijaya, R. (2021). Human Hair Keratin Composite Scaffold: Characterisation and Biocompatibility Study on NIH 3T3 Fibroblast Cells. *Pharmaceuticals*, 14(8), 781. <https://doi.org/10.3390/ph14080781>
- Mokrejš, P., Pavlačková, J., Janáčová, D., & Huřta, M. (2018). Hydration and barrier properties of emulsions with the addition of keratin hydrolysate. *Cosmetics*, 5(4), 64. <https://doi.org/10.3390/cosmetics5040064>
- Pawar, V. A., Prajapati, A. S., Akhane, R. C., Patel, D. H., & Subramanian, R. B. (2018). Molecular and biochemical characterization of a thermostable keratinase from *Bacillus altitudinis* RBDV1. *3 Biotech*, 8(2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1130-5>
- Savaides, A., & Tasker, R. (2014). Formulations and methods for straightening and revitalizing hair (U.S. Patent No. US2014/0261518A1). U.S. Patent and Trademark Office.
- Sinkiewicz, I., Staroszczyk, H., & Śliwińska, A. (2018). Solubilization of keratins and functional properties of their isolates and hydrolysates. *Journal of Food Biochemistry*, 42(2), e12494. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12494>
- Tasaki, K. (2020). A novel thermal hydrolysis process for extraction of keratin from hog hair for commercial applications. *Waste Management*, 104, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.011>
- Tinoco, A., Gonçalves, D., Silva, C., Loureiro, A., Dias, M., & Cavaco-Paulo, A. (2021). Keratin:Zein particles as vehicles for fragrance release on hair. *Industrial Crops and Products*, 159, 113067. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113067>
- Wan, M.-Y., Dong, G., Yang, B.-Q., & Feng, H. (2016). Identification and characterization of a novel antioxidant peptide from feather keratin hydrolysates. *Biotechnology Letters*, 38(4), 643-649. <https://doi.org/10.1007/s10529-015-2016-9>
- Wang, B., Yang, W., McKittrick, J., & Meyers, M. A. (2016). Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration. *Progress in Materials Science*, 76, 229-318. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.06.001>
- Xiao, X. L., Hu, J. L., Gui, X. T., & Qian, K. (2017). Shape memory investigation of alpha-keratin fibers as multi-coupled stimuli of responsive smart materials. *Polymers*, 9(3), 87. <https://doi.org/10.3390/polym9030087>
- Yang, Y., & Reddy, N. (2013). Utilizing discarded plastic bags as matrix material for composites reinforced with chicken feathers. *Journal of Applied Polymer Science*, 130(1), 307-312. <https://doi.org/10.1002/app.39173>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s283>

УДК 66.011

Современное состояние технологий инкапсулирования

А. В. Вейберов, М. И. Губанова, П. О. Орел, И. А. Кирш, О. А. Банникова

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

Корреспонденция:

Вейберов Анатолий Васильевич,
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
125080, Россия, Москва,
Волоколамское шоссе, 11
E-mail: veyberov2000@mail.ru

Конфликт интересов:

авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 27.06.2025

Поступила после
рецензирования: 23.12.2025

Принята: 26.12.2025

Copyright: © 2025 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья рассматривает методы получения микрокапсул и их применение в пищевой и фармацевтической промышленности для защиты чувствительных веществ и повышения функциональности продуктов.

Цель. Анализ состояния и перспектив применения технологий инкапсулирования в пищевой и фармацевтической отраслях, а также оценка развития данного рынка в РФ.

Материалы и методы. Проведен систематический обзор 106 релевантных научных публикаций (1991–2025 гг.) из международных и российских баз данных с применением методов сравнительного и системного анализа.

Результаты. Результаты статьи подчеркивают актуальность и востребованность технологий инкапсулирования для улучшения качества и функциональности продуктов в пищевой и фармацевтической промышленности.

Выводы. Наиболее универсальным методом для пищевой отрасли показала себя распылительная сушка, для целевой доставки в фармацевтике — межфазная полимеризация. Технология инкапсулирования на рынке РФ устойчиво растет благодаря спросу на функциональные продукты, но его развитие сдерживается экономическими рисками и потребностью в обновлении стандартов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

инкапсулирование, фармацевтическая промышленность, пищевая промышленность, полимерные оболочки, контролируемое высвобождение, защитные свойства, органолептика, биодоступность



Для цитирования: Вейберов, А. В., Губанова, М. И., Орел, П. О., Кирш, И. А., & Банникова, О. А. (2025). Современное состояние технологий инкапсулирования. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 56-80. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s283>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s283>

Current State of Encapsulation Technologies

Anatoliy V. Veyberov, Marina I. Gubanova, Polina O. Orel, Irina A. Kirsh, Olga A. Bannikova

Russian Biotechnological University
(BIOTECH University), Moscow, Russia

Correspondence:

Anatoliy V. Veyberov,
Russian Biotechnological University,
11, Volokolamskoe highway,
Moscow, 125080, Russia
E-mail: veyberov2000@mail.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 27.06.2025

Received in revised form: 23.12.2025

Accepted: 26.12.2025

Copyright: © 2025 The Authors

ABSTRACT

Introduction. The article examines methods for producing microcapsules and their application in the food and pharmaceutical industries to protect sensitive substances and enhance product functionality.

The purpose. To analyze the current state and prospects of applying encapsulation technologies in the food and pharmaceutical sectors, as well as to assess the development of this market in the Russian Federation.

Materials and Methods. A systematic review of 106 relevant scientific publications (1991–2025) from international and Russian databases was conducted using comparative and systemic analysis methods.

Results. The findings highlight the relevance and demand for encapsulation technologies to improve the quality and functionality of products in the food and pharmaceutical industries.

Conclusions. Spray drying has proven to be the most versatile method for the food industry, while interfacial polymerization is optimal for targeted delivery in pharmaceuticals. The encapsulation technology market in the Russian Federation is steadily growing due to the demand for functional products, but its development is constrained by economic risks and the need to update standards.

KEYWORDS

encapsulation, pharmaceutical industry, food industry, polymer shells, controlled release, protective properties, organoleptics, bioavailability.



To cite: Veyberov, A. V., Gubanova, M. I., Orel, P. O., Kirsh, I. A., & Bannikova, O. A. (2025). Current state of encapsulation technologies. *Health, Food & Biotechnology*, 7(4), 56-80. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i4.s283>

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность микрокапсулирования как научного направления обусловлена значительными преимуществами данной технологии, ключевым из которых является возможность создания интеллектуальных систем с программируемыми физико-химическими свойствами, обеспечивающими принципиально новые функциональные решения.

В фармацевтической отрасли технология микрокапсулирования эволюционировала в инструмент для создания прецизионных систем таргетной доставки. Как показывают исследования, проанализированные в данном обзоре, ключевыми стали три направления развития: 1) преодоление биологических барьеров (например, гематоэнцефалического) за счет целенаправленной функционализации поверхности капсул; 2) создание «отзывчивых» систем, высвобождающих препарат в ответ на специфические стимулы организма, такие как изменение pH или концентрация ферментов; 3) обеспечение пролонгированного действия для поддержания стабильной терапевтической концентрации. Таким образом, на смену простой доставке приходят сложные системы, способные решать фундаментальные проблемы биофармацевтики, такие как низкая стабильность и биодоступность белковых терапевтиков (Putney & Burke, 1998), а также обеспечивать целенаправленную доставку и повышенную усвояемость биологически активных пищевых ингредиентов (Jafari & McClements, 2017).

В пищевой промышленности микрокапсулирование решает критические задачи: 1) сохранение жизнеспособности пробиотических культур (*Lactobacillus*, *Bifidobacterium*) при пастеризации и последующая их доставка в кишечник; 2) совмещение химически несовместимых ингредиентов в одной рецептуре (например, железо и витамин E); 3) создание многослойных систем пролонгированного высвобождения ароматизаторов и нутриентов (Ghorbanzade et al., 2023; Carvalho et al., 2023). Сравнительный анализ работ, посвященных решению этих задач, показывает, что универсального подхода не существует: для термочувствительных пробиотиков требуются одни методы (например, экструзия или эмульсионные техники), в то время как для стабилизации летучих ароматизаторов — принципиально другие (коацервация, распылительная сушка). Это подчеркивает важность целевого выбора технологии под конкретный ингредиент и производственные условия.

В агрохимической отрасли микрокапсулирование агрохимикатов в полимерные оболочки позволяет полностью изолировать токсичное действующее вещество,

исключая прямой контакт и обеспечивая его высвобождение в целевой зоне. Препараты с замедленным высвобождением минимизируют воздействие на окружающую среду за счет снижения выщелачивания, испарения и разложения агрохимикатов, повышают водоудерживающую способность почвы, а также лучше борются с сорняками. Такой подход можно использовать для более безопасного применения агрохимикатов (Campos et al., 2015). Аналогичный принцип применяется для безопасной работы с цитостатиками и другими опасными соединениями (Кролевец, 2013).

Концепция инкапсуляции в пищевой промышленности значительно изменилась за последние несколько десятилетий в связи с необходимостью улучшить сохранность продуктов и их питательную ценность. Изначально методы инкапсуляции были разработаны для предотвращения потерь после сбора урожая в результате ферментативных реакций и роста микроорганизмов, которые создавали серьезные проблемы для продовольственной безопасности и экономической жизнеспособности производителей (Chaudhary et al., 2021; Gómez-Gaete et al., 2024).

Современные методы инкапсуляции обеспечивают разный уровень защиты активных веществ¹.

Растущий потребительский спрос на функциональные продукты питания, обладающие противомикробными и антиоксидантными свойствами, стимулирует разработку передовых методов микрокапсулирования биологически активных соединений для их эффективного включения в пищевые матрицы (Chaudhary et al., 2021; Tripathy et al., 2021).

На ранних этапах развития технологии инкапсуляции в пищевой промышленности, основное внимание уделялось защите чувствительных ингредиентов: витаминов — от окисления, ароматических соединений — от испарения и окислительной порчи, масел и жиров — от прогоркания (Jackson & Lee, 1991). Позднее, с развитием функциональных продуктов, ключевой задачей стала защита пробиотических культур от потери жизнеспособности при прохождении через агрессивную кислую среду желудка, что необходимо для обеспечения их терапевтического эффекта (Anal & Singh, 2007).

Выбор материала оболочки (полимерной, липидной или белковой) является критическим параметром, определяющим эффективность инкапсуляции. Такие материалы, как полисахариды, белки и липиды, широко применяются благодаря своей биосовместимости, способности к биodeградации и возможности тонко настра-

¹ All About Feed. (2012). Процессы инкапсуляции приводящие к различным уровням защиты. <https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-additives/encapsulation-processes-lead-to-varying-levels-of-protection/>

ивать кинетику высвобождения активного вещества. Исследования показывают, что правильный подбор материала-носителя напрямую влияет на стабильность и конечную биодоступность инкапсулированного агента (Gonçalves et al., 2016; Jafari & McClements, 2017).

В пищевой промышленности инкапсуляция активно применяется для защиты конкретных биоактивных соединений: омега-3 жирных кислот от окисления и для маскировки вкуса (Kaushik et al., 2015); антоцианов для повышения стабильности, контроля высвобождения и сохранения цвета (Sharif et al., 2020); предотвращения некоторых нежелательных сенсорных изменений, которые могут происходить при употреблении продуктов, обогащенных железом (Hurrell, 2002); пробиотических культур для повышения их выживаемости (Ghorbanzade et al., 2023); ферментов для контролируемой активности (Li et al., 2018); фитоэкстрактов с антимикробными свойствами (Carvalho et al., 2023); летучих ароматизаторов от испарения и окисления (Gharsallaoui et al., 2007); каротиноидов для повышения стабильности и биодоступности (McClements, 2015); и антимикробных пептидов для защиты от деградации (Malheiros et al., 2010).

Несмотря на появление множества инновационных подходов, проведенный нами анализ литературных данных однозначно указывает, что решающими факторами для массового производства в пищевой индустрии остаются экономическая эффективность и возможность организации непрерывного технологического процесса. Это объясняет явление, при котором метод, детально описанный еще в работах (Levi et al., 2011), сохраняет статус промышленного стандарта, тогда как более сложные и точные методы зачастую остаются в нише дорогостоящих специализированных продуктов.

Данная технология демонстрирует особую эффективность при работе с широким спектром биологически активных соединений, включая термочувствительные компоненты. Ключевое преимущество метода заключается в возможности точного контроля размеров частиц (от 10 до 200 мкм) посредством регулирования технологических параметров: диаметра форсунки, скорости распыления, температурного режима и давления.²

Современное развитие технологии распылительной сушки позволило существенно расширить диапазон получаемых частиц до наноразмерного уровня (100–500 нм). Использование двухсопелных систем распыления и оптимизация рецептур стенового материала обеспечивают получение частиц с улучшенными функциональными характеристиками: повышенной стабильностью,

контролируемым высвобождением и улучшенной биодоступностью (English et al., 2023).

Тенденция к более здоровым привычкам питания и растущая осведомленность о функциональных продуктах питания способствует инновациям на рынке пищевых инкапсуляций. Управление по контролю за продуктами и лекарствами также отметило, что инкапсулированные ингредиенты необходимы в разработке нутрицевтиков, что еще больше укрепило актуальность этой технологии³

В результате инкапсуляция натуральных соединений и пробиотиков в пищевые продукты стала важнейшей стратегией для повышения функциональности при сохранении желаемых органолептических свойств (Chaudhary et al., 2021; Gómez-Gaete, 2024).

Структура капсул включает два основных компонента: защитную оболочку (стенку), формируемую капсулирующим агентом, и заключенное в нее активное вещество. Последнее может быть либо локализовано в центральной части, образуя четко выраженное ядро, либо равномерно диспергировано в материале оболочки (Gibbs et al., 1999; Jafari, 2017). Широкий спектр доступных капсулирующих материалов открывает возможности для создания систем с контролируемым высвобождением активного компонента в ответ на различные внешние воздействия (Ильина, 2023). На Рисунке 1 представлено схематичное изображение инкапсулированных веществ в полимерные оболочки соединений.

Инкапсулирование классифицируется по размеру частиц на макро- (>1000 мкм), микро- (1–1000 мкм) и нанокапсулирование (<1 мкм). Понятие «биоинкапсулирование» относится к целевой функции (инкапсуляция биоактивных агентов) и не зависит от размера. Хотя нанокапсулирование является самостоятельным направлением, микрокапсулирование остается наиболее распространенным методом в промышленных масштабах благодаря отработанности и экономической эффективности технологий (Gibbs et al., 1999; Mozafari et al., 2008).

Данная технология нашла применение для широкого спектра веществ:

- фармацевтические препараты различных групп;
- биологически активные добавки;
- косметические средства;
- функциональные чернила (включая чернила для 3D-биопечати, струйной печати и печати гибкой электроники).

² Inner engineering. Распылительная сушка (2025). <https://inner.su/articles/raspylitelnaya-sushka-spray-drying-eto/>

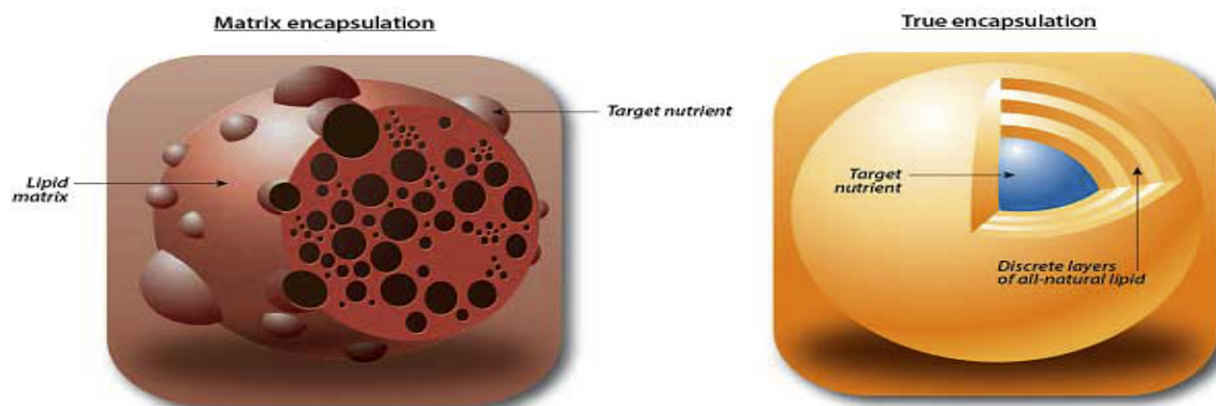
³ Verified Market Reports. Рынок продуктов питания рынка технологий (2023). <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/food-encapsulating-technology-market/>

Рисунок 1

Схематичное изображение инкапсулированных веществ в полимерных оболочках соединений⁴

Figure 1

Schematic Representation of Encapsulated Substances in Polymeric Shells.



Первым коммерческим продуктом на основе микрокапсул стала копировальная бумага безуглеродного типа, разработанная в 1950-е гг. с использованием метода комплексной коацервации желатина и гуммиарабика.⁵ Однако в дальнейшем технология микрокапсулирования получила наибольшее развитие в фармацевтической и пищевой промышленности.

В фармацевтике микрокапсулы начали использовать для создания лекарственных форм с контролируемым высвобождением, защиты активных ингредиентов от разрушения в желудке и маскировки неприятного вкуса (Benita, 2006). Сегодня микрокапсулирование применяется при производстве таблеток, ингаляционных и инъекционных препаратов.

Современные исследования расширяют спектр применения инкапсуляции в фармацевтике. Перспективными направлениями считаются системы, повышающие биодоступность противоопухолевых препаратов за счет таргетированной доставки (Danhier, 2016; Liu et al., 2022).

Активно изучаются технологии позволяющие преодолеть барьеры для пероральной доставки белковых препаратов, таких как инсулин, с помощью систем, защищающих активное вещество в ЖКТ и обеспечивающих его контролируемое высвобождение (Fonte et al., 2013; Putney & Burke, 1998).

Кроме того, большое внимание уделяется созданию частичных систем доставки вакцин (например, на основе полимерных микрочастиц или липосом), которые

не только защищают антиген от деградации, но и действуют как адъюванты, модулируя силу и тип иммунного ответа (De Temmerman et al., 2011; O'Hagan & Rappuoli, 2004).

В пищевой промышленности первые разработки были связаны с защитой и стабилизацией ароматизаторов и витаминов (1960–1970-е гг.) (Gharsallaoui et al., 2007). В настоящее время метод широко используется для капсулирования пробиотиков, нутрицевтиков и функциональных ингредиентов, что позволяет контролировать их высвобождение и повышать стабильность продуктов (Augustin & Sanguansri, 2015).

В фармацевтической и пищевой промышленности выбор технологии микрокапсулирования напрямую зависит от требуемых характеристик продукта. Одним из ключевых параметров является размер частиц: капсулы могут варьироваться от 1 мкм до 7 мм. Этот показатель определяет специфику конечного продукта, технологические особенности процесса производства, а также устойчивость систем к внешним воздействиям (Cui et al., 2006; Tressa et al., 2025).

Существуют микрокапсулы которые могут содержать одновременно несколько фармакологически активных веществ различной природы: капсула может содержать одно вещество в мембране, а второе вещество в ядре (Степанова и др., 2014).. Кроме того, активно развиваются конструкции с многослойными оболочками: вокруг активного ядра формируются последовательные защитные слои из полисахаридов, белков или липидов,

⁴ All About Feed. (2012). Процессы инкапсуляции...

⁵ Green, B. K., & Schleicher, L. (1957). Oil-containing microscopic capsules and method of making them (U.S. Patent No. 2,800,457). U.S. Patent and Trademark Office.

что позволяет повысить стабильность пробиотиков при хранении и обеспечить их высвобождение в кишечнике, а также обеспечивалась выше жизнеспособность пробиотиков (Жантлесова, 2021; Tressa et al., 2025).

Целью данной работы является анализ современного состояния и перспектив использования технологий инкапсулирования в пищевой и фармацевтической отраслях, а также оценка развития данного рынка в Российской Федерации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методологической основой данного исследования является систематический аналитический обзор научной литературы, посвященной технологиям инкапсулирования. Исследование проводилось в несколько этапов: поиск, первичный скрининг и углубленный анализ отобранных источников.

Стратегия поиска и информационные базы Сбор данных осуществлялся за период с 1991 по 2025 год включительно. Для обеспечения полноты охвата как мировых, так и отечественных разработок, поиск релевантных публикаций проводился в следующих базах данных:

- (1) Международные библиографические базы: Scopus, Web of Science, PubMed.
- (2) Российские научные электронные библиотеки: eLibrary, CyberLeninka.

Поиск выполнялся по ключевым словам и их комбинациям на русском и английском языках: «микрокапсулирование», «инкапсуляция», «контролируемое высвобождение», «биодоступность», microencapsulation, encapsulation, targeted delivery, probiotics.

На начальном этапе по заданным поисковым запросам было идентифицировано 153 публикации. Для формирования итоговой выборки применялись строгие критерии отбора, а именно (1) оригинальные исследовательские статьи и фундаментальные обзоры; (2) наличие детального описания конкретного метода инкапсуляции; (3) наличие характеристик физико-химических (размер, форма) или функциональных (стабильность, биодоступность) свойств полученных систем; (4) данные об эффективности применения технологий в пищевой или фармацевтической отраслях.

Критерии исключения: (1) тезисы докладов и материалы конференций (ввиду краткости изложения методологии); (2) работы с недостаточным описанием условий

эксперимента или необоснованными выводами; (3) дубликаты публикаций в разных базах данных.

В результате первичного скрининга, включавшего оценку названий и аннотаций на соответствие тематике, было отсеяно 47 работ. Для финального полнотекстового анализа и систематизации было отобрано 106 наиболее релевантных источников.

В ходе работы использовались следующие научные методы:

Сравнительный анализ — для сопоставления технико-экономической эффективности различных технологий (например, распылительной сушки и коацервации).

Системный подход — для классификации методов инкапсулирования по размерам частиц (макро-, микро-, нано-), типу используемых материалов (полисахариды, белки, липиды) и механизму высвобождения активных веществ.

Синтез информации — для обобщения текущих тенденций рынка и оценки перспектив импортозамещения и развития технологий инкапсулирования в Российской Федерации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

История появления капсулирования. Технологии инкапсулирования имеют древние корни: ещё в Древнем Египте (≈1550 г. до н. э.) медицинские папирусы (включая папирус Эберса) содержат рецептуры и указания по приготовлению лекарственных смесей, что свидетельствует о ранних практиках защиты и консервации лекарственных веществ (Metwaly et al., 2021).

Переход к формализованным фармацевтическим капсулам произошел в XIX в.: в 1833–1834 гг. французские фармацевты Joseph G. A. Dublanc и F. A. B. Mothes запатентовали метод получения желатиновых капсул, что принято считать началом эры современных фармацевтических капсул.⁶

В XX в. технология инкапсуляции получила активное развитие: в 1950-е гг. микрокапсулы нашли применение в производстве копировальной бумаги без углерода (Benita, 2006), а уже в 1970-х гг. методы микрокапсулирования начали широко использоваться в пищевой промышленности для защиты ароматизаторов, витаминов и жиров от окисления (Gharsallaoui et al., 2007).

⁶ Bleiner, P. (2025). A brief history of gelatin in soft caps: Why it is still the leading choice for manufacturers.

<https://www.pbleiner.com/en/insights-news/insights-blog/brief-history-gelatin-soft-caps-why-it-still-leading-choice-manufacturers>

Современный этап развития инкапсуляции характеризуется значительным разнообразием как подходов (коацервация, распылительная сушка, эмульсионная полимеризация и др.), так и материалов (белки, полисахариды, липиды, синтетические полимеры), что позволяет контролировать размер, форму и поведение капсул при хранении и высвобождении активных веществ (Naharro-Molinero et al., 2024). Наиболее широко используемым в промышленных масштабах методом остается распылительная сушка благодаря её высокой производительности и экономичности.

Вместе с тем активно исследуются и внедряются новые технологии, такие как электрораспыление, комплексная коацервация, дражирование, ионотропное гелеобразование, формирование комплексов включения, микрофлюидные и сверхкритические методы, которые обеспечивают возможность получения капсул с заданными размерами, многослойными оболочками и улучшенной стабильностью биологически активных соединений (Ribeiro et al., 2021; Семкина, 2021). Эти инновационные подходы расширяют потенциал применения инкапсуляции не только в пищевой и фармацевтической промышленности, но и в косметологии, а также в смежных областях.

Эти технологии особенно активно применяются в пищевой промышленности, где микрокапсулы стали ключевым инструментом для создания продуктов с повышенной стабильностью и улучшенными потребительскими свойствами.

Если изначально акцент делался на защите отдельных ингредиентов, то сегодня всё большее внимание уделяется созданию комбинированных систем. Перспективным направлением стали синбиотические микрокапсулы, в которых одновременно заключены пробиотики и пребиотики: такая форма значительно повышает выживаемость микроорганизмов и усиливает их физиологический эффект (Malos et al., 2025).

Дополнительно развивается капсулирование пептидов и биологически активных фитонутриентов, что открывает возможности для разработки функциональных напитков и специализированных продуктов питания (Yan et al., 2022; Hu et al., 2024).

На сегодняшний день желатин остается одним из наиболее часто применяемых материалов для капсул, однако всё шире используются и альтернативы. Среди них — полисахариды, производные целлюлозы и растительные полимеры. Например, гидроксипропилметилцеллюлоза (HPMC) зарекомендовала себя как перспективная за-

мена желатину благодаря стабильности при хранении и возможности точного контроля высвобождения действующих веществ.

Капсулы на основе pullulan и HPMC выпускаются рядом производителей и применяются для создания веганских продуктов, а также для форм с замедленным или целенаправленным высвобождением (Sharma et al., 2023). Кроме желатина, современные оболочки капсул включают растительные и полусинтетические полимеры, а также ряд вспомогательных веществ, обеспечивающих требуемые свойства. Так, в энтеросолюбильных рецептурах применяется гипромеллоза фталата в сочетании с желатином и полиэтиленгликолем-4000, что позволяет капсулам сохранять целостность в кислой среде желудка и высвобождать содержимое уже в кишечнике (Ramezani Kalmer et al., 2023).

Перспективным направлением стали полностью растительные капсулы на основе pullulan, обладающие высокой механической прочностью и устойчивостью к влаге (Ramezani Kalmer et al., 2024). Сравнительные исследования также показали, что HPMC- и pullulan-капсулы более стабильны при хранении, чем желатиновые аналоги (Yang et al., 2025). Для получения энтеросолюбильных и пролонгированных форм используются композиции pullulan с полиакриловыми смолами, позволяющие регулировать скорость распада (Hu et al., 2024).

Дополнительно разрабатываются мягкие капсулы на основе растительных крахмалов, например гидроксипропил горохового крахмала в сочетании с каррагинаном и пластификаторами, которые позиционируются как альтернатива желатиновым оболочкам и находят применение в производстве веганских продуктов.⁷

Методы получения микро- и нанокапсул. Анализ литературных данных выявил определенное терминологическое несоответствие, связанное со структурой инкапсулированных продуктов. Для систематизации подхода в данном обзоре мы предлагаем ориентироваться на классификацию, основанную на морфологии частиц. Как наглядно демонстрирует Таблица 1, помимо базового разделения на микро- и нанокапсулы, критически важным является различие между капсулами (с жидким ядром) и сферами (с твердым ядром), поскольку это определяет их функциональные свойства и области применения (Кролевец, 2013; Podgornik & Šumiga, 2008).

Классификация методов микрокапсулирования. Основные методы получения нанокапсул представлены в Таблице 2. В данный момент единая система класси-

⁷ Roquette. (2024, May 14). Lycagel Flex hydroxypropyl pea starch premix for softgel capsules [Press release]. <https://www.outsourcing-pharma.com/Article/2024/05/14/roquette-s-new-capsules-solving-drug-delivery-issues>

Таблица 1
Терминология существующей инкапсуляции, которая детально представлена авторами (Podgornik & Šumiga, 2008)

Table 1
Terminology of Existing Encapsulation (Podgornik & Šumiga, 2008)

Название	Описание	Размер	Изображение
Микрокапсулы	Частицы, содержащие жидкие ядра и твердые оболочки	мкм	
Нанокapsулы	Структура как у микрокапсул, но размер меньше	нм	
Микросферы	Частицы, содержащие твердые ядра и твердые оболочки	мкм	
Наносферы	Структура как у микросфер, но размер меньше	нм	
Липосомы	Липидная оболочка, часто из фосфолипидов и холестерина. Подтипы: однослойные и многослойные	от мкм до нм	
Ниосомы	Структура как у липосом, но оболочка изготавливается из синтетических амфифильных молекул		

фикации методов микрокапсулирования не разработана. Исходя из данных, опубликованных в российской литературе, методы получения микрокапсул могут быть разделены на три основные группы.

Следует отметить, что данная классификация, основанная на природе процессов инкапсуляции и представленная в Таблице 3, носит условный характер, поскольку на практике нередко используют комбинации различных подходов (Yan et al., 2022). Так, метод аэрозольного микрокапсулирования может быть отнесен как к химическим, так и к физическим методам, поскольку соче-

тает процессы химического взаимодействия и физической коалесценции частиц (Ribeiro et al., 2021).

В последние годы появились и другие гибридные технологии: сочетание распылительной сушки с липосомальными системами для повышения биодоступности липофильных соединений (Hu et al., 2024),

Для термочувствительных объектов, таких как пробиотики, комбинация методов инкапсуляции (коацервация) с сублимационной сушкой является стандартным

Таблица 2
Современные методы инкапсуляции (2008–2025) и области применения
Table 2
Modern Encapsulation Methods (2008–2025) and Areas of their Application

Класс методов	Примеры	Особенности	Основные области применения
Традиционные масштабируемые	Распылительная сушка, включая nano-spray drying (Ribeiro et al., 2021)	Высокая производительность, отработанные технологии	Пищевая промышленность (ароматы, витамины, омега-3), БАДы, кормовые добавки
Классические лабораторно-промышленные	Коацервация, эмульсионная/суспензионная полимеризация, межфазная полимеризация (Hu et al., 2024)	Гибкость в подборе материалов, возможность сложных капсул	Фармацевтика (контролируемое высвобождение), пищевая промышленность (чувствительные ингредиенты), косметика
Нанотехнологические и высокоточные	Микрофлюидные системы, электроспрей и технологии на основе сверхкритических флюидов (Zuidam & Nedović, 2010).	Узкий контроль размера, создание многослойных оболочек, «чистые» процессы	Фармацевтика (таргетная доставка, пептиды, пробиотики), пищевая промышленность (пробиотики, липофильные нутриенты), косметика
Новые аддитивные технологии	3D/inkjet printing (Oral et al., 2021)	Персонализированная дозировка, формирование сложных структур	Фармацевтика (индивидуализированные препараты), функциональные продукты питания

Таблица 3
Методы инкапсуляции по принципу действия и области применения
Table 3
Encapsulation Methods by their Operating Principle and Application Area

Группа методов	Примеры	Основные области применения
Физико-химические	Коацервация; Осаждение нерастворителем; Образование новой фазы при изменении температуры; Упаривание летучего растворителя; Отверждение расплавов в жидких средах; Экстракционное замещение; Высушивание распылением; Физическая адсорбция	Фармацевтика (контролируемое высвобождение, пробиотики); Пищевая промышленность (витамины, омега-3, ароматизаторы); Косметика (ароматические масла, активные вещества)
Химические	Образование новой фазы путем сшивания полимеров; Поликонденсация; Полимеризация	Фармацевтика (полимерные наночастицы, таргетная доставка); Биотехнология (ферменты, пептиды); Материаловедение (капсулы для функциональных покрытий)
Физические	Напыление в псевдооживленном слое; Экструзия; Конденсация паров	Фармацевтика (таблетированные формы, энтеросолюбильные покрытия); Пищевая промышленность (добавки, кормовые компоненты); Химическая промышленность (капсулы с катализаторами, красителями)

подходом для обеспечения длительной стабильности при хранении (Krasaekoort et al., 2003).

Критерии выбора метода инкапсуляции во многом определяются свойствами целевого вещества и желаемыми характеристиками конечного продукта. В Таблице 4 представлены основные факторы, которые учитываются при подборе технологии, а также примеры веществ и соответствующие методы.

Сложность классификации методов обусловлена возможностью комбинации нескольких механизмов в одном процессе, а также изменением терминологии с течением времени. Сравнительный анализ методов, представленных различными авторами, приведен в Таблице 5 (Кролевец, 2013; Balagani, 2011; Адиканова, 2016; Chaudhary et al. 2021). Анализ таблиц наглядно демонстрирует, что универсального решения не существует — выбор метода диктуется конкретной прикладной задачей.

Таблица 4*Факторы выбора метода инкапсуляции и примеры применения***Table 4***Encapsulation Method Selection Factors and their Application Examples*

Фактор	Особенности вещества	Подходящие методы	Примеры веществ
Термоллабильность	Разрушаются при нагревании	Лиофилизация, LbL-инкапсуляция, микрофлюидные системы	Пробиотики (<i>Lactobacillus</i> spp.), ферменты, витамин С
Летучесть	Потеря аромата и активности при хранении	Коацервация, межфазная полимеризация, липосомы	Эфирные масла, ароматизаторы
Растворимость	Липофильные компоненты плохо диспергируются в воде	Эмульсионные методы, липосомальные системы, Pickering-эмульсии	Омега-3 жирные кислоты, каротиноиды, куркумин
Чувствительность к pH	Разрушение в кислой или щелочной среде	Энтеросолюбильные покрытия (Eudragit®, HPMCPH), капсулы двойного покрытия	Пробиотики, пептиды, белки
Необходимость пролонгированного высвобождения	Требуется постепенное или таргетное высвобождение	Коацервация, полимеризация, многослойные оболочки	Антиоксиданты, нутрицевтики
Форма конечного продукта	Требуются порошки с узким распределением частиц	Spray-drying, nano-spray drying	Витамины, сухие экстракты, ароматизаторы

Таблица 5*Методы инкапсулирования и их применение в промышленности***Table 5***Encapsulation Methods and their Industrial Applications*

Метод	Применение
Химические методы	
Суспензионная полимеризация	Текстиль
Эмульсионная полимеризация	Фармацевтика
Дисперсионный метод	Биологические науки
Межфазный метод	Защита растений, катализ, фармацевтика
Физические методы	
Суспензионное шивание	Фармацевтика
Экстракция	
Сушка распылением	
Коацервация	
Аэрозольный метод	Фармацевтика, пищевая промышленность
Кристаллизация из расплавов	Пищевая промышленность
Осаждение	Пищевая промышленность
Коэкструзия	Биологические науки
Покрывание в кипящем слое	Биомедицина
Вымораживание-замораживание	Биологические науки
Дисковое вращение	Фармацевтика
Метод пропитки	Фармацевтика

Суспензионная полимеризация служит распространенным способом синтеза поливинилхлорида, полистирола и полиметилметакрилатов. Применение водной дисперсионной среды с высокой теплоемкостью обеспечивает эффективный теплоотвод, способствуя формированию полимера с узким молекулярно-массовым распределением. Метод дает сферические частицы (5–1000 мкм), легко отделяемые от среды и характеризующиеся низким содержанием примесей (Адиканова, 2016).

Эмульсионная полимеризация основана на введении мономера в водный раствор, содержащий эмульгатор и инкапсулируемое вещество. Полимеризация сопровождается образованием первичных ядер, рост которых приводит к формированию микрокапсул.

Дисперсный метод характеризуется образованием оболочки в результате полимеризации мономеров, введенных в инкапсулируемое вещество. Особенностью процесса является отсутствие реактивных агентов в основном материале. Полимеризация протекает исключительно в непрерывной фазе с формированием дисперсного ядра: первоначально образуется низкомолекулярный форполимер, который постепенно увеличивает молекулярную массу, после чего на его поверхности осаждается основной материал с последующим образованием капсул.

Межфазная полимеризация предполагает образование оболочки на поверхности капель с использованием многофункциональных мономеров (изоцианатов, хлоридов кислот). Мономер диспергируют в водной фазе, содержащей материал ядра и диспергатор, после чего добав-

ляют многофункциональный амин для инициирования быстрой полимеризации.

Суспензионное сшивание представляет собой метод получения микрокапсул полисахаридов, при котором водный раствор полимера диспергируют в органическую фазу, содержащую материал ядра капсул в несмешивающихся растворителях. Данный подход универсален для инкапсуляции как жидких, так и твердых веществ.

Экстракция наиболее распространенный метод, подразумевающий эмульгирование раствора полимера с препаратом в несмешивающихся растворителях, удаление растворителя (нагревом, вакуумом или испарением) и последующую сушку микросфер. Широко применяется в фармацевтике (Кролевец, 2013).

Распылительная сушка заключается в диспергировании эмульсии капсулируемого вещества в потоке горячего газа, что приводит к удалению растворителя и образованию плотных частиц с равномерным распределением активного компонента (Меньшутина, 2014).

Коацервация реализуется в двух формах: простой (с десольватирующим агентом) и сложной (основанная на комплексообразовании полимеров). Процесс включает три этапа: создание несмешивающихся фаз, осаждение оболочки и ее отверждение (Кролевец, 2013).

Аэрозольный метод основан на использовании газовой дисперсионной среды. Этапы его реализации: распыление частиц в парах капсулирующего материала; распыление эмульсий/дисперсий; смешение аэрозолей реагирующих компонентов (Меньшутина, 2014).

Кристаллизация из расплавов включает расплавление полимера, смешение с препаратом, добавление несмешивающихся растворителей, нагрев до 50 °C при перемешивании и последующее охлаждение (Кролевец, 2013).

Метод осаждения. Осаждение полимера на капли эмульсии в неводных эмульсиях приводит к образованию прочной оболочки без загрязнения сердцевины, что идеально подходит для герметизации чувствительных к воде или смешивающихся с водой материалов (Lak et al., 2022).

Кокструзия осуществляется путем одновременной экструзии растворов капсулирующего агента и целевого материала через концентрические форсунки. Ламинарный поток разбивается на капли с последующим отверждением оболочки (охлаждением, сушкой или химической обработкой). Метод обеспечивает защиту активных компонентов и контроль высвобождения (Ильина, 2023).

Метод покрытия в кипящем слое. При использовании этого метода частицы находятся во взвешенном состоянии в слое, на них распыляется жидкость для нанесения покрытия, после чего они высушиваются. Иными словами, процессы псевдоожижения и распыления применяются одновременно. Для получения однородного продукта важны размер частиц и вязкость среды для нанесения покрытия распылением. Благодаря мелким частицам и низкой вязкости распыляемой среды получают однородные продукты. Кроме того, качество покрытия во многом зависит от статистического времени пребывания частиц в зоне нанесения покрытия. Псевдоожиженный слой для нанесения покрытий может быть устроен по принципу нижнего распыления (по Вурстеру), верхнего распыления или роторного (тангенциального) распыления (Dehghani & Farhadian, 2023).

Вымораживание-замораживание Механизм инкапсуляции был изучен путем анализа влияния температур замораживания-оттаивания на морфологические изменения гигантских однослойных пузырьков, инкапсуляции ДНК и образования кристаллов льда, а также взаимосвязи этих процессов. После образования кристаллов льда форма сферических пузырьков была изменена, а целостность мембраны нарушена, эти явления оказались необходимыми условиями для инкапсуляции.

Само по себе нагревание не оказало влияния на инкапсуляцию ДНК, но было полезно для восстановления сферической формы и целостности мембран гигантских однослойных пузырьков, поврежденных при замораживании. Эти результаты исследования ученых из Китая показали, что замораживание-оттаивание может способствовать инкапсуляции ДНК в ГВ посредством следующего механизма: мембрана везикулы нарушается при образовании кристаллов льда во время замораживания, ДНК проникает в поврежденные ГВ через эти мембранные промежутки и инкапсулируется после повторного запечатывания мембраны в процессе оттаивания (Qiao, 2016).

Дисковое вращение. Способ формирования тканевых микрокапсул с использованием устройства для капсулирования с вращающимся диском, в котором подаваемая смесь вводится в смесительную камеру стакана с помощью одной иглы, нескольких или концентрических игл. При вращении чаши покрытые частицы под действием центробежной силы поднимаются из камеры смешивания вдоль внутренней поверхности чашки, выступая радиально наружу в виде шариков, и попадают в желирующий раствор, находящийся в одном из резервуаров⁸.

⁸ Kent, C. C. (1999). *Spin disk encapsulation apparatus and method of use* (Patent No. US6001387A). U.S. Patent and Trademark Office.

Метод пропитки основан на диффузионном насыщении полимерных матриц термолабильными органическими соединениями из среды сверхкритического диоксида углерода (ScCO_2) при комнатной температуре. Технология исключает использование органических растворителей и применяется для инкапсуляции фармацевтических субстанций (Кролевец, 2013).

В пищевой промышленности методы инкапсулирования используются для двух основных целей: защиты пищевых добавок и ингредиентов (путем создания макропокрытий) и обогащения продуктов микронутриентами и биологически активными веществами (БАВ).

Прямое внесение БАВ в пищевые системы часто сопряжено с их деградацией. Актуальными задачами являются: разработка методов, минимизирующих потери биологически активных компонентов, и поиск новых подходов к инкапсулированию (Ильина, 2023).

Инкапсулирование в промышленности. Нутрицевтики, функциональные продукты питания, стимуляторы иммунитета, микрокапсулы, наноэмульсии, пищевая упаковка и безопасные продукты питания — новые прогрессивные термины, принятые для описания пищевой промышленности. Кроме того, растущая осведомленность потребителей о них создала возможность для производителей продуктов питания и ученых по всему миру использовать продукты питания в качестве средства доставки

Упаковка играет очень важную роль в цепочке поставок пищевых продуктов, а также является неотъемлемой частью процесса производства пищевых продуктов.

Исследования, посвященные пищевой упаковке, — это быстро развивающаяся область науки, где используются пищевые биополимеры, такие как липиды, полисахариды, белки, смолы и т. д., а также другие расходуемые компоненты, извлекаемые из различных нетрадиционных источников, таких как микроорганизмы. Эти компоненты применяются по отдельности или в комбинации.

Эта пищевая упаковка незаменима и предназначена для употребления с пищевыми продуктами. Переход от традиционной упаковки пищевых продуктов к съедобным, экологически чистым средствам доставки биоактивных соединений открыл новые возможности для упаковочной промышленности. Биоактивные соединения, усваиваемые пищевыми системами, постепенно разлагаются, или могут изменять свои свойства из-за внутренних или внешних факторов, таких как реакции окисления, или они могут вступать в реакцию друг с другом, что снижает их биодоступность и в конечном итоге может привести к появлению неприемлемых органолептических свойств (цвета или вкуса).

Сочетание нового материала для упаковки пищевых продуктов и инновационных технологий может служить отличным средством контроля биодоступности этих соединений в пищевых матрицах.

Одной из перспективных технологий для преодоления вышеупомянутых проблем является капсулирование. Его можно использовать как метод улавливания желаемых ароматизаторов, пробиотиков или других добавок для устранения недостатков обычной пищевой упаковки (Chaudhary et al., 2021).

Эффективность микрокапсулирования в фармацевтике наиболее наглядно демонстрирует пример с пробиотиками. Прямое введение культур в ЖКТ малоэффективно из-за агрессивной желудочной среды. Однако, как свидетельствуют экспериментальные данные (Астафьева, 2022), инкапсуляция позволяет не просто немного увеличить, а на порядки повысить выживаемость пробиотиков. Полученные результаты — «повышение на два порядка» — означают, что до цели доходит не несколько процентов, а большинство бактерий. Это коренным образом меняет эффективность пробиотической терапии и открывает путь к созданию принципиально новых лекарственных форм, что подтверждается исследованиями других авторов (Какимов, 2016).

Применение методики инкапсулирования антибиотиков обеспечивает высокую биодоступность за счет повышения способности прохождения через естественные барьеры организма (Цепелев, 2023).

В исследовании ученых из Казахстана было установлено, что для сохранения активности роста *L. casei* в желудочно-кишечном тракте необходимо применить инкапсулирование пробиотиков. Инкапсулирование *L. casei* обеспечит защиту лактобацилл от действия желудочного сока и тем самым позволит жизнеспособным клеткам лактобацилл достичь нижних отделов кишечника, где они будут способны обеспечить успешное лечебное воздействие (Какимов, 2016).

Свойства оболочек (носителей) микрокапсул можно варьировать таким образом, чтобы действующее вещество (инкапсулят) полностью сохраняло свой состав и характеристики при технологической обработке продукта (Базарнова, 2014). Это может позволить вносить пробиотики в пищевые продукты, требующие температурной обработки.

Исследование возможности температурной обработки пищевых продуктов с инкапсулированными пробиотическими культурами актуально, так как это позволит существенно расширить ассортимент таких функциональных продуктов (Астафьева, 2022).

Микрокапсулирование обеспечивает сохранение свойств биологически активных веществ (БАВ) при воздействии агрессивных факторов внешней среды, предотвращая инактивацию физиологически активных компонентов, включая белки, в процессах хранения и переработки. Данная технология поддерживает нативную конформацию функциональных пищевых ингредиентов как до, так и после обогащения продуктов, одновременно повышая биодоступность БАВ за счет контролируемого высвобождения.

Исследование кинетики высвобождения сывороточного альбумина из полиэлектролитных капсул (альгинат натрия/карбоксиметилцеллюлоза) в условиях *in vitro*, моделирующих ЖКТ, показало, что в желудочной фазе теряется 20 % белка, тогда как 80 % БАВ высвобождается в кишечной фазе. При этом 90 % белка десорбировалось из моно- и полислойных систем именно в кишечных условиях, что подтверждает их защитную функцию и механизм таргетированной доставки (Дружинина, 2017).

В качестве коллоидных систем доставки, пригодных для инкапсулирования белков, используют межфазные системы, например, микроэмульсии, эмульсии, мицеллы, твердые липидные наночастицы, липосомы, полимерсомы, золь-гели и гидрогели. Активно применяют неорганические мезопористые частицы (наночастицы диоксида кремния, гидроксиапатит, фосфаты кальция и др.) и частицы на полимерной основе, в том числе белковой природы.

Коллоидные системы, пригодные для инкапсулирования белков, включают межфазные структуры: микроэмульсии, эмульсии, мицеллы, твердые липидные наночастицы, липосомы, полимерсомы, золь-гели и гидрогели. Активно применяются неорганические мезопористые частицы (наночастицы SiO_2 , гидроксиапатит, фосфаты кальция) и полимерные носители, включая белковые.

Примером служит инкапсуляция инсулина в хитозан-пектиновые нано- и микрочастицы, позволившая разработать пероральные формы вместо инъекционных. Липосомальные системы обеспечивают преодоление проблем биосовместимости, таргетную доставку и защиту от иммунных факторов, что актуально при конструировании вакцин для индукции антител и Т-клеточного ответа.

Однако эти технологии имеют ограничения, такие как необходимость стандартизации матриц по размеру, форме и заряду частиц для контролируемого высвобождения. В частности, малый размер пор неорганических носителей ограничивает инкапсуляцию крупных белковых молекул (Соколов, 2021).

Технология инкапсулированных пищевых добавок имеет следующие преимущества: возможность получения

порошкообразных субстанций и составления композиций многоцелевого назначения; сохранение вкусоароматических и цветовых свойств природных веществ; пролонгация фитонцидного и антиоксидантного действия фитокомпонентов натуральных пищевых добавок в продукте; синергетический эффект фитокомпонентов в составе композиций; отсутствие химических взаимодействий с другими компонентами продукта; термо- и криостабильность инкапсулируемых ингредиентов за счет защитного покрытия материала инкапсулянта; гомогенность распределения микрокапсул по массе продукта (Базарнова, 2014).

Формирование капсул, материалы. Содержание инкапсулированного вещества в микрокапсулах варьируется в диапазоне 70–85 % от массы капсулы и определяется технологическими параметрами: методом получения, требуемым соотношением оболочка/ядро, температурой, степенью диспергирования, вязкостью среды и наличием ПАВ (Levi et al., 2011; Степанова и др., 2014).

Термины «микрокапсулы» и «нанокпсулы» обозначают гетерогенные структуры, включая молекулярные комплексы с иммобилизованным активным компонентом и самоорганизующиеся наносистемы. Критерием разграничения микро- и нанокпсуляции служит размер частиц. Нанокпсулы, как правило, характеризуются диапазоном 1–1000 нм, что позволяет существенно увеличить биодоступность и контролировать проникновение активных веществ в целевые ткани. Микрокапсулы, напротив, имеют размеры от 1 до 1000 мкм и применяются в основном для защиты действующих веществ от внешних воздействий и обеспечения пролонгированного высвобождения (McClements & Xiao, 2014).

К липидным матрицам относят пчелиный воск и глицеролдистеарат, которые используются для защиты летучих ароматических веществ и масел (Augustin & Nema, 2009). Белковые материалы включают желатин, зеин и модифицированные растительные белки, применяемые для создания капсул с контролируемым высвобождением и высокой биосовместимостью (Gharsallaoui et al., 2007).

Углеводные соединения, такие как крахмалы, хитозан и производные целлюлозы, широко используются в пищевой и фармацевтической промышленности благодаря их превосходной биосовместимости, естественной биоразлагаемости. Кроме того, они способны образовывать коллоидные дисперсии, гидрогели или системы с твердыми частицами, которые обеспечивают физическую защиту биологически активных соединений от воздействия окружающей среды, таких как окисление, тепло и свет (Sethunga et al., 2025).

Среди синтетических полимеров, например, применяются поли(молочная кислота) и сополимеры метакриловой кислоты, обеспечивающие энтеросолюбильные и пролонгированные формы лекарственных препаратов (Hu et al., 2024).

Выбор капсулирующей матрицы обусловлен целевым назначением, физико-химическими свойствами активного вещества, механизмом высвобождения и спецификой метода инкапсулирования. Высвобождение содержимого капсул зависит от состава оболочки; основные факторы приведены в Таблице 6 (Меньшутина, 2014).

Таблица 6
Факторы, оказывающие влияние на высвобождение содержимого капсул
Table 6
Factors Affecting the Release of Capsule Contents

Фактор	Примеры материалов оболочки
Температура	Пчелиный воск, карнаубский воск, глицеролдистеарат, стеариновая кислота
Влага	Гидрофильные полимеры: альгинат натрия, крахмалы, пектин, желатин, хитозан
pH	Кишечнорастворимые покрытия: HPMCPH, Eudragit® L/S, целлюлозные эфиры
Ферменты	Липидные матрицы (триглицериды), крахмальные матрицы, белковые материалы (зеин, сывороточные белки), капсулы с покрытием на основе HPMS

Современное развитие инкапсулирования. Совместные исследования выявили ряд биологически активных соединений с доказанным позитивным влиянием на здоровье человека, что активизировало изучение материалов для инкапсуляции (Sun et al., 2023), технологических параметров инкапсулирования биологически активных веществ, молочнокислых микроорганизмов и дрожжей (Laina et al., 2025), а также применения инкапсулированных ингредиентов в функциональных пищевых продуктах (Jiang et al., 2020).

Инкапсуляция повышает термостабильность и растворимость, обеспечивает защиту от ультрафиолетового излучения и возможность контролируемого высвобождения. Кроме того, это повышает шансы на обеспечение безопасности и органолептической приемлемости продуктов, хотя при этом необходимо свести к минимуму повреждение естественного вкуса продуктов, упакованных таким образом (Chaudhary et al., 2021).

Перспективность метода подтверждается его широким применением в т. ч. в производстве строительных материалов, лакокрасочной и текстильной промышленности, в производстве косметики и парфюмерии, пищевом

производстве, ветеринарии, медицине, фармацевтике, полиграфии (чернила, краски), сельском хозяйстве, генной инженерии, а также в автомобилестроении (Быковская, 2012). Это доказывает, что инкапсулирование превратилось из узкотехнологического приема в универсальный инструмент для решения разнообразных прикладных задач.

Исследования технологии комплексной коацервации показали более высокий выход и стабильность получаемого продукта, но основным недостатком остается ограниченная доступность материала оболочки. Желатин является одним из наиболее широко используемых белков для получения микрокапсул методом комплексной коацервации, особенно в комбинации с гуммиарабиком, из-за ее большого количества, биосовместимости и биоразлагаемости (Liu et al., 2022; Li et al., 2018).

Однако в присутствии полисахаридов также было обнаружено, что растительные белки способны образовывать сложные коацерваты. Их более низкая стоимость, более высокая доступность и экологичность в сочетании с другими функциональными свойствами также являются стимулом для дальнейших исследований в этой области (Chaudhary et al., 2021).

В различных отчетах высказывается предположение, что сложные коацервированные микрокапсулы эфирных масел потенциально могут контролировать рост микробов в хранящихся свежих и переработанных пищевых продуктах, таких как фрукты, молоко, овощи, соки и пирожные. (Calderón-Oliver & Ponce-Alquicira, 2022).

В настоящее время перспективным инновационным направлением в технологии производства пищевых продуктов является использование приемов молекулярной гастрономии, позволяющих модифицировать потребительские свойства традиционных продуктов питания. Одним из приемов этого направления является технология сферификации, представляющей собой процесс капсулирования различных пищевых масс (соусов, соков, экстрактов и т. д.). Широкий потенциал технологии капсуляции, частью которой является сферификация, демонстрирует её применение в различных отраслях промышленности (Рисунок 2). Данная технология позволит не только использовать ее в качестве инструмента инновационного менеджмента в ресторанном бизнесе, но и расширить область применения инкапсуляции в связи с использованием структурообразующих веществ отечественного производства и побочных продуктов молочной промышленности (Zhuravlev, 2017).

Рынок инкапсулирования в Российской Федерации. Российский рынок инкапсулирования, как показывают отраслевые отчеты, демонстрирует уверенный рост. Однако важно подчеркнуть, что за общими цифрами стоит

Рисунок 2

Применение инкапсуляции в отраслях в процентном соотношении по состоянию на 2025 г.

Figure 2

Encapsulation Adoption by Industry as a Percentage of 2025



структурный сдвиг. Рост обусловлен не только макроэкономическими факторами (увеличение доходов и численности населения), но и, что более важно, растущим спросом на функциональные продукты и БАДы. Этот спрос, в свою очередь, напрямую связан с технологическими возможностями, рассмотренными в предыдущих разделах: потребитель готов платить за продукты с инкапсулированными пробиотиками, витаминами и омега-3, чья эффективность гарантирована именно применением технологий микроинкапсулирования⁹. Таким образом, научные разработки становятся прямым драйвером рыночного роста.

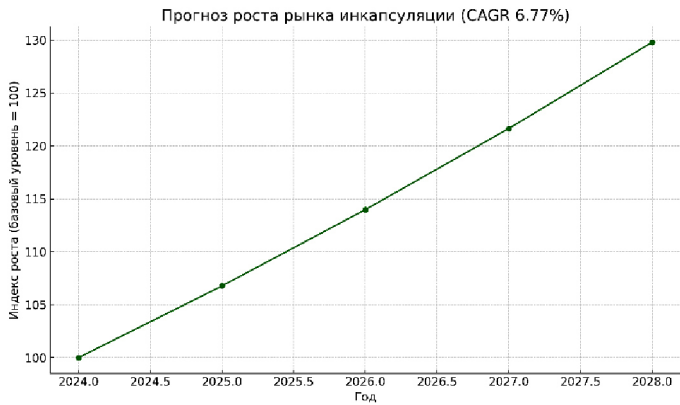
Исторически сложилось так, что рынок инкапсуляции в России претерпел значительные изменения, перейдя от примитивных методов консервации в XIX в. к передовым технологиям микроинкапсуляции в XXI в. (Solodova et al., 2021). Эти достижения позволяют контролировать высвобождение питательных веществ и повышают биодоступность питательных веществ в продуктах питания, стимулируя спрос на функциональные продукты и пищевые добавки¹⁰.

Рисунок 3

Прогноз роста рынка инкапсуляции в период до 2028 г.

Figure 3

Encapsulation Market Growth Forecast through 2028



По прогнозам, в период до 2028 г. совокупный среднегодовой темп роста (CAGR) рынка составит 6,77%, что подчеркивает динамичный характер этой отрасли и её восприимчивость к технологическим инновациям и меняющимся потребительским тенденциям¹¹. Динамика прогнозируемого роста наглядно представлена на Рисунке 3.

Рынок инкапсуляции сталкивается с проблемами, которые могут повлиять на его рост. К ключевым проблемам относится необходимость обновления правил и стандартов для процессов инкапсуляции, что может препятствовать инновациям и разработке продуктов (Solodova, 2021).

Кроме того, экономическая неопределенность и геополитические факторы также могут создавать риски для стабильности рынка и усилий по его расширению^{12,13}.

⁹ Infinium Global Research. (2022). *Российский рынок пищевых капсул: перспективы, анализ тенденций, объём рынка и прогнозы до 2028 года*. <https://www.marketresearch.com/Infinium-Global-Research-v4127/Russia-Food-Encapsulation-Prospects-Trends-33513748>

¹⁰ Bonafide Research. (2025). *Обзор российского рынка пищевых капсулирования, 2028 год*. <https://www.bonafideresearch.com/product/6306297825/russia-food-encapsulation-market>

¹¹ Там же.

¹² Infinium Global Research. (2022). *Российский рынок пищевых капсул*

¹³ Custom Market Insights. (2024). *Мировой рынок микроинкапсулирования 2024–2033*. <https://www.custommarketinsights.com/report/microencapsulation-market>

Региональные идеи

Перспективы развития рынка в разных регионах России неодинаковы. В отчете описаны потенциальные возможности роста в развивающихся отраслях, где востребованы решения по инкапсуляции, например, в пищевой промышленности и фармацевтике¹⁴.

Поскольку участники рынка сосредотачивают свои усилия на быстрорастущих регионах, ожидается, что индустрия инкапсуляции адаптируется к региональным потребностям, открывая путь для специализированных предложений и локализованных стратегий¹⁵.

Производители

Крупнейшими производителями капсулированных лекарственных препаратов на сегодняшний день являются фирмы стран «Большой семерки», а также Бельгии, Южной Кореи, Швейцарии, Мексик¹⁶.

На российском рынке капсульной продукции можно выделить два направления. Первое связано с производством традиционных твердых и мягких желатиновых капсул для биологически активных добавок и лекарственных средств.

Крупнейшим производителем такого формата является компания «Эвалар» — фармацевтическое предприятие, лидер на российском рынке БАДов, с производственными мощностями в Бийске (Алтайский край).¹⁷ Компания «АРТ Современные научные технологии» (Московская область) также предлагает широкий ассортимент капсулированных продуктов¹⁸, аналогичные решения предлагают Uni-Eco, «МегаФарм Союз» и ряд малых предприятий. Сложившаяся структура рынка отражает общий тренд: лидерство фармацевтики и значительный нереализованный потенциал пищевого сектора.

Второе направление связано с развитием технологий микроинкапсуляции, которые находят применение в пищевой промышленности, фармацевтике и косметологии.

Несмотря на ограниченность открытых статистических данных по России, коммерческие отчеты оценивают рынок микроинкапсуляции в РФ примерно в 98,4 млн долл. США в 2023 г., с прогнозом роста до 180 млн долл. США к 2030 г.¹⁹ Глобальные обзоры также подтверждают устойчивый рост сектора микроинкапсулированных ингредиентов, прогнозируя среднегодовые темпы роста на уровне 8–11 %²⁰.

Это позволяет предположить, что аналогичные тенденции характерны и для российского рынка, где технологии инкапсуляции постепенно интегрируются в производство функциональных продуктов питания и специализированных фармацевтических форм (Polkovnikova et al., 2021).

Помимо применения в фармацевтической и пищевой промышленности, технологии инкапсуляции находят ограниченное использование и в других отраслях. Так, в нефтесервисном секторе инкапсуляция применяется преимущественно для создания технических материалов, например замедлителей (брейкеров) при гидроразрыве пласта и реагентов для повышения нефтеотдачи. В России в этом направлении работает компания ООО «ЭКОНО-ТЕХ» (Нижегородская область), которая с 2016 г. управляет специализированным заводом по производству инкапсуляционных материалов для нужд нефтедобычи. Продукция компании поставляется в разные регионы страны и используется крупными корпорациями, такими как ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Лукойл» и др.²¹ Следует подчеркнуть, что данное направление относится к техническому применению и существенно отличается от пищевой и фармацевтической инкапсуляции по материалам, технологиям и целям, поэтому в рамках статьи оно упоминается лишь как дополнительный пример промышленного использования.

¹⁴ Mordor Intelligence. (2025). *Размер и доля рынка пищевых капсул — тенденции роста и прогнозы (2025–2030)*. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/food-encapsulation-market>

¹⁵ Generis Online. (2024). *Understanding environmental regulations in Russia*. <https://generisonline.com/understanding-environmental-regulations-and-compliance-obligations-in-russia/>

¹⁶ PharmPack. (2010). *Из чего производят желатиновые капсулы*. <https://pharmpack.wordpress.com/2010/07/08/из-чего-производят-желатиновые-капсулы/>

¹⁷ Эвалар. *Собственное производство лекарственных препаратов и средств, БАД в России*. <https://corp.evalar.ru/manufacturing/technologies/>

¹⁸ ART Lab. (2025). *Капсулирование: производство капсул*. <https://artlab-russia.ru/capsules>

¹⁹ Grand View Research. (2023). *Размер и тенденции рынка Микрокапсулирования*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/microencapsulation-market>

²⁰ MarketsandMarkets. (2024). *Microencapsulation market size, share, and forecast*.

²¹ Investugra. (2020). *Революция в производстве химических реагентов от ООО «ЭКОНО-ТЕХ»*. <https://investugra.ru/media/news/216260/>

Компания Sibur, крупный игрок в нефтехимическом секторе, начала изучать экологически чистые материалы для упаковки, в частности, в соответствии с глобальными тенденциями в области устойчивого развития. Компания активно сотрудничает с крупными брендами для разработки биоразлагаемых вариантов, что отражает переход к экологическим инновациям в производственных процессах²².

Помимо вышеупомянутых компаний, на рынке инкапсулянтов в России работают и другие производители. К ним относятся Dow Corning Corporation, Henkel AG & KGaA и 3M Company, которые известны своими инновационными разработками и значительным присутствием на мировом рынке. Их присутствие на российском рынке подчеркивает конкурентную природу и ориентацию на передовые материалы, предназначенные для различных областей применения, включая электронику и фармацевтику.

По мере развития рынка эти производители всё больше внимания уделяют исследованиям и разработкам, чтобы создавать новые материалы, соответствующие экологическим нормам и требованиям потребителей, и оставаться лидерами в области технологий инкапсуляции в России^{23,24,25}.

ВЫВОДЫ

Анализ развития технологий показал, что инкапсуляция эволюционировала от классических методов коацервации с использованием желатина и гуммиарабика до современных гибридных подходов, сочетающих распылительную сушку, лиофилизацию и липосомальные системы. Такой прогресс обеспечивает более высокий уровень контроля над размерами и свойствами капсул.

Существующие методы целесообразно классифицировать на физико-химические, химические и физические, при этом на практике широко применяются их комбинации. Это отражает переход от изолированных технологий к комплексным решениям, позволяющим адаптировать процесс под конкретные вещества и условия производства.

Применение инкапсуляции в фармацевтике продемонстрировало значимые результаты: повышение биодоступности противоопухолевых препаратов за счет таргетной доставки, разработку пероральных форм инсулина и создание систем доставки вакцин. Эти направления имеют высокую практическую значимость и отражают современный вектор исследований.

В пищевой промышленности технологии микрокапсулирования обеспечивают стабильность витаминов, пробиотиков и ароматических соединений, что напрямую связано с ростом рынка функциональных продуктов питания. Таким образом, инкапсуляция выступает связующим звеном между наукой о питании и потребительскими запросами на продукты с доказанной пользой.

Для России характерно формирование собственного сегмента рынка: активно работают фармацевтические предприятия («Эвалар» и др.) и производители материалов технического назначения. Вместе с тем выявлены проблемы, такие как ограниченность доступных матриц и зависимость от импортных технологий, что требует усиленного внимания к локализации и разработке отечественных решений. Таким образом, ключевой вызов для России — не догоняющая адаптация, а создание собственных конкурентоспособных решений.

Перспективы дальнейшего развития заключаются в использовании экологичных биополимеров, создании многофункциональных и гибридных систем, а также в стандартизации подходов и терминологии. Достижение этих целей возможно при условии расширения экспериментальной базы, систематизации научных данных и тесного взаимодействия исследователей с промышленностью. Именно это позволит интегрировать отечественные наработки в глобальное научно-производственное пространство.

Вместе с тем требуется дальнейшее проведение экспериментальных исследований, углубленный анализ литературных данных и разработка новых методических подходов, что позволит не только совершенствовать существующие системы инкапсуляции, но и формировать инновационные решения для фармацевтической и пищевой отраслей.

²² The Moscow Times. (2019, August 22). *Russian companies slowly embracing recycled plastics*.

<https://www.themoscowtimes.com/2019/08/22/russian-companies-slowly-embracing-recycled-plastics-a66969>

²³ Research and Markets. (2024). *Рынок инкапсулянтов по типу химического вещества... глобальный прогноз на 2025–2030 годы*.

<https://www.researchandmarkets.com/report/encapsulant>

²⁴ Market Data Forecast. (2024). *Рынок Инкапсуляторов*. <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/encapsulants-market>

²⁵ Longda. *Топ-10 компаний по производству гибкой упаковки... в России*.

<https://longdapac.com/top-10-recyclable-flexible-packaging-companies-in-russia/>

ВКЛАД АВТОРОВ

Вейберов А.В.: Создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации

Губанова М.И.: Контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования

Орел П.О.: Осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных/доказательств

Кирш И.А.: Формулирование замысла/идеи исследования, целей и задач

Банникова О.А.: Разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Anatoliy V. Veiberov: Preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision — including pre- or post-publication stages

Marina I. Gubanova: Oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team

Polina O. Orel: Conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection

Irina A. Kirsh: Ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims

Olga A. Bannikova: Development or design of methodology; creation of models

ЛИТЕРАТУРА

- Адиканова, Д. К. (2016). Получение полимерных суспензий различного целевого назначения методом гетерофазной полимеризации. [Автореферат диссертации кандидата химических наук, КазННТУ им. К. И. Сатпаева]. Алматы
- Астафьева, Б. В., Бабинцев, К. А., Курбонова, М. К., Тютков Н., & Бараненко Д. А. (2022). Исследование термостабильности функционального пробиотического пищевого ингредиента на основе инкапсулированных микроорганизмов *Lactobacillus plantarum* SP-A3. Вестник Международной академии холода, (2), 42–47. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2022-21-2-42-47>
- Базарнова, Ю. Г. (2014). Технология инкапсулирования пищевых ингредиентов. Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности, (S1), 61–63
- Базарнова, Ю. Г., & Москалев, Е. В. (2010). Инкапсулирование композитов натуральных пищевых ингредиентов. Мясная индустрия, (5), 52–56
- Бородина, Т. Н. (2008). Получение и исследование биodeградируемых полиэлектролитных микрокапсул с контролируемым выходом белков, ДНК и других биоактивных соединений [Автореферат диссертации кандидата химических наук, МГУ им. М.В. Ломоносова]. Москва
- Быковская, Е. Е., & Кролевец, А. А. (2012). Применение технологии инкапсулирования в различных отраслях промышленности. Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Физика и химия, (2), 137–140
- Дружинина, Л. С., Евтеев, А. В., Ларионова, О. С., Банникова, А. В., & Евдокимов, И. А. (2017). Получение функциональных ингредиентов с применением принципа инкапсулирования для сохранения нативной структуры биологически активных белков. Молочнохозяйственный вестник, 2 (26), 100–109. <https://doi.org/10.24411/2225-4269-2017-00011>
- Жантлесова, С. (2021). Иммобилизация клеток пробиотических микроорганизмов для разработки функциональных продуктов питания. Международный научно-исследовательский журнал, 3(105)
- Ильина, В. С., Соколова, О. Б., Шуватова, Е. Д., Аллох, П., Мельчаков, Р. М., Лепешкин, А. И., Александрова, И. В., & Бараненко, Д. А. (2023). Способ микроинкапсулирования масел, содержащих полиненасыщенные жирные кислоты, для использования в составе функциональных пищевых продуктов. Ползуновский вестник, (2), 7–14. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.001>
- Какимов, А. К., Бепеева, А. Е., Какимова, Ж. Х., & Хуторянский, В. В. (2016). Обоснование необходимости инкапсулирования пробиотиков. Вестник Алматинского технологического университета, (2), 86–89

- Кролевец, А. А., Тырсин, Ю. А., & Быковская, Е. Е. (2013). Применение нано и микрокапсулирования в фармацевтике и пищевой промышленности. Часть 2. Характеристика инкапсулирования. *Вестник РАЕН*, 13(1), 77–84
- Меньшутин, Н. В. (2014). Технологии инкапсуляции. *Фармацевтические технологии и упаковка*, (5), 30–33
- Семкина О. А., Джавахян М. А., Белошапкина О. М., Громакова А. Н. (2021). Технологические аспекты получения микрокапсул веществ растительного происхождения. *Проблемы биологической, медицинской и фармацевтической химии*, 24(5), 5–14. <https://doi.org/10.29296/25877313-2021-05-01>
- Соколов, А. В., Лимарева, Л. В., Ильясов, П. В. [и др.] (2021). Методы инкапсулирования биомакромолекул и живых клеток. *Журнал органической химии*, 57(4), 457–473. <https://doi.org/10.31857/S0514749221040017>
- Степанова Э.Ф., Ким М.Е., Мурзагулова К.Б., Евсеева С.Б. (2014). Микрокапсулы: перспективы использования в современной фармацевтической практике. *Современные проблемы науки и образования*, 5, 767
- Цепелев, В. Ю., Лазарева, И. А., & Яковлева, Д. Р. (2023). Современные способы доставки антибактериальных средств. *Вестник фармации*, 4(102), 54–60. <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2023.4.54>
- Anal, A. K., & Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. *Trends in Food Science & Technology*, 18(5), 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.01.004>
- Augustin, M. A., & Hemar, Y. (2009). Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients. *Chemical Society Reviews*, 38(4), 902–912. <https://doi.org/10.1039/B801739P>
- Augustin, M. A., & Sanguansri, L. (2015). Challenges and solutions to incorporation of nutraceuticals in foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 6(1), 463–477. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022814-015507>
- Balagani, P. K., Chandiran, I., Bhavya, B., & Manubolu, S. (2011). Microparticulate drug delivery system: A review. *Indian Journal of Pharmaceutical Science and Research*, 1, 19–37
- Benita, S. (Ed.). (2006). Microencapsulation: Methods and industrial applications. *CRC Press*
- Boh Podgornik, B., & Šumiga, B. (2008). Microencapsulation technology and its applications in building construction materials. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 55, 329–344
- Calderón-Oliver, M., & Ponce-Alquicira, E. (2022). The role of microencapsulation in food application. *Molecules*, 27(5), 1499. <https://doi.org/10.3390/molecules27051499>
- Campos, E. V. R., de Oliveira, J. L., Fraccio, L. F., & Singh, B. (2015). Polysaccharides as safer release systems for agrochemicals. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 47–66. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0263-0>
- Carvalho, A. G. S., Silva, M. P., & Hubinger, M. D. (2023). Microencapsulation of plant extracts with antimicrobial properties for food preservation applications. *Food Research International*, 173, 113289. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113289>
- Chaudhary, V., Thakur, N., Kajla, P., Thakur, S., & Punia, S. (2021). Application of encapsulation technology in edible films: Carrier of bioactive compounds. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 734921. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.734921>
- Cui, F., Zhang, H., Wang, D., Tan, X., Li, X., Li, Y., Li, J., & Li, T. (2023). Advances in the preparation and application of microencapsulation to protect food functional ingredients. *Food & Function*, 14(15), 6766–6783. <https://doi.org/10.1039/d3fo01077e>
- Danhier, F. (2016). To exploit the tumor microenvironment: Since the EPR effect fails in the clinic, what is the future of nanomedicine? *Journal of Controlled Release*, 244, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.11.015>
- De Temmerman, M.-L., Rejman, J., Vandenbroucke, R. E., De Cock, L. J., Demeester, J., & De Smedt, S. C. (2011). Particulate vaccines: On the quest for optimal delivery and immune response. *Drug Discovery Today*, 16(13-14), 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2011.04.006>
- Dehghani, F., & Farhadian, N. (2023). Encapsulation: Fluidized bed coating technology. *Principles of Biomaterials Encapsulation : Volume One*, 143–156. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85947-9.00012-1>
- English, M., Okagu, O. D., Stephens, K., Goertzen, A., & Udenigwe, C. C. (2023). Flavour encapsulation: A comparative analysis of relevant techniques, physiochemical characterisation, stability, and food applications. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1019211. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1019211>
- Fonte, P., Araújo, F., Reis, S., & Sarmento, B. (2013). Oral insulin delivery: How far are we? *Journal of Diabetes Science and Technology*, 7(2), 520–531. <https://doi.org/10.1177/193229681300700228>
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voille, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107–1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>

- Ghorbanzade, T., Jafari, S. M., & Akhavan, S., & Hadavi, R. (2017). Nano-encapsulation of fish oil in nano-liposomes and its application in fortification of yogurt. *Food Chemistry*, 216, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.022>
- Gibbs, B. F., Kermasha, S., Alli, I., & Mulligan, C. N. (1999). Encapsulation in the food industry: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 50(3), 213–224. <https://doi.org/10.1080/096374899101256>
- Gómez-Gaete, C., Avendaño-Godoy, J., Escobar-Avello, D., Campos-Requena, V. H., Rogel-Castillo, C., Estevinho, L. M., Martorell, M., Sharifi-Rad, J., & Calina, D. (2024). Revolutionizing fruit juice: exploring encapsulation techniques for bioactive compounds and their impact on nutrition, flavour and shelf life. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00190-9>
- Gonçalves, A., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2016). Microencapsulation of vitamin A: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.001>
- Hu, S., Xu, C., Zhang, Y., Du, Y., Tang, J., & Chen, L. (2024). Preparation of enteric capsules with pulsatile drug delivery potential using pullulan and polyacrylic acid resin III. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(4), 105691. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105691>
- Hurrell, R. F. (2002). Fortification: overcoming technical and practical barriers. *The Journal of Nutrition*, 132(4), 806–812. <https://doi.org/10.1093/jn/132.4.806S>
- Jackson, L. S., & Lee, K. (1991). Microencapsulation and the food industry. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 24(4), 289–297
- Jafari, S. M. (Ed.). (2017). Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries. Academic Press
- Jafari, S. M., & McClements, D. J. (2017). Nanotechnology approaches for increasing nutrient bioavailability. In *Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2016.12.008>
- Kaushik, P., Dowling, K., Barrow, C. J., & Adhikari, B. (2015). Microencapsulation of omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *Journal of Functional Foods*, 19, 868–881. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.06.029>
- Krasaekoopt, W., Bhandari, B., & Deeth, H. (2003). Evaluation of encapsulation techniques of probiotics for yoghurt. *International Dairy Journal*, 13(1), 3–13. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(02\)00155-3](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(02)00155-3)
- Laina, K. T., Drosou, C., Frakolaki, G., & Krokida, M. (2025). Advancing probiotic delivery in functional yogurt: Encapsulation in electrohydrodynamic processing and freeze drying. (2025). *Foods*, 14(8), 1423. <https://doi.org/10.3390/foods14081423>
- Lak, S. N., Ahmed, S., Shamberger, P. J., & Pentzer, E. B. (2022). Encapsulation of hygroscopic liquids via polymer precipitation in non-aqueous emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 628, 605–613. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.08.083>
- Levi, S., Rac, V., Manojlovi, V., Raki, V., Bugarski, B., Flock, T., Krzyczmonik, K. E., & Nedovi, V. (2011). Limonene encapsulation in alginate/poly (vinyl alcohol). *Procedia Food Science*, 1, 1816–1820. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.266>
- Li, Y., Zhang, X., Zhao, Y., Ding, J., & Lin, S. (2018). Investigation on complex coacervation between fish skin gelatin from cold-water fish and gum arabic: Phase behavior, thermodynamic, and structural properties. *Food Research International*, 107, 596–604. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.053>
- Liu, Y., Bhattarai, P., Dai, Z., & Chen, X. (2022). Photothermal therapy and photoacoustic imaging via nanotheranostics in fighting cancer. *Chemical Society Reviews*, 48(7), 2053–2108. <https://doi.org/10.1039/c8cs00618k>
- Malheiros, P. S., Daroit, D. J., & Brandelli, A. (2010). Food applications of liposome-encapsulated antimicrobial peptides. *Trends in Food Science & Technology*, 21(6), 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.03.003>
- Malos, I. G., Pasarin, D., Ghizdareanu, A., & Frunzareanu, B. (2025). A promising approach for the food industry: Enhancing probiotic viability through microencapsulated synbiotics. *Microorganisms*, 13(2), 336. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020336>
- McClements, D. J. (2015). Nanoscale nutrient delivery systems for food applications: Improving bioactive dispersibility, stability, and bioavailability. *Journal of Food Science*, 80(7), 1602–1611. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12919>
- McClements, D. J., & Xiao, H. (2014). Excipient foods: Designing food matrices that improve the oral bioavailability of pharmaceuticals and nutraceuticals. *Food & Function*, 5(7), 1320–1333. <https://doi.org/10.1039/C4FO00100A>
- Metwaly, A. M., Ghoneim, M. M., Eissa, I. H., Elsehemy, I. A., Mostafa, A. E., Hegazy, M. M., Afifi, W. M., & Dou, D. (2021). Traditional ancient Egyptian medicine: A review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5823–5832. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.044>

- Mozafari, M. R., Johnson, C., Hatziantoniou, S., & Demetzos, C. (2008). Nanoliposomes and their applications in food nanotechnology. *Journal of liposome research*, 18(4), 309–327. <https://doi.org/10.1080/08982100802465941>
- Naharros-Molinero, A., Caballo-González, M. Á., de la Mata, F. J., & García-Gallego, S. (2023). Shell formulation in soft gelatin capsules: Design and Characterization. *Advanced Healthcare Materials*, 13(1). <https://doi.org/10.1002/adhm.202302250>
- O'Hagan, D. T., & Rappuoli, R. (2004). Novel approaches to vaccine delivery. *Pharmaceutical Research*, 21(9), 1519–1530. <https://doi.org/10.1023/B:PHAM.0000041443.17935.33>
- Oral, M. O., Derossi, A., Caporizzi, R., & Severini, C. (2021). Analyzing the most promising innovations in food printing. Programmable food texture and 4D foods. *Future Foods*, 4, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100093>
- Polkovnikova, Yu. A., & Kovaleva, N. A. (2021). Modern Research in the Field of Microencapsulation (Review). *Drug Development. Registration*, 10(2), 50–61. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-2-50-61>
- Putney, S. D., & Burke, P. A. (1998). Improving protein therapeutics with sustained-release formulations. *Nature Biotechnology*, 16(2), 153–157. <https://doi.org/10.1038/nbt0298-153>
- Qiao, H., Hu, N., & Bai, J. (2016). Encapsulation of nucleic acids into giant unilamellar vesicles by freeze-thaw: a way protocells may form. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 47(4), 499–510. <https://doi.org/10.1007/s11084-016-9527-9>
- Ramezani Kalmer, R., Karimi, A., Ramezanalizadeh, H., Ghanbari, M., Samandarian, D., Sadjadinia, A., & Moosavi, B. S. (2024). Design and preparation of a novel pullulan hard capsule formulation: A promising green candidate and study of crucial capsule features. *Heliyon*, 10(7), e28969. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28969>
- Ramezani Kalmer, R., Mohammadi Haddadan, M., Azizi, M., Ghanbari, M., Samandarian, D., & Golizadeh, M. (2023). Industrial manufacture of enteric hard capsules using novel formulations based on hypromellose phthalate/gelatin and investigation of pantoprazole release. *ACS Omega*, 8(12), 11293–11303. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08290>
- Ribeiro, A. M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2021). Improvement of vitamin E microencapsulation and release using different biopolymers as encapsulating agents. *Food and Bioproducts Processing*, 130, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.08.008>
- Sethunga, M., Rangani, S. C., Munaweera, I., & Ranaweera, K. K. D. S. (2025). Hybrid nanoencapsulation systems: integrating natural polymers with synthetic nanomaterials for enhanced delivery of bioactive compounds in functional foods. *Nanoscale Advances*, 7(24), 7867–7890. <https://doi.org/10.1039/d5na00751h>
- Sharif, N., Khoshnoudi-Nia, S., & Jafari, S. M. (2020). Nano/microencapsulation of anthocyanins; a systematic review and meta-analysis. *Food Research International*, 132, 109077. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109077>
- Sharma, G. S., Manasagoud, L., Gayathri, P., Zainab Fatima, & Rama Rao, T. (2023). A review on HPMC capsule. *International Journal of Biology Pharmacy and Allied Sciences*, 12, 5137–5153. <https://doi.org/10.31032/ijbpas/2023/12.11.7558>
- Solodova, E., Solovova, N., & Kalmykova, D. (2021). Innovative Industry Development In The Russian Federation. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*, 1978–1985. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2021.09.02.222>
- Sun, Q., Yin, S., He, Y., Cao, Y., & Jiang, C. (2023). Biomaterials and Encapsulation Techniques for Probiotics: Current Status and Future Prospects in Biomedical Applications. *Nanomaterials*, 13(15), 2185. <https://doi.org/10.3390/nano13152185>
- Tressa, A., Singh, A., Pal, R., & Kumar, N. (2025). Novel Nanocarriers Microencapsulation: Current, Patents and Clinical Trials Comprehensive Review. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 15(4), 188–208. <https://doi.org/10.22270/jddt.v15i4.7103>
- Tripathy, S., Verma, D. K., Thakur, M., Patel, A. R., Srivastav, P. P., Singh, S., Chávez-González, M. L., & Aguilar, C. N. (2021). Encapsulated food products as a strategy to strengthen immunity against COVID-19. *Frontiers in Nutrition*, 8, 673174. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.673174>
- Yan, C., Kim, S.-R., Ruiz, D. R., & Farmer, J. R. (2022). Microencapsulation for food applications: A review. *ACS Applied Bio Materials*, 5(12), 5497–5512. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00673>
- Yang, X., Liang, Y., Li, K., Hu, Q., He, J., & Xie, J. (2025). Advances in microencapsulation of flavor substances: Preparation techniques, wall material selection, characterization methods, and applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c11399>

- Zhuravlev, R. A., Tamova, M. Yu., Bugayets, N. A., Poznyakovskiy, V. M., & Penov, N. D. (2017). Innovative encapsulation technology of food systems using a by-product of dairy production. *Foods and Raw Materials*, 5(1), 81–89. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-81-89>
- Zuidam, N. J., & Nedovic, V. (Eds.). (2010). *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1008-0>

REFERENCES

- Adikanova, D. K. (2016). Preparation of polymer suspensions for various purposes by heterogeneous polymerization. [Abstract of a PhD thesis in Chemical Sciences, Satbayev University]. Almaty.
- Anal, A. K., & Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. *Trends in Food Science & Technology*, 18(5), 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.01.004>
- Astafyeva, B. V., Babintsev, K. A., Kurbonova, M. K., Tyutkov, N., & Baranenko, D. A. (2022). Study of thermal stability of a functional probiotic food ingredient based on encapsulated microorganisms *Lactobacillus plantarum* SP-A3. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, (2), 42–47. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2022-21-2-42-47>
- Augustin, M. A., & Hemar, Y. (2009). Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients. *Chemical Society Reviews*, 38(4), 902–912. <https://doi.org/10.1039/B801739P>
- Augustin, M. A., & Sanguansri, L. (2015). Challenges and solutions to incorporation of nutraceuticals in foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 6(1), 463–477. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022814-015507>
- Balagani, P. K., Chandiran, I., Bhavya, B., & Manubolu, S. (2011). Microparticulate drug delivery system: A review. *Indian Journal of Pharmaceutical Science and Research*, 1, 19–37
- Bazarnova, Yu. G. (2014). Technology of food ingredient encapsulation. *Problems of Economics and Management in Trade and Industry*, (S1), 61–63
- Bazarnova, Yu. G., & Moskalev, E. V. (2010). Encapsulation of natural food ingredient composites. *Meat Industry*, (5), 52–56
- Benita, S. (Ed.). (2006). *Microencapsulation: Methods and industrial applications*. CRC Press
- Boh Podgornik, B., & Šumiga, B. (2008). Microencapsulation technology and its applications in building construction materials. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 55, 329–344
- Borodina, T. N. (2008). Preparation and study of biodegradable polyelectrolyte microcapsules with controlled release of proteins, DNA, and other bioactive compounds [Abstract of a PhD thesis in Chemical Sciences, Lomonosov Moscow State University]. Moscow
- Bykovskaya, E. E., & Krolevec, A. A. (2012). Application of encapsulation technology in various industries. Proceedings of the South-West State University. *Series: Physics and Chemistry*, (2), 137–140
- Calderón-Oliver, M., & Ponce-Alquicira, E. (2022). The role of microencapsulation in food application. *Molecules*, 27(5), 1499. <https://doi.org/10.3390/molecules27051499>
- Campos, E. V. R., de Oliveira, J. L., Fraccio, L. F., & Singh, B. (2015). Polysaccharides as safer release systems for agrochemicals. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 47–66. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0263-0>
- Carvalho, A. G. S., Silva, M. P., & Hubinger, M. D. (2023). Microencapsulation of plant extracts with antimicrobial properties for food preservation applications. *Food Research International*, 173, 113289. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113289>
- Chaudhary, V., Thakur, N., Kajla, P., Thakur, S., & Punia, S. (2021). Application of encapsulation technology in edible films: Carrier of bioactive compounds. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 734921. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.734921>
- Cui, F., Zhang, H., Wang, D., Tan, X., Li, X., Li, Y., Li, J., & Li, T. (2023). Advances in the preparation and application of microencapsulation to protect food functional ingredients. *Food & Function*, 14(15), 6766–6783. <https://doi.org/10.1039/d3fo01077e>
- Danhier, F. (2016). To exploit the tumor microenvironment: Since the EPR effect fails in the clinic, what is the future of nanomedicine? *Journal of Controlled Release*, 244, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.11.015>

- De Temmerman, M.-L., Rejman, J., Vandenbroucke, R. E., De Cock, L. J., Demeester, J., & De Smedt, S. C. (2011). Particulate vaccines: On the quest for optimal delivery and immune response. *Drug Discovery Today*, 16(13-14), 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2011.04.006>
- Dehghani, F., & Farhadian, N. (2023). Encapsulation: Fluidized bed coating technology. *Principles of Biomaterials Encapsulation : Volume One*, 143–156. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85947-9.00012-1>
- Druzhinina, L. S., Evteev, A. V., Larionova, O. S., Bannikova, A. V., & Evdokimov, I. A. (2017). Production of functional ingredients using encapsulation principles to preserve the native structure of biologically active proteins. *Dairy Industry Bulletin*, 2 (26), 100–109. <https://doi.org/10.24411/2225-4269-2017-00011>
- English, M., Okagu, O. D., Stephens, K., Goertzen, A., & Udenigwe, C. C. (2023). Flavour encapsulation: A comparative analysis of relevant techniques, physiochemical characterisation, stability, and food applications. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1019211. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1019211>
- Fonte, P., Araújo, F., Reis, S., & Sarmento, B. (2013). Oral insulin delivery: How far are we? *Journal of Diabetes Science and Technology*, 7(2), 520–531. <https://doi.org/10.1177/193229681300700228>
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9), 1107–1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>
- Ghorbanzade, T., Jafari, S. M., & Akhavan, S., & Hadavi, R. (2017). Nano-encapsulation of fish oil in nano-liposomes and its application in fortification of yogurt. *Food Chemistry*, 216, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.022>
- Gibbs, B. F., Kermasha, S., Alli, I., & Mulligan, C. N. (1999). Encapsulation in the food industry: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 50(3), 213–224. <https://doi.org/10.1080/096374899101256>
- Gómez-Gaete, C., Avendaño-Godoy, J., Escobar-Avello, D., Campos-Requena, V. H., Rogel-Castillo, C., Estevinho, L. M., Martorell, M., Sharifi-Rad, J., & Calina, D. (2024). Revolutionizing fruit juice: exploring encapsulation techniques for bioactive compounds and their impact on nutrition, flavour and shelf life. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00190-9>
- Gonçalves, A., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2016). Microencapsulation of vitamin A: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.001>
- Hu, S., Xu, C., Zhang, Y., Du, Y., Tang, J., & Chen, L. (2024). Preparation of enteric capsules with pulsatile drug delivery potential using pullulan and polyacrylic acid resin III. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(4), 105691. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105691>
- Hurrell, R. F. (2002). Fortification: overcoming technical and practical barriers. *The Journal of Nutrition*, 132(4), 806–812. <https://doi.org/10.1093/jn/132.4.806S>
- Ilyina, V. S., Sokolova, O. B., Shuvalova, E. D., Allokh, P., Melchakov, R. M., Lepeshkin, A. I., Alexandrova, I. V., & Baranenko, D. A. (2023). Method for microencapsulation of oils containing polyunsaturated fatty acids for use in functional foods. *Polzunovskiy Vestnik*, (2), 7–14. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.001>
- Jackson, L. S., & Lee, K. (1991). Microencapsulation and the food industry. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 24(4), 289–297
- Jafari, S. M. (Ed.). (2017). Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries. *Academic Press*
- Jafari, S. M., & McClements, D. J. (2017). Nanotechnology approaches for increasing nutrient bioavailability. In *Advances in Food and Nutrition Research*. *Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2016.12.008>
- Kakimov, A. K., Bepeeva, A. E., Kakimova, Zh. Kh., & Khutoryansky, V. V. (2016). Justification of the need for probiotic encapsulation. *Bulletin of the Almaty Technological University*, (2), 86–89
- Kaushik, P., Dowling, K., Barrow, C. J., & Adhikari, B. (2015). Microencapsulation of omega-3 fatty acids: A review of microencapsulation and characterization methods. *Journal of Functional Foods*, 19, 868–881. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.06.029>
- Krasaekoopt, W., Bhandari, B., & Deeth, H. (2003). Evaluation of encapsulation techniques of probiotics for yogurt. *International Dairy Journal*, 13(1), 3–13. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(02\)00155-3](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(02)00155-3)
- Krolevec, A. A., Tyrsin, Yu. A., & Bykovskaya, E. E. (2013). Application of nano- and microencapsulation in pharmaceuticals and the food industry. Part 2. *Characteristics of encapsulation*. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, 13(1), 77–84

- Laina, K. T., Drosou, C., Frakolaki, G., & Krokida, M. (2025). Advancing probiotic delivery in functional yogurt: Encapsulation in electrohydrodynamic processing and freeze drying. (2025). *Foods*, 14(8), 1423. <https://doi.org/10.3390/foods14081423>
- Lak, S. N., Ahmed, S., Shamberger, P. J., & Pentzer, E. B. (2022). Encapsulation of hygroscopic liquids via polymer precipitation in non-aqueous emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 628, 605–613. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.08.083>
- Levi, S., Rac, V., Manojlovi, V., Raki, V., Bugarski, B., Flock, T., Krzyczmonik, K. E., & Nedovi, V. (2011). Limonene encapsulation in alginate/poly (vinyl alcohol). *Procedia Food Science*, 1, 1816–1820. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.266>
- Li, Y., Zhang, X., Zhao, Y., Ding, J., & Lin, S. (2018). Investigation on complex coacervation between fish skin gelatin from cold-water fish and gum arabic: Phase behavior, thermodynamic, and structural properties. *Food Research International*, 107, 596–604. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.053>
- Liu, Y., Bhattarai, P., Dai, Z., & Chen, X. (2022). Photothermal therapy and photoacoustic imaging via nanotheranostics in fighting cancer. *Chemical Society Reviews*, 48(7), 2053–2108. <https://doi.org/10.1039/c8cs00618k>
- Malheiros, P. S., Daroit, D. J., & Brandelli, A. (2010). Food applications of liposome-encapsulated antimicrobial peptides. *Trends in Food Science & Technology*, 21(6), 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.03.003>
- Malos, I. G., Pasarin, D., Ghizdareanu, A., & Frunzareanu, B. (2025). A promising approach for the food industry: Enhancing probiotic viability through microencapsulated synbiotics. *Microorganisms*, 13(2), 336. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020336>
- McClements, D. J. (2015). Nanoscale nutrient delivery systems for food applications: Improving bioactive dispersibility, stability, and bioavailability. *Journal of Food Science*, 80(7), 1602–1611. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12919>
- McClements, D. J., & Xiao, H. (2014). Excipient foods: Designing food matrices that improve the oral bioavailability of pharmaceuticals and nutraceuticals. *Food & Function*, 5(7), 1320–1333. <https://doi.org/10.1039/C4FO00100A>
- Menshutina, N. V. (2014). Encapsulation technologies. *Pharmaceutical Technologies & Packaging*, (5), 30–33
- Metwaly, A. M., Ghoneim, M. M., Eissa, I. H., Elsehemy, I. A., Mostafa, A. E., Hegazy, M. M., Afifi, W. M., & Dou, D. (2021). Traditional ancient Egyptian medicine: A review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5823–5832. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.044>
- Mozafari, M. R., Johnson, C., Hatziantoniou, S., & Demetzos, C. (2008). Nanoliposomes and their applications in food nanotechnology. *Journal of liposome research*, 18(4), 309–327. <https://doi.org/10.1080/08982100802465941>
- Naharros-Molinero, A., Caballo-González, M. Á., de la Mata, F. J., & García-Gallego, S. (2023). Shell formulation in soft gelatin capsules: Design and Characterization. *Advanced Healthcare Materials*, 13(1). <https://doi.org/10.1002/adhm.202302250>
- O'Hagan, D. T., & Rappuoli, R. (2004). Novel approaches to vaccine delivery. *Pharmaceutical Research*, 21(9), 1519–1530. <https://doi.org/10.1023/B:PHAM.0000041443.17935.33>
- Oral, M. O., Derossi, A., Caporizzi, R., & Severini, C. (2021). Analyzing the most promising innovations in food printing. Programmable food texture and 4D foods. *Future Foods*, 4, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100093>
- Polkovnikova, Yu. A., & Kovaleva, N. A. (2021). Modern Research in the Field of Microencapsulation (Review). *Drug Development. Registration*, 10(2), 50–61. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-2-50-61>
- Putney, S. D., & Burke, P. A. (1998). Improving protein therapeutics with sustained-release formulations. *Nature Biotechnology*, 16(2), 153–157. <https://doi.org/10.1038/nbt0298-153>
- Qiao, H., Hu, N., & Bai, J. (2016). Encapsulation of nucleic acids into giant unilamellar vesicles by freeze-thaw: a way protocells may form. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 47(4), 499–510. <https://doi.org/10.1007/s11084-016-9527-9>
- Ramezani Kalmer, R., Karimi, A., Ramezanalizadeh, H., Ghanbari, M., Samandarian, D., Sadjadinia, A., & Moosavi, B. S. (2024). Design and preparation of a novel pullulan hard capsule formulation: A promising green candidate and study of crucial capsule features. *Heliyon*, 10(7), e28969. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28969>
- Ramezani Kalmer, R., Mohammadi Haddadan, M., Azizi, M., Ghanbari, M., Samandarian, D., & Golizadeh, M. (2023). Industrial manufacture of enteric hard capsules using novel formulations based on hypromellose phthalate/gelatin and investigation of pantoprazole release. *ACS Omega*, 8(12), 11293–11303. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08290>
- Ribeiro, A. M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2021). Improvement of vitamin E microencapsulation and release using different biopolymers as encapsulating agents. *Food and Bioproducts Processing*, 130, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.08.008>

- Semkina, O. A., Dzhevakhyan, M. A., Beloshapkina, O. M., Gromakova, A. N. (2021). Technological aspects of obtaining microcapsules of plant origin substances. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 24(5), 5–14. <https://doi.org/10.29296/25877313-2021-05-01>
- Sethunga, M., Rangani, S. C., Munaweera, I., & Ranaweera, K. K. D. S. (2025). Hybrid nanoencapsulation systems: integrating natural polymers with synthetic nanomaterials for enhanced delivery of bioactive compounds in functional foods. *Nanoscale Advances*, 7(24), 7867–7890. <https://doi.org/10.1039/d5na00751h>
- Sharif, N., Khoshnoudi-Nia, S., & Jafari, S. M. (2020). Nano/microencapsulation of anthocyanins; a systematic review and meta-analysis. *Food Research International*, 132, 109077, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109077>
- Sharma, G. S., Manasagoud, L., Gayathri, P., Zainab Fatima, & Rama Rao, T. (2023). A review on HPMC capsule. *International Journal of Biology Pharmacy and Allied Sciences*, 12, 5137–5153. <https://doi.org/10.31032/ijbpas/2023/12.11.7558>
- Sokolov, A. V., Limareva, L. V., Ilyasov, P. V. [et al.] (2021). Methods of encapsulating biomacromolecules and living cells. *Journal of Organic Chemistry*, 57(4), 457–473. <https://doi.org/10.31857/S0514749221040017>
- Solodova, E., Solovova, N., & Kalmykova, D. (2021). Innovative Industry Development In The Russian Federation. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*, 1978–1985. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2021.09.02.222>
- Stepanova, E. F., Kim, M. E., Murzagulova, K. B., Evseeva, S. B. (2014). Microcapsules: prospects for use in modern pharmaceutical practice. *Modern Problems of Science and Education*, 5, 767
- Sun, Q., Yin, S., He, Y., Cao, Y., & Jiang, C. (2023). Biomaterials and Encapsulation Techniques for Probiotics: Current Status and Future Prospects in Biomedical Applications. *Nanomaterials*, 13(15), 2185. <https://doi.org/10.3390/nano13152185>
- Tressa, A., Singh, A., Pal, R., & Kumar, N. (2025). Novel Nanocarriers Microencapsulation: Current, Patents and Clinical Trials Comprehensive Review. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 15(4), 188–208. <https://doi.org/10.22270/jddt.v15i4.7103>
- Tripathy, S., Verma, D. K., Thakur, M., Patel, A. R., Srivastav, P. P., Singh, S., Chávez-González, M. L., & Aguilar, C. N. (2021). Encapsulated food products as a strategy to strengthen immunity against COVID-19. *Frontiers in Nutrition*, 8, 673174. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.673174>
- Tsepelev, V. Yu., Lazareva, I. A., & Yakovleva, D. R. (2023). Modern methods of antibacterial agent delivery. *Bulletin of Pharmacy*, 4(102), 54–60. <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2023.4.54>
- Yan, C., Kim, S.-R., Ruiz, D. R., & Farmer, J. R. (2022). Microencapsulation for food applications: A review. *ACS Applied Bio Materials*, 5(12), 5497–5512. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00673>
- Yang, X., Liang, Y., Li, K., Hu, Q., He, J., & Xie, J. (2025). Advances in microencapsulation of flavor substances: Preparation techniques, wall material selection, characterization methods, and applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c11399>
- Zhanlesova, S. (2021). Immobilization of probiotic microorganisms cells for the development of functional foods. *International Research Journal*, 3(105).
- Zhuravlev, R. A., Tamova, M. Yu., Bugayets, N. A., Poznyakovskiy, V. M., & Penov, N. D. (2017). Innovative encapsulation technology of food systems using a by-product of dairy production. *Foods and Raw Materials*, 5(1), 81–89. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-81-89>
- Zuidam, N. J., & Nedovic, V. (Eds.). (2010). *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1008-0>