

ISSN 1560-9278

eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 28, № 2 (апрель – июнь), 2025 г.

БИОТЕХНОЛОГИЯ
ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ
И БИОЛОГИЧЕСКИ
АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ



BIOTECHNOLOGY
OF FOOD PRODUCTS
& BIOLOGICALLY
ACTIVE SUBSTANCES

FOOD SYSTEMS

Vestnik of MSTU

SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 28, N 2 (April – June), 2025

16+

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

**ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 28, № 2 (апрель – июнь), 2025 г.**



Vestnik of MSTU

**SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 28, N 2 (April – June), 2025**

**Мурманск
2025**

ВЕСТНИК МГТУ
Том 28, № 2 (апрель – июнь), 2025 г.
Научный журнал
Издается с января 1998 г.
Выходит один раз в три месяца

Учредитель
ФГАОУ ВО «Мурманский арктический
университет»
Главный редактор
Шокина Ю. В., д-р техн. наук,
профессор (Мурманск, Россия)

Редакционная коллегия
по направлению «Биотехнология продуктов
питания и биологически активных веществ.
Пищевые системы»

Члены редакционной коллегии:
Алексеев Г. В., д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербург, Россия)
Бредихин С. А., д-р техн. наук, доцент
(Москва, Россия)
Деркач С. Р., д-р хим. наук, профессор
(Мурманск, Россия)
Донская Г. А., д-р биол. наук, доцент
(Москва, Россия)
Красуля О. Н., д-р техн. наук, профессор
(Москва, Россия)
Мезенова О. Я., д-р техн. наук, профессор
(Калининград, Россия)
Мингалеева З. Ш., д-р техн. наук, доцент
(Казань, Россия)
Остроухова Е. В., д-р техн. наук, доцент
(Ялта, Россия)
Пеленко В. В., д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербург, Россия)
Решетник Е. И., д-р техн. наук, профессор
(Благовещенск, Россия)
Савенкова Т. В., д-р техн. наук, профессор
(Москва, Россия)
Толсторебров И. Н., д-р наук
(Тронхейм, Норвегия)

Адрес редакции
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13.
Тел.: (8152) 40-33-56.
Тел./факс: (8152) 21-38-01, 45-27-52.
E-mail: redvst@mauniver.ru

VESTNIK OF MSTU
Volume 28, N 2 (April – June), 2025
Scientific journal
Published since January 1998
Issued quarterly

Founder
FSAEI HE «Murmansk Arctic University»
Editor-in-Chief
Shokina Yu. V., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Murmansk, Russia)

The Editorial Board
(Biotechnology of food products & biologically
active substances. Food systems)

The Editorial Board Members:
Alexeev G. V., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Saint-Petersburg, Russia)
Bredikhin S. A., Dr Sci. (Engineering),
Ass. Professor (Moscow, Russia)
Derkach S. R., Dr Sci. (Chemistry),
Professor (Murmansk, Russia)
Donskaya G. A., Dr Sci. (Biology),
Ass. Professor (Moscow, Russia)
Krasulya O. N., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Moscow, Russia)
Mezenova O. Ya., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Kaliningrad, Russia)
Mingaleeva Z. Sh., Dr Sci. (Engineering),
Ass. Professor (Kazan, Russia)
Ostroukhova E. V., Dr Sci. (Engineering),
Ass. Professor (Yalta, Russia)
Pelenko V. V., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Saint-Petersburg, Russia)
Reshetnik E. I., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Blagoveshchensk, Russia)
Savenkova T. V., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Moscow, Russia)
Tolstorebrov I. N., Dr Sci.
(Trondheim, Norway)

The Editorial Office address
Sportivnaya Str., 13,
183010, Murmansk, RUSSIA.
Phone: (8152) 40-33-56.
Phone/Fax: (8152) 21-38-01, 45-27-52.
E-mail: redvst@mauniver.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Биотехнология пищевых продуктов и биологически активных веществ

Валиева Ш. С., Тихонов С. Л., Тихонова Н. В., Тимофеева М. С., Шихалев С. В. Создание устойчивой к протеолизу пептидной последовательности пищевого рекомбинатного белка GDF-11 и синтез плазмиды для его экспрессии в <i>E. coli</i>	143
Грибкова В. А., Митрошина Д. П., Славянский А. А., Николаева Н. В., Литвяк В. В., Шилов В. В. Разработка пищевых продуктов на основе циклодекстринов.....	151
Иванова Д. А., Тарабанова Е. В. Разработка рецептур функциональных мучных кондитерских изделий с использованием альтернативных белковых компонентов.....	164
Сынгеева Э. В., Ламажапова Г. П. Биоактивные соединения в экстрактах из листьев облепихи и смородины: от химического состава до практического применения.....	175

Пищевые системы

Дубкова Н. З., Харьков В. В., Шакирова Г. К. Исследование влияния порошка из черники на качество хлебобулочного изделия.....	186
Иванова Н. Г., Волконская А. А. Технология производства хлебных палочек для питания женщин в периоды прегравидарной подготовки, беременности и лактации.....	198
Игонина Е. Д., Чернова А. В., Казимирченко О. В. Обоснование возможности сохранения гречневой закваски методом криоконсервирования.....	210
Карпенко Д. В., Мойсяк М. Б., Лялина М. С., Панеш М. К., Аннакулиева М., Воропаева А. С. Оценка возможности использования отечественного вкусоароматического сырья в производстве пивных напитков.....	219
Савкина К. Н., Щетинский В. В., Тихонова П. А., Шокина Ю. В. Разработка технологии нового мучного кулинарного рыбного изделия, обогащенного йодом ламинарии беломорской.....	231
Фоменко О. С., Рудик Ф. Я. Анализ качественных и технико-экономических показателей технологии производства пакетированных мясокостных бульонов длительного хранения.....	244

Процессы и аппараты пищевых производств

Ермолаев В. А., Бондарчук О. Н., Махачева Е. В. Исследование процессов вакуумной сушки икры.....	252
Харьков В. В., Лаврова К. З. Численное исследование процесса распылительной сушки молока...	263

Обзорные статьи

Бурак Л. Ч. Современные методы бланширования и их влияние на процесс сушки фруктов и овощей.....	273
Бычкова Т. С., Крутина Е. М., Дягилева Ю. А. Роль ферментов молочнокислых бактерий в формировании антиоксидантного потенциала кисломолочных продуктов.....	296
Скородумов А. С., Нестеров Е. Д., Горн Д. С., Барканов А. В., Шаненко Е. Ф. Перспективы использования инулина и его модификаций в пищевой, косметической и фармацевтической отраслях промышленности.....	312

C O N T E N T S

Biotechnology of food products and biologically active substances

Valieva Sh. S., Tikhonov S. L., Tikhonova N. V., Timofeeva M. S., Shikhalev S. V. Construction of a proteolysis-resistant peptide sequence of the food recombinant protein GDF-11 and plasmid synthesis for its expression in <i>E. coli</i>	143
Gribkova V. A., Mitroshina D. P., Slavyanskiy A. A., Nikolaeva N. V., Litvyak V. V., Shilov V. V. Development of food products based on cyclodextrins.....	151
Ivanova D. A., Tarabanova E. V. Modeling of flour confectionery recipes using alternative functional components.....	164
Syngeeva E. V., Lamazhapova G. P. Bioactive compounds in extracts from sea buckthorn and currant leaves: From chemical composition to practical application.....	175

Food systems

Dubkova N. Z., Kharkov V. V., Shakirova G. K. Study on effect of blueberry powder on quality of bakery products.....	186
Ivanova N. G., Volkonskaya A. A. Breadstick technology for women nutrition during preconception preparation, pregnancy and lactation periods.....	198
Igonina E. D., Chernova A. V., Kazimirchenko O. V. Justification of the possibility of preserving buckwheat starter by cryopreservation method.....	210
Karpenko D. V., Moiseyak M. B., Lyalina M. S., Panesh M. K., Annagulyyeva M., Voropaeva A. S. Evaluation of the possibility of using domestic flavoring and aromatic compounds in the production of beer drinks.....	219
Savkina K. N., Cshetinsky V. V., Tihonova P. A., Shokina Yu. V. Development of the technology of a new flour culinary fish product enriched with iodine of the White Sea kelp.....	231
Fomenko O. S., Rudik F. Ya. Analysis of quality and technical and economic indicators of the technology for the production of packaged meat and bone broths with long shelf life.....	244

Food production processes and equipment

Ermolaev V. A., Bondarchuk O. N., Makhacheva E. V. Research of caviar vacuum drying processes...	252
Kharkov V. V., Lavrova K. Z. Simulation of milk spray drying.....	263

Review articles

Burak L. Ch. Modern methods of blanching and their influence on the process of drying fruits and vegetables.....	273
Bychkova T. S., Krutina E. M., Diaghileva Yu. A. Role of lactic acid bacterial enzymes in forming antioxidant potential of fermented milk products.....	296
Skorodumov A. S., Nesterov E. D., Gorn D. S., Barkanov A. V., Shanenko E. F. Prospects for the use of inulin and its modifications in the food, cosmetic and pharmaceutical industries.....	312

УДК 543.645.6

Создание устойчивой к протеолизу пептидной последовательности пищевого рекомбинатного белка GDF-11 и синтез плазмиды для его экспрессии в *E. coli*

Ш. С. Валиева, С. Л. Тихонов*, Н. В. Тихонова, М. С. Тимофеева, С. В. Шихалев

*Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург, Россия;
e-mail: tihonov75@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4863-9834>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
11.11.2024;

принята
к публикации
02.12.2024

Ключевые слова:

белок,
пептидная
последовательность,
гепатотоксичность,
цитотоксичность,
аллергенность,
протеолиз

Белок GDF-11 оказывает положительное воздействие на животных и человека при воспалительных и инфекционных процессах, регенерации и омоложении, его высокая экспрессия наблюдается во многих органах и тканях. Отмечена актуальность проблемы перорального применения многих белков и пептидов, в том числе белка GDF-11, в качестве лекарственных препаратов и в составе продуктов специализированного и функционального назначения. Целью исследований является разработка устойчивой к протеолизу пептидной последовательности белка GDF-11 с виртуальным скринингом ее токсичности, аллергенности, уникальности с последующим синтезом соответствующей плазмиды для экспрессии белка в *E. coli*. В качестве объектов исследования использовали белок GDF-11, плазмиды pET-25b(+) для экспрессии в *E. coli* с пептидной последовательностью CTVDCCFFECFAFGCWDC. Из олигонуклеотидов методом циклической сборки провели синтез гена белка GDF-11 с последовательностью CTVDCCFFECFAFGCWDC. Полученную последовательность плазмиды, кодирующую новый белок GDF-11, обработали эндонуклеазами рестрикции BamHI и XhoI и клонировали в вектор pET-25b(+) для экспрессии *E. coli*. Клоны отсекали методом Сэнгера. Методом MALDI-TOF MS Ultraflex исследовали распределение и идентификацию праймеров в полученной последовательности. Разработана новая уникальная пептидная последовательность CTVDCCFFECFAFGCWDC с циклизацией по связям C1-C4, C1-C2, C1-C3 белка GDF-11, позволяющая повысить его устойчивость к протеолизу и, соответственно, открывающая возможность перорального применения в составе продуктов питания профилактического назначения. На основании виртуального скрининга установлено, что новая пептидная цепочка CTVDCCFFECFAFGCWDC белка GDF-11 не токсична в отношении сердечно-сосудистой и нервной систем, не гепатотоксична, не обладает цитотоксичностью, аллергенностью и характеризуется высоким плазменным клиренсом и средним периодом полувыведения.

Для цитирования

Валиева Ш. С. и др. Создание устойчивой к протеолизу пептидной последовательности пищевого рекомбинатного белка GDF-11 и синтез плазмиды для его экспрессии в *E. coli*. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 143–150. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-143-150>.

Construction of a proteolysis-resistant peptide sequence of the food recombinant protein GDF-11 and plasmid synthesis for its expression in *E. coli*

Sholpan S. Valieva, Sergey L. Tikhonov*, Natalia V. Tikhonova,
Maria S. Timofeeva, Sergey V. Shikhalev

*Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia;
e-mail: tihonov75@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4863-9834>

Article info

Received
11.11.2024;

accepted
02.12.2024

Key words:

protein,
peptide sequence,
hepatotoxicity,
cytotoxicity,
allergenicity,
proteolysis

Abstract

The GDF-11 protein has a positive effect on animals and humans in inflammatory and infectious processes, regeneration and rejuvenation, its high expression is observed in many organs and tissues. The relevance of the problem of oral use of many proteins and peptides, including the GDF-11 protein, as drugs and in specialized and functional products is noted. The aim of the research is to develop a proteolysis-resistant peptide sequence of the GDF-11 protein with virtual screening of its toxicity, allergenicity, uniqueness with subsequent synthesis of the corresponding plasmid for protein expression in *E. coli*. The GDF-11 protein, pET-25b(+) plasmids for expression in *E. coli* with the peptide sequence CTVDCCFFECFAFGCWDC have been used as objects of study. The GDF-11 protein gene with the sequence CTVDCCFFECFAFGCWDC has been synthesized from oligonucleotides using the cyclic assembly method. The obtained plasmid sequence encoding the new GDF-11 protein has been treated with restriction endonucleases BamHI and XhoI and cloned into the pET-25b(+) vector for *E. coli* expression. The clones have been sequenced by the Sanger method. The distribution and identification of primers in the obtained sequence have been studied by the MALDI-TOF MS Ultraflex method. A new unique peptide sequence CTVDCCFFECFAFGCWDC with cyclization at the C1-C4, C1-C2, C1-C3 bonds of the GDF-11 protein is developed, which allows increasing its resistance to proteolysis and, accordingly, opens up the possibility of oral use in prophylactic food products. Based on virtual screening, it is established that the new peptide chain CTVDCCFFECFAFGCWDC of the GDF-11 protein is not toxic to the cardiovascular and nervous systems, is not hepatotoxic, does not have cytotoxicity, does not have allergenicity and is characterized by high plasma clearance and an average half-life.

For citation

Valieva, Sh. S. et al. 2025. Construction of a proteolysis-resistant peptide sequence of the food recombinant protein GDF-11 and plasmid synthesis for its expression in *E. coli*. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 143–150. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-143-150>.

Введение

Одним из представителей суперсемейства белков TGF- β является белок GDF-11, известный как фактор роста и дифференцировки – костный морфогенетический белок (BMP-11). Этот белок был открыт в 1999 г. Накасимой и др. (Nakashima *et al.*, 1999). В исследованиях, проведенных Макферроном и др. (McPherron *et al.*, 1999), установлен ген, кодирующий белок. Открытый ген находится в 12 хромосоме (12q13.2). Структура белка GDF-11 включает 136 аминокислот в мономерной форме (Poggioli *et al.*, 2016).

В результате гидролиза молекулы предшественника белка фурином (Suh *et al.*, 2020) образуется зрелая форма белка с нековалентными N-концевыми про- и C-концевыми доменами. За счет дисульфидных и межцепочных мостиков белок GDF-11 является гомодимером с молекулярной массой 32,6 кДа и третичной структурой, которая включает β -лист, цистеиновый узел и α -спираль (Pepinsky *et al.*, 2017; Padyana *et al.*, 2016).

Экспрессируется GDF-11 во многих органах и тканях, в частности, в головном и спинном мозге, кишечнике, селезенке, сердце, крови, скелетной мускулатуре и др. Уровень экспрессии различается в зависимости от типа и происхождения клеток (Jamaïyar *et al.*, 2017). Анализ, проведенный Коузом и др. (Cox *et al.*, 2019), показал высокую экспрессию GDF-11 в костях черепа эмбрионов мышей. Согласно данным, представленным на платформе PeptideAtlas¹, высокая экспрессия белка отмечена у взрослого человека в коре головного мозга, надпочечниках и мягких тканях.

Впервые роль GDF-11 как фактора передачи сигналов в клетке при воспалительном процессе, его значение в регенерации и омоложении организма отметили в 1999 г. (Moses *et al.*, 2016). Вместе с тем механизм действия GDF-11 при воспалении в ответной реакции организма на инфекционный процесс, действие токсинов и факторов, повреждающих клетки, полностью не раскрыт. Однако известно, что GDF-11 ослабляет образование воспалительной микросреды путем регуляции высвобождения интерлейкинов, в частности, IL-6, IL-1 β , а также снижения накопления активных форм кислорода – H₂O₂, NO (Janakiram *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2018).

В эксперименте на лабораторных животных (Wang *et al.*, 2018) установлено, что введение белка в дозе 0,6 мг/кг каждые 2 дня в брюшную полость мышей с экспериментальным колитом снижало потерю веса и клинические симптомы. На гистопрепаратах толстой кишки показано, что GDF-11 ослабляет гистопатологические изменения, в частности, разрушение крипт, потерю бокаловидных клеток, инфильтрацию моноцитов, повреждение слизистой оболочки и некроз, как в контрольной группе мышей без инъекции GDF-11.

Следует отметить, что актуальным остается проблема перорального применения многих белков и пептидов, в том числе белка GDF-11, в качестве лекарственных препаратов и в составе продуктов специализированного и функционального назначения, так как вещества белковой природы, поступая в желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), подвергаются протеолитическому гидролизу и их биологическая активность снижается или полностью теряется (Wang *et al.*, 2022).

Повысить устойчивость белков к протеолизу и, соответственно, обеспечить необходимую биодоступность возможно за счет сшивок структуры белка, а именно путем образования дисульфидных мостиков или увеличения их количества (Qin *et al.*, 2023).

Целью исследований является разработка устойчивой к протеолизу пептидной последовательности белка GDF-11 с виртуальным скринингом ее токсичности, аллергенности, уникальности с последующим синтезом соответствующей плазмиды для экспрессии белка в *E. coli*.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали белок GDF-11, плазмиды pET-25b(+) для экспрессии в *E. coli* с пептидной последовательностью CTVDCCFFECFAFGCWDC. Антигенность (аллергенность) пептида оценивали по программе². Виртуальный скрининг токсичности сшитой пептидной последовательности проводили с помощью платформы Admet ab 3³. Уникальность пептидной последовательности определяли на платформе PeptideAtlas⁴.

Из олигонуклеотидов методом циклической сборки провели синтез гена белка GDF-11 с последовательностью CTVDCCFFECFAFGCWDC. Предварительно были синтезированы комплементарные цепи гена олигонуклеотиды, перекрывающиеся участками от 20–30 пар оснований. Для заполнения промежутков между олигонуклеотидами были построены цепи с использованием ДНК-полимеразы. На последнем этапе сконструированный ген амплифицировался путем стандартной ПЦР. Полученную последовательность плазмиды, кодирующую новый белок GDF-11, обработали эндонуклеазами рестрикции

¹ <https://db.systemsbiology.net/sbeams/cgi/PeptideAtlas/Search>.

² <http://imed.med.ucm.es/Tools/antigenic.pl> ; ToxinPred (<http://crdd.osdd.net/raghava/toxinpred/>).

³ <https://admetlab3.scbdd.com/documentation/#/>.

⁴ <https://db.systemsbiology.net/sbeams/cgi/PeptideAtlas/Search>.

BamHI и XhoI и клонировали в вектор pET-25b(+) для экспрессии *E. coli*. Клоны были отсекарованы методом Сэнгера.

Методом MALDI-TOF MS Ultraflex (Bruker, Германия) исследовали распределение и идентификацию пептидов в полученной последовательности (Webster et al., 2012).

Результаты исследований

Белок GDF-11 характеризуется вогнутой с одной стороны и выгнутой с другой стороны формой (пропеллеобразная), что позволяет ему связываться с рецепторами клеток-мишеней (Walker et al., 2016). Хотя в целом исследуемый белок GDF-11 имеет третичную структуру и дисульфидные связи, повышающие его стабильность к протеолизу, но в его состав входят мономеры, которые не сшиты, т. е. не имеют дисульфидных связей, в частности, TVDFFEAFGWD. Для усиления его структуры нами проведено исследование по сшиванию мономера TVDFFEAFGWD и получения следующей пептидной цепочки: CTVDCFFECAFGCWDC с циклилизацией по связям C1-C4, C1-C2, C1-C3. Спроектированная последовательность имеет структурную формулу, представленную на рис. 1.

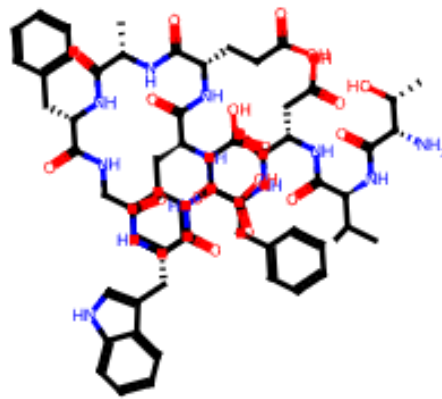


Рис. 1. Структурная формула последовательности CTVDCFFECAFGCWDC
Fig. 1. Structural formula of the sequence CTVDCFFECAFGCWDC

Но прежде чем создать белок GDF-11 с новой сшитой последовательностью аминокислот, проведена оценка ее токсичности и антигенности.

Результаты исследований токсичности последовательности CTVDCFFECAFGCWDC представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты прогнозирования токсичности последовательности CTVDCFFECAFGCWDC на платформе ADMET1 ab 3
Table 1. Results of toxicity prediction of the sequence CTVDCFFECAFGCWDC on the ADMET1 ab 3 platform

Показатель токсичности	Прогноз	Обсуждение
hERG-блокаторы, ед.	0	При значении показателя от 0 до 0,3 ед. пептид не является hERG-блокатором
DILI, ед.	0,035	При значении показателя от 0 до 0,3 ед. пептид не гепатотоксичен
Острая токсичность для перорального применения у крыс, ед.	0,056	При значении показателя от 0 до 0,3 ед. пептид не обладает острой токсичностью (> 500 мг/кг) при пероральном применении
Медикаментозная нейротоксичность, ед.	0,098	При значении показателя от 0 до 0,3 ед. пептид не нейротоксичен
Цитотоксичность Hek293, ед.	0	При значении показателя от 0 до 0,3 ед. пептид не цитотоксичен в отношении клеток Hek293
CL _{плазма} , мл/мин/кг	0,448	При значении показателя от 0 до 5 мл/мин/кг пептид имеет высокий плазменный клиренс
T1/2, ч	4,206	При значении показателя от 4 до 8 ч пептид имеет средний период полувыведения

Важным исследованием в определении токсичности новых биологически активных веществ является прогнозирование возможности блокировать канал hERG, представляющий собой зависящий от напряжения K⁺ (K_v) канал, регулирующий сокращение миокарда. Канал hERG играет важную роль в реполяризации

потенциала сердечного действия. В сердце каналы hERG открываются во время фазы деполяризации потенциала сердечного действия с последующей быстрой инактивацией. По мере реполяризации мембраны каналы hERG быстро восстанавливаются из инактивированного состояния и поддерживают интервал QT, который представляет собой интервал между началом сокращения желудочка и его полным расслаблением. Блокада канала hERG увеличивает продолжительность сокращения желудочков и задерживает реполяризацию, что приводит к удлинению интервала QT и повышенному риску возникновения смертельной аритмии (Vandenberg *et al.*, 2012). Установлено, что пептидная последовательность CTVDCCFFECFAFGCWDC не блокирует канал hERG.

Некоторые препараты вызывают поражение печени, в 32 % случаев это является причиной отзыва лекарств с рынка (Watkins *et al.*, 2011). Такие препараты называют DILI положительными. Гепатотоксичность, как правило, не выявляется до начала клинических испытаний, что создает повышенный риск для добровольцев – участников клинических испытаний. Установлено, что пептидная последовательность CTVDCCFFECFAFGCWDC является DILI отрицательной и не вызывает поражение печени.

При прогнозировании острой токсичности на крысах при пероральном применении установлено, что последовательность CTVDCCFFECFAFGCWDC не токсична.

Различные исследования показали, что некоторые лекарственные препараты вызывают нейротоксические эффекты и уменьшают объем серого вещества головного мозга (Vita *et al.*, 2015). В результате прогнозирования нейротоксичности последовательности CTVDCCFFECFAFGCWDC установлено, что она не вызывает отклонения в деятельности центральной и периферической нервных систем.

Исследуемая аминокислотная последовательность не токсична в отношении клеток эмбрионов почек человека.

Следует отметить, что последовательность аминокислот CTVDCCFFECFAFGCWDC характеризуется высоким плазменным клиренсом ($CL_{\text{плазма}}$), что важно для сохранения стабильности белка GDF-11 в организме при пероральном применении.

Одним из значимых показателей белков считается период полувыведения ($T_{1/2}$), в основном у пептидов он составляет менее 1 ч. У исследуемой пептидной последовательности $T_{1/2}$ равен 4,206 ч, что характеризует ее как пептид со средним периодом полувыведения.

Таким образом, спроектированная пептидная последовательность CTVDCCFFECFAFGCWDC не обладает токсичностью в отношении сердца, печени, нервной системы, клеток эмбрионов и характеризуется высокой стабильностью в организме человека, что позволяет ее вводить в белок GDF-11 для обеспечения его устойчивости к протеолизу.

Не менее важно, что новое вещество наряду с отсутствием токсичности не должно быть антигенным /аллергенным. Результаты прогнозирования антигенных свойств последовательности CTVDCCFFECFAFGCWDC представлены на рис. 2.

ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ АНТИГЕННЫЕ ПЕПТИДЫ

Results

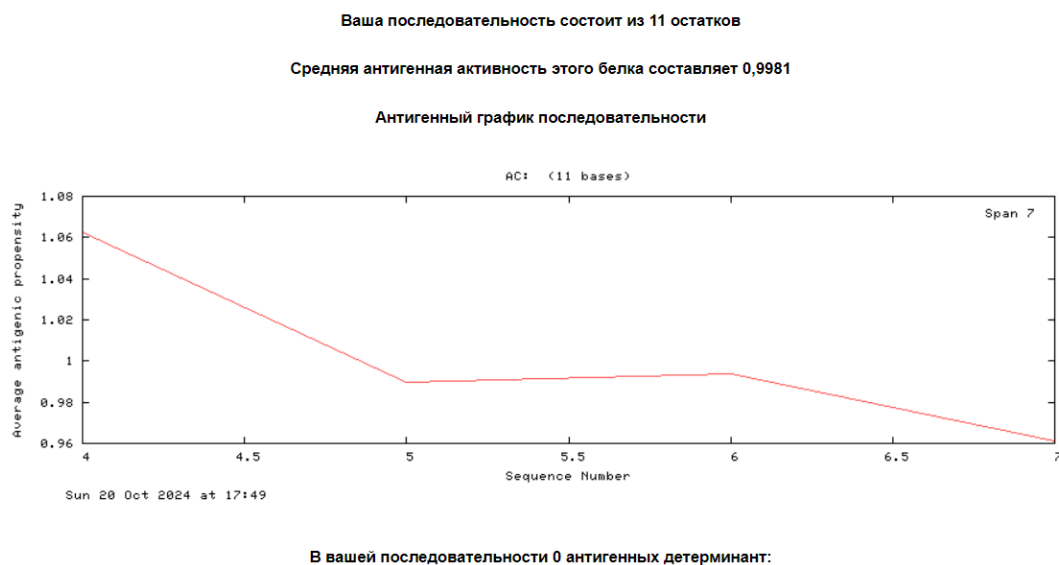


Рис. 2. Прогнозирование антигенных свойств последовательности CTVDCCFFECFAFGCWDC

Fig. 2. Prediction of antigenic properties of the sequence CTVDCCFFECFAFGCWDC

Пептидная последовательность CTVDCFFECAFGCWDC не содержит антигенных детерминант и, соответственно, введение ее в белок GDF-11 не делает его аллергическим.

На рис. 3 представлены результаты идентификации пептидной последовательности CTVDCFFECAFGCWDC на платформе PeptideAtlas.

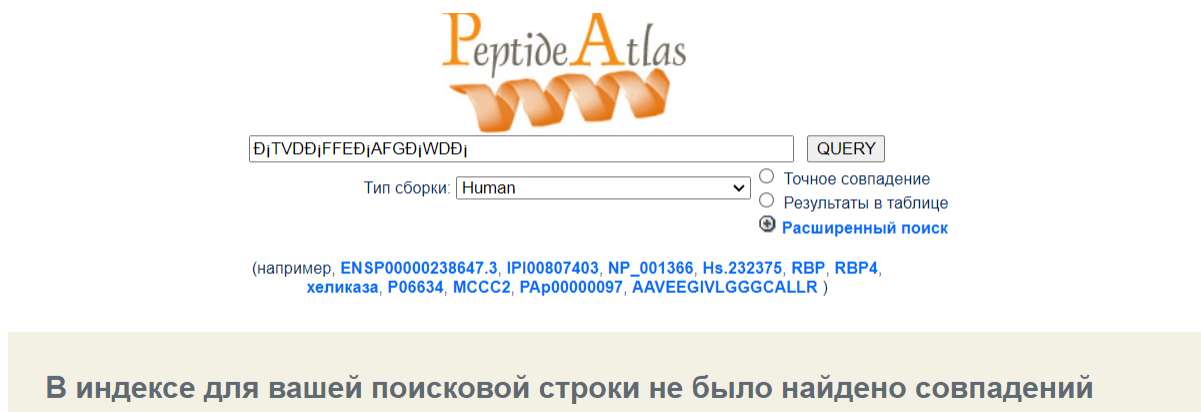


Рис. 3. Результаты идентификации пептидной последовательности CTVDCFFECAFGCWDC на платформе PeptideAtlas
Fig. 3. Results of identification of the peptide sequence CTVDCFFECAFGCWDC on the PeptideAtlas platform

Согласно результатам поиска на платформе PeptideAtlas спроектированная пептидная последовательность CTVDCFFECAFGCWDC уникальна.

Для синтеза белка GDF-11 с новой пептидной последовательностью синтезирован вектор рЕТ-25b(+)_GDF-11. Праймер для синтеза генов белка GDF-11 с заданной пептидной последовательностью представлен в табл. 2.

Таблица 2. Праймер для синтеза генов белка GDF-11 с заданной пептидной последовательностью
Table 2. Primer for the synthesis of GDF-11 protein genes with a given peptide sequence

Название праймера	Последовательность праймера, 5'–3'
GDF T7 F	GCTCTGGCCAGTGCAGTACATGTTTATGCAGAAATATCCGCACACCCATTTAG

На рис. 4 представлена хроматограмма праймера GDF T7 F.

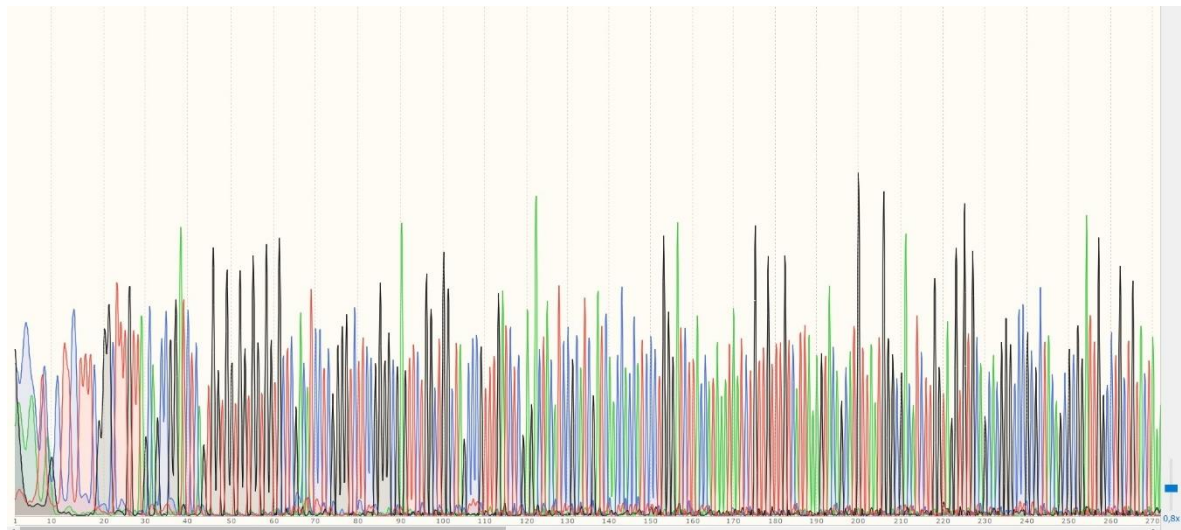


Рис. 4. Хроматограмма праймера GDF T7 F
Fig. 4. Chromatogram of primer GDF T7 F

Хроматограмма праймера GDF T7 F включает следующую последовательность аминокислот: AGCAAGTCAGCTTCTTTCCGGGCTTTGTTAGCAGCCGGATCTCAGTGGTGGTGGTGGTGGTCTCGA CATCCTCGGGGTCTTCCGGGGCGAGTTCTGGCTGGCTAGCCCGTTTGATCTCGAGACTACATCCGCA TCGATCAACCACCATCCCTGGGATCTTACCATAAATAATCTGTTGTTTGTCAATAAAGTACAGCATG TTAATGGGCGACATCTTGGTAGGTGTGCAGCACGGGGCCCGCGCTACAGCGCGGATTGGCCTGCTGT CTAATGGGTGTGCGGATATTTCTGCATAAACATGTACTCGCACTGGCCAGAGCAATAGTTTGCTTT GTAACGGCGCGGAGCAATGATCCAATCCAGCCGAACGCTTCGAAATCGACCGTCAGCGGATAAC GACAACAGCGGCTTTCTGAGGAATGTTTCATCGCAGTCAAGACCCAAGTTTGGATCCGAATTAATTC CGATATCCATGGCCATCGCCGGCTGGGCAGCGAGGAGCAGCAGACCAGCAGCAGCGGTCCGGCAGC AGGTATTTTCATATGTATATCTCCTTCTTAAAGTTAAACAAAATTATTTCTAGAGGGGAATTGTTATC CGCTCACAATCCCTATAGTGAGTCCGTATTACAA.

Заключение

Создана новая уникальная пептидная последовательность CTVDCFFECAGFCWDC с циклилизацией по связям C1-C4, C1-C2, C1-C3 белка GDF-11, что позволит повысить его устойчивость к протеолизу и, соответственно, даст возможность перорального применения в составе продуктов питания профилактического назначения. На основании виртуального скрининга установлено, что новая пептидная цепочка CTVDCFFECAGFCWDC белка GDF-11 не токсична в отношении сердечно-сосудистой и нервной систем, не гепатотоксична, не обладает цитотоксичностью, аллергенностью и характеризуется высоким плазменным клиренсом и средним периодом полувыведения. Полученные данные позволяют ее использовать для рекомбинации белка GDF-11. Вместе с тем согласно Федеральному закону от 3 июля 2016 г.⁵ № 358-ФЗ "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования государственного регулирования в области генно-инженерной деятельности" производство генно-модифицированных объектов для пищевых целей запрещено, но научные исследования, направленные на создания новых биологически активных рекомбинантных белков, приветствуются в молекулярной биотехнологии.

Полученные данные позволяют расширить новое направление в молекулярной биотехнологии по созданию принципиально новых пищевых ингредиентов с заданной активностью к клеткам-мишеням.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

- Chen, L., Deng, H., Cui, H., Fang, J. et al. 2018. Inflammatory responses and inflammation-associated diseases in organs. *Oncotarget*, 9, pp. 7204–7218. DOI: <https://doi.org/10.18632/oncotarget.23208>.
- Cox, T. C., Lidral, A. C., McCoy, J. C., Liu, H. et al. 2019. Mutations in GDF11 and the extracellular antagonist, Follistatin, as a likely cause of Mendelian forms of orofacial clefting in humans. *Human Mutation*, 40, pp. 1813–1825. DOI: <https://doi.org/10.1002/humu.23793>.
- Jamaiyar, A., Wan, W., Janota, D. M., Enrick, M. K. et al. 2017. The versatility and paradox of GDF 11. *Pharmacology & Therapeutics*, 175, pp. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2017.02.032>.
- Janakiram, N. B., Rao, C. V. 2014. The role of inflammation in colon cancer. In *Inflammation and Cancer*. Eds.: Aggarwal B. B., Sung B., Gupta S. C. Springer, Basel, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0837-8_2. (Advances in Experimental Medicine and Biology, vol. 816).
- McPherron, A. C., Lawler, A. M., Lee, S.-J. 1999. Regulation of anterior/posterior patterning of the axial skeleton by growth/differentiation factor 11. *Nature Genetics*, 22, pp. 260–264. DOI: <https://doi.org/10.1038/10320>.
- Moses, H. L., Roberts, A. B., Derynck, R. 2016. The discovery and early days of TGF- β : A historical perspective. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 8(7). Article number: a021865. DOI: <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a021865>.
- Nakashima, M., Toyono, T., Akamine, A., Joyner, A. 1999. Expression of growth/differentiation factor 11, a new member of the BMP/TGF β superfamily during mouse embryogenesis. *Mechanisms of Development*, 80(2), pp. 185–189. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0925-4773\(98\)00205-6](https://doi.org/10.1016/s0925-4773(98)00205-6).
- Padyana, A. K., Vaidialingam, B., Hayes, D. B., Gupta, P. et al. 2016. Crystal structure of human GDF11. *Acta Crystallographica. Section F. Structural Biology Communications*, 72, Pt. 3, pp. 160–164. DOI: <https://doi.org/10.1107/s2053230x16001588>.

⁵ О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования государственного регулирования в области генно-инженерной деятельности : Федеральный закон от 3 июля 2016 г. № 358-ФЗ. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41085>.

- Pepinsky, B., Gong, B.-J., Gao, Y., Lehmann, A. et al. 2017. A prodomain fragment from the proteolytic activation of growth differentiation factor 11 remains associated with the mature growth factor and keeps it soluble. *Biochemistry*, 56(33), pp. 4405–4418. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.biochem.7b00302>.
- Poggioli, T., Vujic, A., Yang, P., Macias-Trevino, C. et al. 2016. Circulating growth differentiation factor 11/8 levels decline with age. *Circulation Research*, 118(1), pp. 29–37. DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.115.307521>.
- Qin, L., Cui, Z., Wu, Y., Wang, H. et al. 2023. Challenges and strategies to enhance the systemic absorption of inhaled peptides and proteins. *Pharmaceutical Research*, 40, pp. 1037–1055. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11095-022-03435-3>.
- Suh, J., Lee, Y.-S. 2020. Similar sequences but dissimilar biological functions of GDF11 and myostatin. *Experimental & Molecular Medicine*, 52, pp. 1673–1693. DOI: <https://doi.org/10.1038/s12276-020-00516-4>.
- Vandenberg, J. I., Perry, M. D., Perrin, M. J., Mann, S. A. et al. 2012. hERG K⁺ Channels: Structure, function, and clinical significance. *Physiological Reviews*, 92(3), pp. 1393–1478. DOI: <https://doi.org/10.1152/physrev.00036.2011>.
- Vita, A., De Peri, L., Deste, G., Barlati, S. et al. 2015. The effect of antipsychotic treatment on cortical gray matter changes in Schizophrenia: Does the class matter? A meta-analysis and meta-regression of longitudinal magnetic resonance imaging studies. *Biological Psychiatry*, 78(6), pp. 403–412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2015.02.008>.
- Walker, R. G., Poggioli, T., Katsimpardi, L., Buchanan, S. M. et al. 2016. Biochemistry and biology of GDF11 and myostatin: Similarities, differences, and questions for future investigation. *Circulation Research*, 118(7), pp. 1125–1142. DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.116.308391>.
- Wang, L., Wang, N., Zhang, W., Cheng, X. et al. 2022. Therapeutic peptides: current applications and future directions. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 7. Article number: 48. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41392-022-00904-4>.
- Wang, L., Wang, Y., Wang, Z., Qi, Y. et al. 2018. Growth differentiation factor 11 ameliorates experimental colitis by inhibiting NLRP3 inflammasome activation. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, 315(6), pp. G909–G920. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajpgi.00159.2018>.
- Watkins, P. B. 2011. Drug safety sciences and the bottleneck in drug development. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, 89(6), pp. 788–790. DOI: <https://doi.org/10.1038/clpt.2011.63>.
- Webster, J., Oxley, D. 2012. Protein identification by MALDI-TOF mass spectrometry. In *Chemical Genomics and Proteomics*. Eds.: E. Zanders. Humana Press, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-61779-349-3_15. (Methods in Molecular Biology, vol. 800).

Информация об авторах

Валиева Шолпан Сергеевна – ул. Ю. А. Гагарина, 13, г. Троицк, Челябинская обл., Россия, 457103;
Южно-Уральский государственный аграрный университет, аспирант;
e-mail: sholpan.v85@gmail.com

Sholpan S. Valieva – 13 Yu. A. Gagarin Str., Troitsk, Chelyabinsk region, Russia, 457103;
South Ural State Agrarian University, PhD Student;
e-mail: sholpan.v85@gmail.com

Тихонов Сергей Леонидович – ул. Карла Либкнехта, 42, г. Екатеринбург, Россия, 620075;
Уральский государственный аграрный университет, д-р техн. наук, профессор;
Уральский государственный лесотехнический университет;
e-mail: tihonov75@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4863-9834>

Sergey L. Tikhonov – 42 Karl Liebknecht Str., Yekaterinburg, Russia, 620075;
Ural State Agrarian University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
Ural State Forest Engineering University;
e-mail: tihonov75@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4863-9834>

Тихонова Наталья Валерьевна – ул. Карла Либкнехта, 42, г. Екатеринбург, Россия, 620075;
Уральский государственный аграрный университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: tihonov75@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5841-1791>

Natalya V. Tikhonova – 42 Karl Liebknecht Str., Yekaterinburg, Russia, 620075;
Ural State Agrarian University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: tihonov75@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5841-1791>

Тимофеева Мария Сергеевна – ул. Репина, 3, г. Екатеринбург, Россия, 620028;
Уральский государственный медицинский университет, студент;
e-mail: tihonov75@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7760-1427>

Maria S. Timofeeva – 3 Repina Str., Yekaterinburg, Russia, 620028;
Ural State Medical University, Student;
e-mail: tihonov75@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7760-1427>

Шихалев Сергей Валерьевич – ул. Карла Либкнехта, 42, г. Екатеринбург, Россия, 620075;
Уральский государственный аграрный университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: sershih@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9236-7154>

Sergey V. Shikhalev – 42 Karl Liebknecht Str., Yekaterinburg, Russia, 620075;
Ural State Agrarian University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: sershih@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9236-7154>

УДК 612.396.111

Разработка пищевых продуктов на основе циклодекстринов

В. А. Грибкова, Д. П. Митрошина*, А. А. Славянский, Н. В. Николаева,
В. В. Литвяк, В. В. Шилов

**Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), г. Москва, Россия;*

e-mail: d_mitr96@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8724-3368>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
14.03.2025;

принята
к публикации
06.05.2025

Ключевые слова:

циклодекстрины,
йод,
комплекс
"хозяин – гость",
сахар,
йодированные
сахаросодержащие
продукты

Производство нового поколения продуктов питания с заранее установленными требованиями к их качеству относится к приоритетным направлениям развития современной пищевой индустрии. Следует отметить необходимость более полного использования для этих целей социально значимых продуктов питания, к которым относится белый сахар. Кристаллический белый сахар является не только энергетически важным компонентом питания, но и сырьем для целого ряда отраслей пищевой промышленности. К ним, например, можно отнести кондитерское производство, где годовая потребность в нем составляет около 1 млн т. Придание сахару новых пищевых свойств позволит расширить линейку продуктов на его основе. Актуальным в этом направлении может быть использование йода, поскольку проблема йододефицита в России не потеряла своей актуальности. Тем не менее реализация подобного подхода сопряжена с технологическими особенностями, в том числе при создании йодированных продуктов. Расширение представлений по решению данной проблемы потребовало соответствующего анализа и проведения обоснованных исследований для более глубокого ее понимания. Причем особое внимание было обращено на механизм инкапсулирования йода при создании на его основе новых сахаросодержащих продуктов. Предварительные подходы к этой задаче показали возможность использования с этой целью продуктов крахмального производства – циклодекстринов (ЦД). В статье рассмотрены не только их основные свойства и особенности, но также предпринята попытка разобраться в осуществлении механизма комплексообразования ЦД с йодом. Полученные результаты доказали перспективность использования β -ЦД в пищевой промышленности для расширения линейки новых сахаросодержащих продуктов и, в частности, их значимость в решении проблемы дефицита йода.

Для цитирования

Грибкова В. А. и др. Разработка пищевых продуктов на основе циклодекстринов. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 151–163. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-151-163>.

Development of food products based on cyclodextrins

Vera A. Gribkova, Daria P. Mitroshina*, Anatoliy A. Slavyanskiy,
Natalia V. Nikolaeva, Vladimir V. Litvyak, Valery V. Shilov

**Razumovsky Moscow State University of Technology and Management
(First Cossack University), Moscow, Russia;*

e-mail: d_mitr96@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8724-3368>

Article info

Received
14.03.2025;

accepted
06.05.2025

Key words:

cyclodextrins,
iodine,
host – guest complex,
sugar,
iodized sugar-containing
products

Abstract

The production of a new generation of food products with pre-established quality requirements is one of the priority areas of development of the modern food industry. It is especially important to note the need for a more complete use of socially significant food products for these purposes, which also includes white sugar. Crystalline white sugar is not only an energy-important component of nutrition, but also a raw material for a number of food industry sectors. These include, for example, confectionery production, where the annual demand for it is about 1 mln tons. Imparting new nutritional properties to sugar will expand the range of products based on it. The use of iodine may be relevant in this area, since the problem of iodine deficiency in Russia still exists and has not lost its relevance. However, the implementation of such an approach is associated with technological features, including the creation of iodized products. Expanding ideas on how to solve this problem has required appropriate analysis and substantiated research for a deeper understanding of it. Moreover, special attention has been paid to the mechanism of iodine encapsulation when creating new sugar-containing products on its basis. Preliminary approaches to this problem have shown the possibility of using starch production products – cyclodextrins (CD) – for this purpose. Therefore, this paper not only examines their main properties and features, but also attempts to understand the mechanism of complex formation of CD with iodine. The results obtained have shown the prospects for using β -CD in the food industry to expand the range of new sugar-containing products and, in particular, their importance in solving the problem of iodine deficiency.

For citation

Gribkova, V. A. et al. 2025. Development of food products based on cyclodextrins. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 151–163. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-151-163>.

Введение

Стратегические основы и подходы, сформированные к качеству и безопасности пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 г.¹, как и производство новых видов продуктов питания, тесно увязаны с улучшением здоровья населения и профилактикой их дефицитных состояний. Поэтому йодирование пищевых продуктов представляется весьма актуальной и вполне обоснованной задачей современности. Использование с этой целью социально значимых продуктов питания позволит ускорить ее положительное решение². Известно, что йод является одним из важнейших микроэлементов, необходимых для обеспечения нормальной жизнедеятельности человека. В настоящее время более 60 % населения РФ проживает в регионах с природно-обусловленным дефицитом йода. Особенно остро данная проблема ощущается в горных и предгорных районах Северного Кавказа, Урала, Алтая, Дальнего Востока, а также в Поволжье (*Цыплихин и др., 2025*). Поэтому в этих регионах имеют место риски йододефицитных заболеваний.

Одним из перспективных методов устранения или снижения подобных заболеваний является преднамеренное добавление в пищевые продукты жизненно необходимых нутриентов (*Борисова и др., 2021*). Вместе с этим, несмотря на значительные преимущества такого подхода, процесс обогащения продуктов питания сталкивается с рядом технологических затруднений. Последние, как правило, обусловлены сохранностью добавляемых нутриентов в производстве и процессе хранения готовой продукции. Причем одной из важнейших проблем является обеспечение минимизации контакта используемых добавок с одним из самых сильных природных окислителей – кислородом воздуха. Невзирая на то что кислород жизненно необходим для обеспечения процессов дыхания у растительных и животных организмов, выступающих в качестве источников продовольственного сырья, он также является ключевым фактором, инициирующим окислительные процессы (*Фролова и др., 2024*). Известно также, что последние могут быть причиной деградации вводимых пищевых добавок. Причем наблюдается не только ухудшение органолептических характеристик пищевой продукции, но и снижение ее пищевой ценности.

Следует отметить, что повышение стабильности и сохранности различных биологически активных веществ (БАВ) при их использовании как добавок в продукты питания является довольно новым направлением в пищевой науке. Одним из возможных перспективных способов защиты вводимых нутриентов от агрессивного воздействия окружающей среды является гранулирование (*Славянский и др., 2021*). Ранее было установлено, что этот процесс препятствует диффузии кислорода к вводимым нутриентам, например, в технологии гранулирования сахара. Помимо кислорода воздуха данная технология может защитить используемый нутриент от таких способствующих деградации факторов, как влага, свет и температурное воздействие. При этом молекулы БАВ в процессе гранулирования могут быть дополнительно защищены на молекулярном уровне покрытием на основе сахарных спиртов.

Технология инкапсулирования (способ введения пищевых добавок в обогащаемый ими пищевой продукт), с одной стороны, хорошо известна и уже используется в пищевых технологиях с разными целями, а с другой – наукоемка и позволяет разрабатывать или улучшать инновационные продукты для различных отраслей промышленности. Существующие сегодня методы инкапсулирования довольно широко применяются в медицине и фармацевтической промышленности (*Do Nascimento Cavalcante et al., 2019*). Причем они позволяют решать множество задач, связанных с защитой, высвобождением и сохранением лекарственных веществ. Один из перспективных подходов их решения в фармацевтике основывается на использовании циклодекстринов (ЦД) – циклических олигосахаридов, получаемых из крахмала. Известно, что ЦД способны на молекулярном уровне образовывать комплексы "гость – хозяин" с широким спектром разнообразных продуктов (*Amiri et al., 2017; Crini, 2014*). Так, в фармацевтике они необходимы для улучшения свойств лекарственных препаратов, особенно когда возникают проблемы с их растворимостью, стабилизацией протекания процесса или биодоступностью. ЦД относят к перспективному классу крахмалопродуктов, используемых в производстве лекарств. Вместе с тем потенциальные возможности их обогащения или придания им дополнительных пищевых свойств в продуктах питания еще до конца не исчерпаны.

Материалы и методы

Строение молекул циклодекстринов

Наиболее известные ЦД – это α -, β - и γ -ЦД, которые представляют собой циклические олигосахариды. Они могут содержать в своих структурах соответственно 6, 7 или 8 остатков D-глюкопиранозы³ (*Jambhekar et al., 2016; Mura, 2015*). При этом в основе их соединений связующими являются α -1-4-гликозидные связи. Молекулам циклодекстринов характерна форма усеченного конуса. Стабильность подобной формы молекул

¹ Распоряжение Правительства РФ от 29 июня 2016 г. № 1364-р "Об утверждении Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года" // Собрание законодательства РФ. 2016. № 28. Ст. 4758. URL: <https://base.garant.ru/71435844/>.

² Указ Президента РФ от 21.01.2021 № 20 "Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации" // Собрание законодательств РФ. 2020. № 4. Ст. 345. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/45106>.

³ Славянский А. А., Лукин Н. Д. Инновационные решения в производстве крахмала и крахмалопродуктов. М. : Русайнс, 2023. 420 с. EDN: MDFZKN.

обусловлена наличием водородных связей между ОН-группами. Все ОН-группы располагаются на внешней поверхности молекулы, в результате чего внутренняя полость ЦД является гидрофобной (Zhang *et al.*, 2013). Центральная их полость имеет определенный размер, который зависит от количества молекул глюкозы в цикле (рис. 1). Наличие атомов водорода на внутренней поверхности молекулы ЦД обуславливает ее гидрофобные свойства. В свою очередь, внешняя поверхность, напротив, проявляет гидрофильные свойства, что обусловлено присутствием гидроксильных групп (ОН-групп). Данные группы классифицируются по положению: первичные ОН-группы локализованы у узкого края молекулы ЦД, в то время как вторичные ОН-группы расположены у более широкого края (Das *et al.*, 2020; Raffaini *et al.*, 2019). На рис. 2 приведено схематическое изображение молекулы β-ЦД.

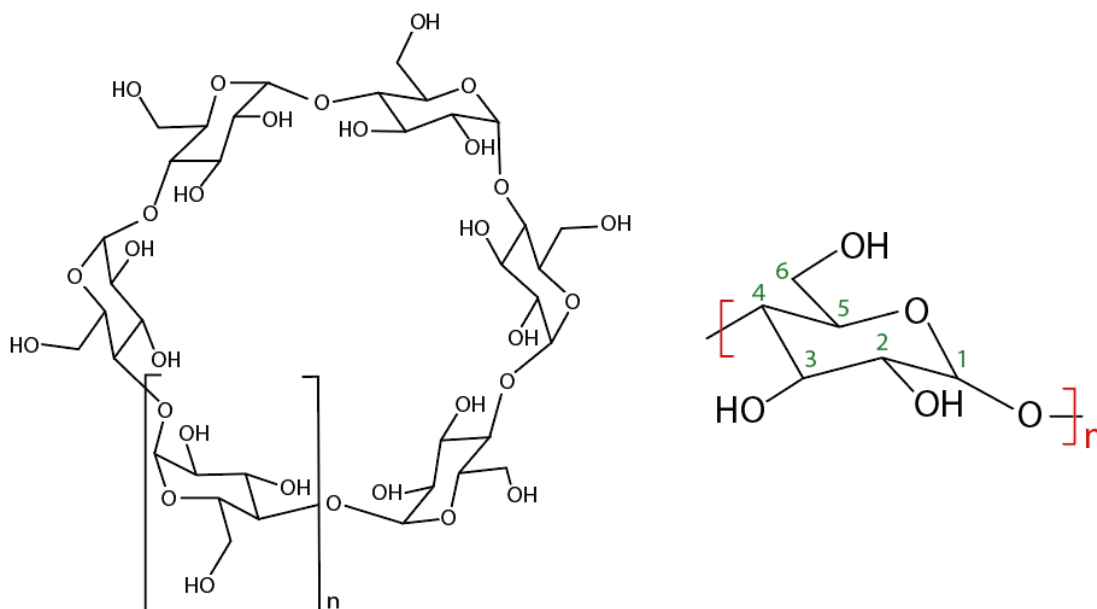


Рис. 1. Химическая структура ЦД ($n = 6 - \alpha$ -ЦД, $n = 7 - \beta$ -ЦД, $n = 8 - \gamma$ -ЦД)
Fig. 1. Chemical structure of cyclodextrin (CD): $n = 6 - \alpha$ -CD, $n = 7 - \beta$ -CD, $n = 8 - \gamma$ -CD

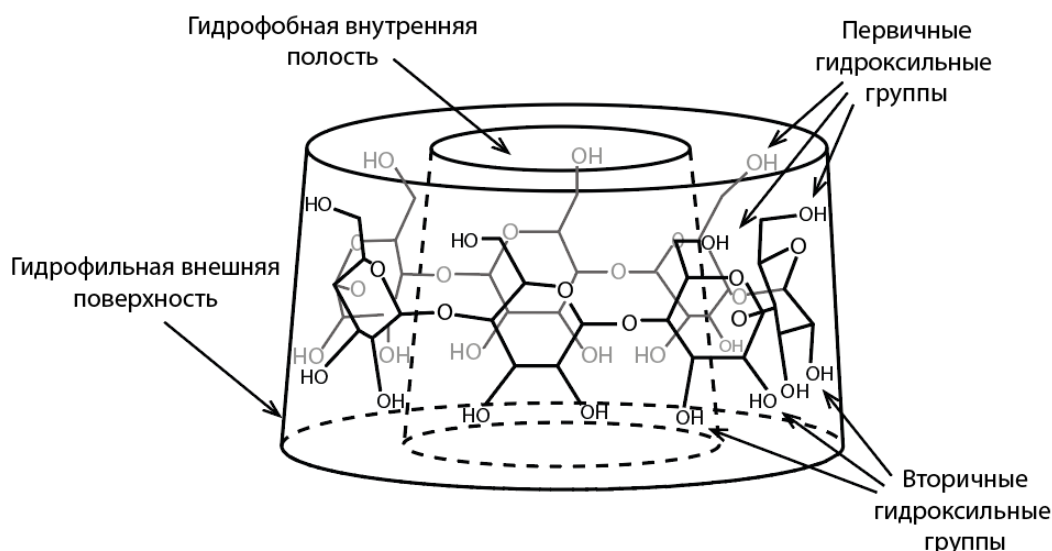


Рис. 2. Схематическое расположение первичных и вторичных гидроксильных групп в молекуле β-ЦД
Fig. 2. Schematic arrangement of primary and secondary hydroxyl groups in the β-CD molecule

ЦД способны формировать молекулярные комплексные включения, известные как клатраты, с разнообразными веществами по принципу "гость – хозяин". В клатратах молекулы ЦД благодаря своей внутренней гидрофобной полости выступают в роли "хозяев", а молекулы включаемых субстанций играют роль "гостя". В результате подобного взаимодействия возможно достигнуть существенного улучшения физических и биологических свойств гостевых молекул (Kavetsou *et al.*, 2021). Такая ситуация объясняет повышенное внимание к ЦД в современных исследованиях.

Комплексообразование ЦД по схеме "хозяин – гость"

Способность ЦД образовывать и формировать на молекулярном уровне комплексные включения с разнообразными веществами разного назначения считается основой, определяющей их значимость и практическое применение (Mashaqbeh et al., 2021; Minns et al., 2002). Так, например, благодаря их способности к комплексообразованию ЦД могут на молекулярном уровне образовывать особые включения по типу "хозяин – гость". При этом последние могут быть разного химического состава и структуры: твердыми, жидкими и газообразными химическими соединениями. В этих соединениях полость молекулы "хозяина" ЦД служит местом хранения молекулы "гостя".

Прочность и стабильность образуемого комплексного соединения зависят от соответствия размеров молекул "хозяина" и "гостя", а также от специфических локальных взаимодействий между их атомами, молекулами, а также соответствующими химическими и поверхностными связями.

Стереохимическое строение комплексов "хозяин – гость" может быть описано двумя возможными вариантами (Natural..., 2016):

1) комбинация 1 : 1 молекула-хозяин (ЦД)/молекула-гость (МХ/МГ ($K_{1:1}$)), следующее уравнение дает стехиометрию комплекса включения: $\text{MX} + \text{MG} \rightarrow \text{MX/MG} (K_{1:1})$, при $\text{MX} = \text{ЦД}$ уравнение примет вид $\text{ЦД} + \text{МГ} \rightarrow \text{ЦД/МГ} (K_{1:1})$;

2) комбинация 2 : 1 молекула-хозяин (ЦД)/молекула-гость ($\text{MX}_2/\text{МГ} (K_{2:1})$), следующее уравнение дает стехиометрию комплекса включения: $2\text{MX} + \text{MG} \rightarrow \text{MX}_2/\text{МГ} (K_{2:1})$, при $\text{MX} = \text{ЦД}$ уравнение примет вид $2\text{ЦД} + \text{МГ} \rightarrow \text{ЦД}_2/\text{МГ} (K_{2:1})$.

Равновесное связывание гостевой молекулы и ЦД с образованием комплекса в комбинации 1 : 1 и с комбинацией 2 : 1 показаны на рис. 3 и 4.

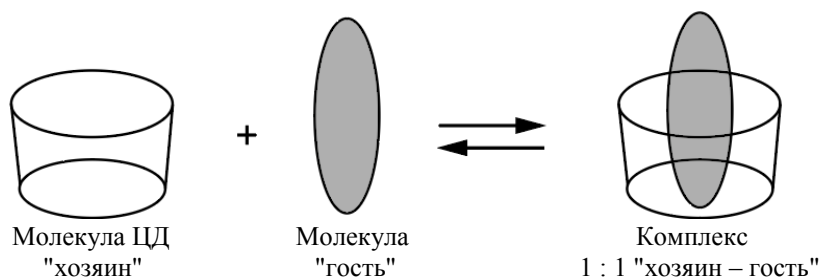


Рис. 3. Схема образование комплекса включения "хозяин – гость" при равновесном связывании гостевой молекулы и ЦД с образованием комплекса 1 : 1

Fig. 3. Scheme of formation of the host – guest inclusion complex upon equilibrium binding of the guest molecule and CD with formation of a 1 : 1 complex

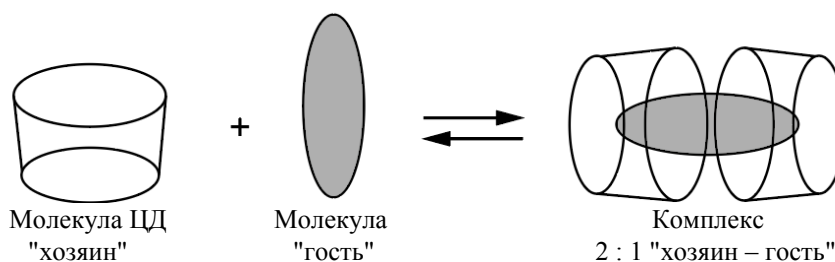


Рис. 4. Схема образование комплекса включения "хозяин – гость" с равновесным связыванием гостевой молекулы и ЦД с образованием комплекса 2 : 1

Fig. 4. Scheme of formation of the host – guest inclusion complex with equilibrium binding of the guest molecule and CD to form a 2 : 1 complex

Комбинация ЦД/МГ (1 : 1) является наиболее распространенным типом комплекса ЦД (Leclercq, 2016). Она возникает, когда размер вводимого "гостя" соответствует размеру полости ЦД и одна молекула "гостя" оптимально заполняет полость. Предположительно, комплексы включения типа 2 : 1 образуются путем взаимодействия второй молекулы ЦД с ранее сформированным комплексом 1 : 1 (Li et al., 2022).

Размеры полости ЦД и гостевой молекулы считаются определяющими и оказывают существенное влияние на комплексообразование (Mohammed-Saeid et al., 2019; Maniam et al., 2022). Однако механизм протекания этого процесса еще до конца не уточнен и исследования в этом направлении продолжаются. Так, например, до настоящего времени остается открытым вопрос о природе сил, удерживающих вводимые в ЦД молекулы, как и характер образующихся при этом связей. Известно также, что важную роль в образовании соответствующих связей могут играть Ван-дер-Ваальсовы силы и межмолекулярные связи,

формирующиеся за счет гидрофобной внутренней полости циклодекстринов (Saokham *et al.*, 2018; Venuti *et al.*, 2019). В этой полости может быть сформирована особая среда и в нее могут проникать наиболее активные гидрофобные гостевые молекулы. При этом происходит вытеснение молекул воды из внутренней полости ЦД. Схема механизма подобного процесса с образованием комплексного соединения "гость – хозяин" показана на рис. 5.

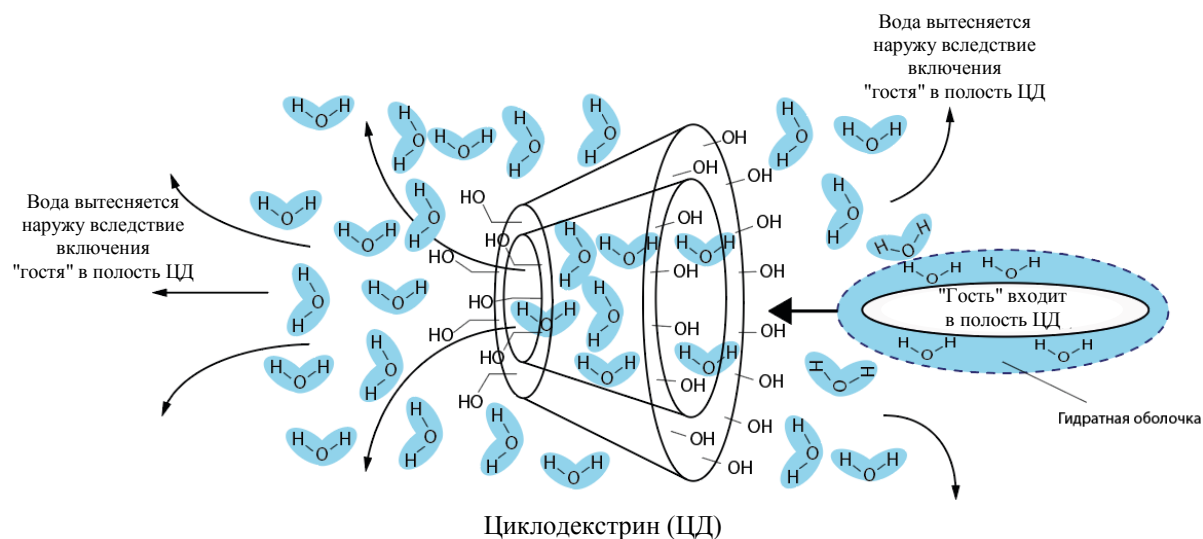


Рис. 5. Схема механизма образования комплекса "хозяин – гость"
Fig. 5. Scheme of the mechanism of formation of the host – guest complex

Движущей силой процесса образования комплексных соединений является способность молекулы "гостя" внедряться внутрь гидрофобной полости ЦД (Zhu *et al.*, 2015). Предполагается, что в этот период между гостевой молекулой и внутренней поверхностью полости ЦД могут иметь место некоторые силы (например, Ван-дер-Ваальсовы). При этом они стабилизируют молекулярное состояние образуемого комплекса. Характерной особенностью гидрофобных молекул "гостя" является отсутствие у них способности образовывать водородные связи с молекулами воды (Adamiak *et al.*, 2019). Поэтому количество водородных связей между молекулами воды с формированием более упорядоченной структуры вокруг поверхности гостевой молекулы возрастает. При этом как бы формируется гидратная оболочка вокруг "гостя". Следует также отметить, что внутренняя полость ЦД не является абсолютно свободной, так как внутри нее находятся молекулы воды. Последние связаны с выстилающими полость ЦД атомами кислорода и водорода посредством слабых водородных связей и диполь-дипольных взаимодействий (Jia *et al.*, 2022). К тому же на внешней поверхности ЦД присутствуют гидроксильные группы, которые конкурируют за взаимодействие с молекулами воды из окружающего ЦД раствора. Все это ограничивает подвижность молекул воды внутри полости ЦД и влияет на их ориентацию в его полости. Когда гидрофобная молекула "гостя" инкапсулируется в гидрофобную полость ЦД, его гидратная оболочка разрушается. Молекулы воды, которые ранее были ограничены в своей подвижности и строго расположены в гидратной оболочке, в этой ситуации получают возможность свободно двигаться и взаимодействовать с другими молекулами воды окружающего их раствора. При инкапсуляции во внутреннюю полость ЦД молекулы воды вытесняются из нее. При этом следует отметить то, что при этом наблюдается разрушение связей между молекулами воды и атомами, выстилающими полость ЦД. Высвобождение молекул воды из полости ЦД в свою очередь приводит к повышению энтропии сформированной системы (Ali *et al.*, 2021; Mohammed-Saeid *et al.*, 2019). Возрастает ее неупорядоченность и подвижность молекул. Увеличение энтропии при высвобождении молекул воды вокруг гидрофобной молекулы "гостя" и внутри полости ЦД стабилизирует сформированный комплекс. Причем его образование становится термодинамически выгодным.

Методы получения комплексов с ЦД

Существует множество различных подходов к комплексообразованию. Их разнообразие обусловлено широким спектром молекул-гостей и соединений, компонентов рецептур, производственных процессов и конечных продуктов (Janicka *et al.*, 2022). В настоящее время известен ряд методов получения комплексов ЦД с "гостями": сорастирание, соосаждение, сухое вымешивание, герметичное нагревание, комплексообразование в пастообразном состоянии, нейтрализация, распылительная сушка, замораживание, испарение растворителя (Sbârcea *et al.*, 2019).

Производные ЦД с измененными свойствами

Целью модификации природных ЦД является получение на их основе производных ЦД, т. е. превращение в аморфные или кристаллические формы с различными свойствами (Topuz *et al.*, 2022). После подобных превращений ЦД должны обладать высокой растворимостью в воде. Это необходимо, чтобы обеспечить микробиологическую и физико-химическую стабильность в течение определенного периода времени. Поскольку все ЦД (α -, β - и γ -) имеют взаимозаменяемые гидроксильные группы, то существует много вариантов их потенциальных производных.

Выделяют следующие типы модифицированных ЦД:

1. Метилированные циклодекстрины (МЦД) представляют собой модифицированные формы циклодекстринов, в которых гидроксильные группы ($-\text{OH}$) на внешней стороне молекулы заменены на метильные ($-\text{CH}_3$), что приводит к изменению их свойств (Christoforides *et al.*, 2022). Например, растворимость в воде метилированного β -ЦД выше, чем у нативного β -ЦД. Это объясняется тем, что немодифицированные ЦД имеют множество гидроксильных групп на внешней стороне молекулы. Последние способны образовывать межмолекулярные водородные связи с другими молекулами ЦД. Подобное взаимодействие является причиной формирования относительно крупных труднорастворимых агрегатов ЦД. Метилирование ЦД препятствует образованию межмолекулярных водородных связей между молекулами ЦД (Aiassa *et al.*, 2023). Это объясняется тем, что метильные группы не способны образовывать водородные связи. Таким образом, метилирование циклодекстринов повышает их растворимость, главным образом за счет разрушения межмолекулярных водородных связей между молекулами ЦД. Высокая растворимость МЦД расширяет сферы их применения, особенно в фармацевтике и пищевой промышленности, где необходимо работать с водными растворами.

2. Гидроксильные производные ЦД – это ЦД, у которых гидроксильные группы ($-\text{OH}$) на внешней поверхности молекулы модифицированы путем добавления гидроксиалкильных групп. Наиболее распространенными являются гидроксипропил-циклодекстрины (ГП-ЦД) и гидроксиэтил-циклодекстрины (ГЭ-ЦД) (Kato *et al.*, 2009). Реакция гидроксирования заключается в присоединении гидроксиалкильных групп к гидроксильным группам на внешней поверхности молекулы ЦД. Это обычно достигается путем взаимодействия ЦД с пропиленоксидом для ГП-ЦД и этиленоксидом для ГЭ-ЦД, соответственно. Как и МЦД, данные модифицированные формы ЦД обладают значительно более высокой растворимостью в воде по сравнению с нативными ЦД. Кроме того, гидроксирование может оказывать влияние на способность ЦД к комплексообразованию. Так, гидроксиалкильные группы, присоединенные к гидроксильным группам на внешней стороне ЦД, являются более объемными, чем простые гидроксильные группы (Matencio *et al.*, 2016). Несмотря на то что эти группы не находятся внутри полости ЦД, они создают некоторое пространственное препятствие на входе в полость ЦД, которое может в некоторой степени изменить размер полости ЦД. В результате этих изменений гидроксильные ЦД приобретают селективность в процессе комплексообразования, т. е. если гостевые молекулы не совпадают с размерами полости, то эффективность их включения существенно ниже.

3. Сульфолкированные производные ЦД (САЦД) – под ними понимают модифицированные ЦД, в которых к молекуле ЦД присоединены сульфолкильные группы. Эти группы представляют собой алкильные цепи, на конце которых находится сульфатная группа ($-\text{SO}_3^-$), имеющая отрицательный заряд (Qu *et al.*, 2002). Отличительной особенностью САЦД является их пониженная способность к образованию комплексов с молекулами-гостями. Это может быть объяснено тем, что сульфатные группы отрицательно заряжены, и если молекула-гость также имеет отрицательный заряд (или несет частично отрицательный заряд в определенной части своей структуры), то между ними может возникать электростатическое отталкивание, что в свою очередь может затруднять или препятствовать образованию комплекса. Помимо этого, в случае если "гость" имеет положительный заряд, то сульфатные группы САЦД могут вступать в ионные взаимодействия. Однако эти взаимодействия могут связывать молекулу-гостя не внутри полости, а, скорее, на поверхности САЦД, что также снижает эффективность образования комплексов.

4. Серосодержащие производные ЦД (ССЦД) – это производные, в которых в молекулу ЦД введены атомы серы. Они могут включать различные серосодержащие функциональные группы, такие как тиолы ($-\text{SH}$), сульфиды ($-\text{S}-$), сульфоксиды ($-\text{SO}-$), сульфоны ($-\text{SO}_2-$), сульфаты ($-\text{SO}_3-$) и тиоэфиры ($-\text{C}-\text{S}-\text{C}-$) (Mohandoss *et al.*, 2019). Благодаря введению атомов серы в структуру ЦД данные модификации могут образовывать координационные связи с ионами металлов, что позволяет использовать серосодержащие ЦД в качестве хелатирующих агентов. Это связано с тем, что эти функциональные группы способны отдавать свои неподеленные электронные пары и образовывать координационные (донорно-акцепторные) связи с ионами металлов. Эта особенность позволяет использовать ССЦД, например, для удаления тяжелых металлов и других загрязнений из окружающей среды (Mura, 2014).

Факторы, влияющие на комплексообразование ЦД с гостевыми молекулами

На образование комплекса ЦД/гостевая молекула влияет ряд факторов:

1. Тип ЦД и размер его полости. Различные типы ЦД имеют разное количество глюкозных звеньев в кольцевой структуре, что напрямую определяет размер внутренней гидрофобной полости. "Гость" должен быть расположен внутри ЦД, следовательно, размер его полости должен быть соответствующим. ЦД имеют различный диаметр центральной полости, поэтому они способны образовывать комплексы с молекулами соответствующего размера (*Adamiak et al.*, 2019).

2. Влияние методов приготовления. Известны различные методы образования комплексных соединений с гостевыми молекулами, причем от выбранного способа зависит протекание процесса комплексообразования (*Araújo et al.*, 2021).

3. Связь между pH и состоянием ионизации. Если гостевая молекула при определенном pH становится более гидрофильной из-за ионизации (т. е. в результате процесса образования ионов из нейтральных атомов или молекул), ее сродство к гидрофобной полости ЦД снижается, что приводит к уменьшению стабильности комплекса. Оптимальное pH для комплексообразования часто соответствует pH, при котором гостевая молекула находится в наименее ионизированной форме (т. е. наиболее гидрофобна) (*Da Rocha Neto et al.*, 2018).

4. Температура. На процесс образования комплексов между ЦД и молекулами-гостями заметное влияние оказывает температура. Так, стабильность комплексного включения может уменьшаться с повышением температуры (*Xiao et al.*, 2019).

5. Степень замещения. Тип, количество и расположение заместителя в исходной молекуле ЦД может оказывать заметное влияние на физико-химические свойства молекулы, такие как ее комплексообразующая способность. Например, различия в физико-химических свойствах образцов ГП-ЦД, имеющих одинаковый уровень замещения в разных условиях, может быть результатом нерегулярности в размещении гидроксипропильных групп в различных местах исходной молекулы ЦД. Это обусловлено тем, что чистота ЦД может оказывать существенное влияние на конечное качество гостевой молекулы и его товарность (*Guendouzi et al.*, 2020).

Таким образом, на эффективность процесса формирования комплексов между ЦД и гостевыми молекулами, а также их стабильность влияет множество факторов, понимание которых критически важно для оптимизации комплексообразования и инкапсулирования различных незаменимых нутриентов. В рамках настоящего исследования особое внимание было уделено комплексообразованию β-ЦД с йодом.

Результаты и обсуждение

Получение комплексов йод-ЦД

По данным ВОЗ дефицит йода считается одной из причин заболевания щитовидной железы человека⁴. Это объясняется тем, что в его организме йод является неотъемлемой частью гормонов щитовидной железы. В мировой практике дефицит йода наблюдается почти у двух миллиардов человек (*Zimmerman*, 2012; *O'Kane et al.*, 2018). По существующим рекомендациям для решения проблемы йодосодержания детям рекомендуется в сутки потреблять 70–150 мкг йода, тогда как взрослым его требуется – 150 мкг⁵. Одним из важнейших мероприятий профилактики йододефицита является йодирование пищевых продуктов (*Iodine...*, 2017). Добавление йода в продукты питания, особенно социально значимые, позволит обеспечить необходимое потребление этого важного микроэлемента.

К категории социально значимых продуктов питания относится белый сахар⁶ (*Николаева и др.*, 2021). Вследствие его широкого использования в рационе питания, экономической доступности и востребованности в различных отраслях пищевой промышленности (включая производство кондитерских изделий, хлебобулочных изделий и напитков) он может быть перспективной основой для обогащения йодом⁷ (*Славянский и др.*, 1984). В соответствии с действующими рекомендациями, взрослому населению рекомендуется употреблять примерно 25 г сахара в сутки³. Хорошо известно, что йод является весьма летучим элементом. Поэтому повышение его устойчивости к условиям окружающей среды является критически важным фактором. Это обусловлено тем, что последний определяет эффективность профилактики йододефицитных состояний.

⁴ WHO. Assessment of Iodine Deficiency Disorders and Monitoring Their Elimination: A Guide for Programme Managers. World Health Organization; Geneva, Switzerland, 2007.

⁵ Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации, утв. руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации. 22.07.2021. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/>.

⁶ Славянский А. А. Сахар: назначение, свойства и производство. М. : Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), 2012. 213 с. EDN: WFFVYR.

⁷ Славянский А. А., Сапронов А. Р. Пути повышения качества продукции в сахарной промышленности. М. : Агропромиздат, 1985. 39 с. EDN: WGDHRT.

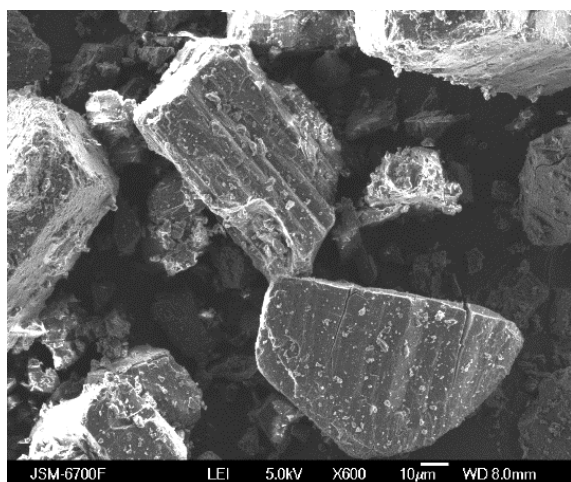
Благодаря своей уникальной циклической структуре и наличию гидрофобной полости ЦД способны захватывать в нее различные молекулы. Например, включать в себя микроэлементы, которые часто имеют низкую стабильность и растворимость. При этом ЦД способны увеличить физическую и химическую стабильность этих компонентов (Bednarek et al., 2019; Neoh et al., 2006). Получение комплексов ЦД с йодом – весьма перспективно для создания новых йодированных пищевых продуктов.

Вместе с тем известно, что йод весьма нестабилен и чувствителен к факторам окружающей его среды. Поэтому при его инкапсулировании в ЦД, а также при разработке йодированных сахаросодержащих продуктов, могут потребоваться дополнительные исследования в этом направлении (Wang, 2011; Moini et al., 2020).

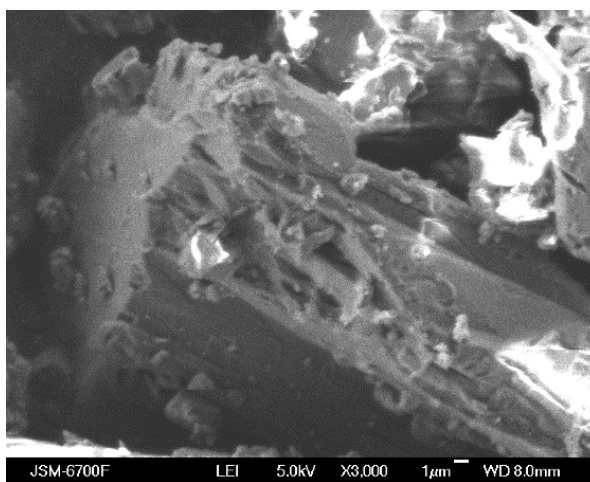
На основе ранее выполненных работ установлено, что α -ЦД образует комплекс со смесью йодида калия и йода (Minns et al., 2002; Lechat et al., 1992). Проведенные в этом направлении эксперименты показали на стабильность разработанного соединения – после 16 месяцев его хранения. Кроме того отмечена его пригодность для промышленного использования.

Отмечено, что основой для включения и формирования комплексов с йодом могут быть как α -ЦД, так и β -ЦД. При этом уточнено то, что β -ЦД способен к образованию более стабильного комплекса с йодом, чем с α -ЦД. Причем этот тип комплексообразования в целом увеличивает растворимость йода в воде (Polumbryk et al., 2019; Sharipov et al., 2017).

В ходе дальнейших исследований были получены комплексы ЦД с йодом (α -ЦД- I_2 и β -ЦД- I_2) путем смешивания концентрированных растворов ЦД и KI с последующим выпадением осадка, его промыванием и сушкой под разрежением (Литвяк и др., 2024). Результаты этих экспериментов представлены на рис. 6 и 7. На рис. 8 показана схема образования комплексного соединения между β -ЦД и KI.



Комплекс α -ЦД с йодом



Комплекс β -ЦД с йодом

Рис. 6. Сканирующие электронные микрофотографии комплекса ЦД с йодом

Fig. 6. Scanning electron micrographs of the CD complex with iodine

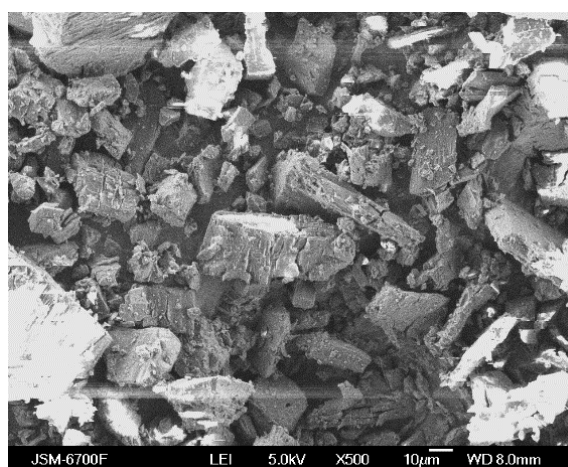
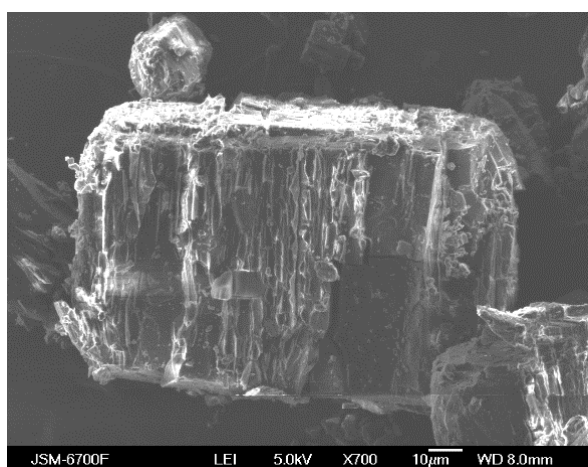


Рис. 7. Сканирующие электронные микрофотографии комплекса β -ЦД с йодом

Fig. 7. Scanning electron micrographs of the β -CD complex with iodine

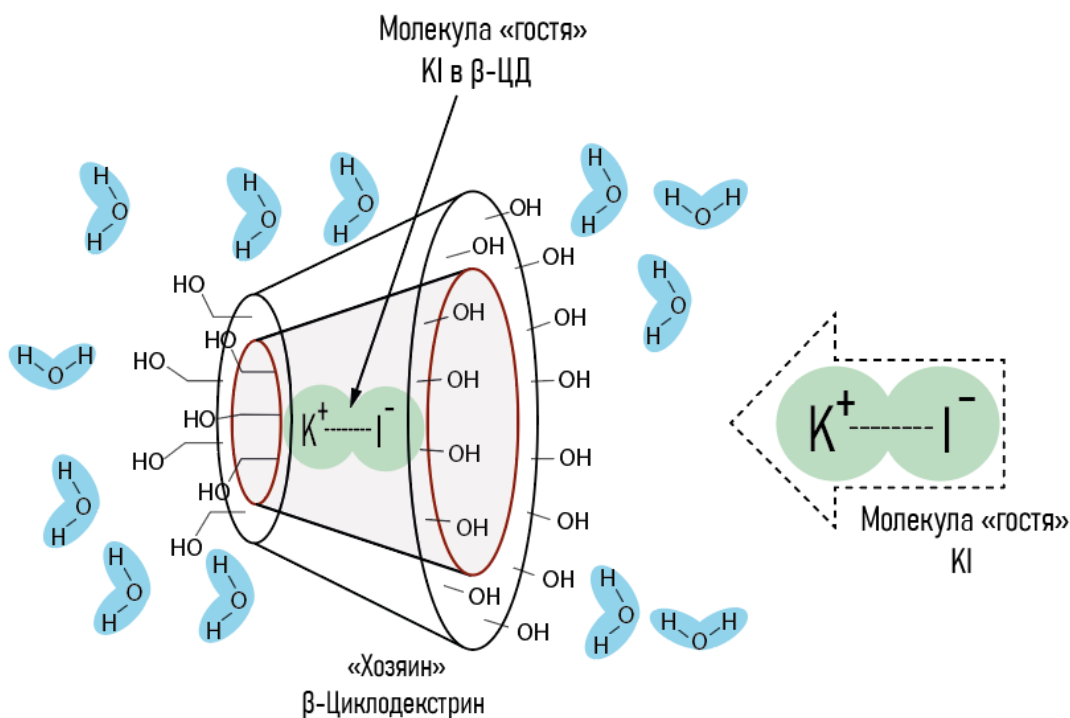


Рис. 8. Схема образования комплексного соединения между β-ЦД и KI
Fig. 8. Scheme of formation of the complex compound between β-CD and KI

Таким образом, ЦД обеспечивает защиту молекулы йода от взаимодействия с кислородом и влагой из воздуха, которые могут вызывать деградацию "гостя" или химические реакции между ним и компонентами окружающей среды. Помимо этого включенные в полость β-ЦД молекулы йода становятся менее доступными для перехода в газовую фазу, так как полость β-ЦД препятствует высвобождению молекул йода. В ходе работы сканирующей электронной микроскопией и йодометрическим титрованием было установлено, что содержание йода в комплексе β-ЦД-I₂ составляет 16,82–16,90 %.

Заключение

Способность ЦД к образованию комплексных соединений открывает новые перспективные возможности их использования, например, для разработки новых видов обогащенных пищевых продуктов. При выборе последних в первую очередь следует ориентироваться на социально значимые продукты питания. В результате проведенных исследований в этом направлении отмечена важность понимания особенностей взаимодействий ЦД и гостевых молекул и новых подходов к их использованию. Особое внимание в данной работе уделено проблеме инкапсулирования и формирования комплексов йода с β-ЦД. Показано, что дальнейшие исследования в этой области могут стать основой разработки уточненных условий инкапсуляции с защитой их от факторов внешней среды. При этом данная проблема является не только актуальной в контексте йододефицита, но и перспективной, так как она ориентирована на создание нового поколения социально значимых пищевых продуктов с заданными или строго персонализированными характеристиками.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

- Adamiak, M., Ignaczak, A. 2019. Quantum chemical study of the complexation process of bis-β-D-glucopyranosyl diazacrown derivative with aspirin and paracetamol molecules. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1167. Article number: 112591. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2019.112591>.
- Aiassa, V., Garnero, C., Zoppi, A., Longhi, M. R. 2023. Cyclodextrins and their derivatives as drug stability modifiers. *Pharmaceuticals*, 16(8). Article number: 1074. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph16081074>.
- Ali, K. A., Roy, P., Maity, A., Chakraborty, P. 2021. Tailor-made cyclodextrin-based nanomaterials as drug carriers. In *Tailor-Made and Functionalized Biopolymer Systems*. Eds.: H. Bera, B. Layek, J. Singh. Woodhead Publishing, pp. 155–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821437-4.00004-9>.
- Amiri, S., Amiri, S. 2017. Cyclodextrins: Properties and industrial applications. John Wiley & Sons Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119247609>.

- Araújo, L. D. S. S., Lazzara, G., Chiappisi, L. 2021. Cyclodextrin/surfactant inclusion complexes: An integrated view of their thermodynamic and structural properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, 289. Article number: 102375. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102375>.
- Bednarek, E., Bocian, W., Michalska, K. 2019. Nuclear magnetic resonance spectroscopic study of the inclusion complex of (R)-tedizolid with HDAS- β -CD, β -CD, and γ -cyclodextrin in aqueous solution. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 169, pp. 170–180. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jpba.2019.02.031>.
- Borisova, A. V., Shayarova, M. V., Shishkina, N. Yu. 2021. Functional foods: The relationship between theory, production and consumer. *New Technologies*, 17(1), pp. 21–32. = Борисова А. В., Шаярова М. В., Шишкина Н. Ю. Функциональные продукты питания: связь между теорией, производством и потребителем // Новые технологии. 2021. Т. 17, № 1. С. 21–32. DOI: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-1-21-32>. EDN: KMZWIA. (In Russ.)
- Christoforides, E., Andreou, A., Papaioannou, A., Bethanis, K. 2022. Structural studies of piperine inclusion complexes in native and derivative β -cyclodextrins. *Biomolecules*, 12(12). Article number: 1762. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom12121762>.
- Crini, G. 2014. Review: A history of cyclodextrins. *Chemical Reviews*, 114(21), pp. 10940–10975. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr500081p>.
- da Rocha Neto, A. C., da Rocha, A. B. D. O., Maraschin, M., di Piero, R. M. et al. 2018. Factors affecting the entrapment efficiency of β -cyclodextrins and their effects on the formation of inclusion complexes containing essential oils. *Food Hydrocolloids*, 77, pp. 509–523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.10.029>.
- Das, S., Nath, S., Singh, T. S., Chattopadhyay, N. 2020. Cavity size dependent stoichiometry of probe – cyclodextrin complexation: Experimental and molecular docking demonstration. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 388. Article number: 112158. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112158>.
- do Nascimento Cavalcante, A., Feitosa, C. M., da Silva Santos, F. P., de Sousa, A. P. R. et al. 2019. Elaboration and characterization of the inclusion complex between β -cyclodextrin and the anticholinesterase 2-oleyl-1,3-dipalmitoyl-glycerol extracted from the seeds of *Platonia insignis* MART. *Journal of Molecular Structure*, 1177, pp. 286–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.09.067>.
- Frolova, A. S., Milentyeva, I. S., Fedorova, A. M., Miller, E. S. et al. 2024. Effect of biologically active substances on thermal and oxidative stress of model objects *Caenorhabditis elegans*. *Food Processing: Techniques and Technology*, 54(3), pp. 571–584. = Фролова А. С., Милентьева И. С., Федорова А. М., Миллер Е. С. [и др.]. Влияние биологически активных веществ на тепловой и окислительный стресс модельных объектов *Caenorhabditis elegans* // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54, № 3. С. 571–584. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-3-2530>. EDN: KEDBNI. (In Russ.)
- Guendouzi, O., Guendouzi, A., Ouici, H. B., Brahim, H. et al. 2020. A quantum chemical study of encapsulation and stabilization of gallic acid in β -cyclodextrin as a drug delivery system. *Canadian Journal of Chemistry*, 98(4), pp. 204–214. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjc-2019-0464>.
- Iodine deficiency disorders and their elimination. 2017. Ed.: E. N. Pearce. Springer International Publishing AG.
- Jambhekar, S. S., Breen, P. 2016. Cyclodextrins in pharmaceutical formulations I: Structure and physicochemical properties, formation of complexes, and types of complex. *Drug Discovery Today*, 21(2), pp. 356–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2015.11.017>.
- Janicka, P., Kaykhaii, M., Plotka-Wasyłka, J., Gębicki, J. 2022. Supramolecular deep eutectic solvents and their applications. *Green Chemistry*, 24(13), pp. 5035–5045. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2GC00906D>.
- Jia, Z., Luo, Y., Barba, F. J., Wu, Y. et al. 2022. Effect of β -cyclodextrins on the physical properties and anti-staling mechanisms of corn starch gels during storage. *Carbohydrate Polymers*, 284. Article number: 119187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119187>.
- Kato, S., Aoshima, H., Saitoh, Y., Miwa, N. 2009. Highly hydroxylated or γ -cyclodextrin-bicapped water-soluble derivative of fullerene: The antioxidant ability assessed by electron spin resonance method and β -carotene bleaching assay. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 19(18), pp. 5293–5296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2009.07.149>.
- Kavetsou, E., Pitterou, I., Katopodi, A., Petridou, G. et al. 2021. Preparation, characterization, and acetylcholinesterase inhibitory ability of the inclusion complex of β -Cyclodextrin-Cedar (*Juniperus phoenicea*) essential oil. *Micro*, 1(2), pp. 250–266. DOI: <https://doi.org/10.3390/micro1020019>.
- Lechat, F. L., Wouessidjewe, D., Herrenknecht, C., Duchêne, D. 1992. Preparation and stability of iodine/ α -cyclodextrin inclusion complex. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 18(17), pp. 1853–1863. DOI: <https://doi.org/10.3109/03639049209046335>.
- Leclercq, L. 2016. Interactions between cyclodextrins and cellular components: Towards greener medical applications? *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 12, pp. 2644–2662. DOI: <https://doi.org/10.3762/bjoc.12.261>.
- Li, T., Guo, R., Zong, Q., Ling, G. 2022. Application of molecular docking in elaborating molecular mechanisms and interactions of supramolecular cyclodextrin. *Carbohydrate Polymers*, 276. Article number: 118644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118644>.

- Litvyak, V. V., Slavyansky, A. A., Avakova, A. A. 2024. Study of cyclodextrins enriched with microelements. *Bulletin of the Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University). Series of applied scientific disciplines*, 4, pp. 24–36. = Литвяк В. В., Славянский А. А., Авакова А. А. Исследование циклодекстринов, обогащенных микроэлементами. Вестник Московского государственного университета технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет). Серия прикладных научных дисциплин. 2024. № 4. С. 24–36. EDN: JRLIVI. (In Russ.)
- Maniam, M. M. R., Loong, Y. H., Samsudin, H. 2022. Understanding the formation of β -Cyclodextrin inclusion complexes and their use in active packaging systems. *Starch-Stärke*, 74(7–8). Article number: 2100304. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.202100304>.
- Mashaqbeh, H., Obaidat, R., Al-Shar'I, N. 2021. Evaluation and characterization of curcumin- β -cyclodextrin and cyclodextrin-based nanosponge inclusion complexation. *Polymers*, 13(23). Article number: 4073. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13234073>.
- Matencio, A., García-Carmona, F., López-Nicolás, J. M. 2016. Encapsulation of piceatannol, a naturally occurring hydroxylated analogue of resveratrol, by natural and modified cyclodextrins. *Food & Function*, 7(5), pp. 2367–2373. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6FO00557H>.
- Minns, J. W., Khan, A. 2002. α -Cyclodextrin- I_3 host – guest complex in aqueous solution: Theoretical and experimental studies. *The Journal of Physical Chemistry A*, 106(26), pp. 6421–6425. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp020628r>.
- Mohammed-Saeid, W., Karoyo, A. H., Verrall, R. E., Wilson, L. D. et al. 2019. Inclusion complexes of melphalan with gemini-conjugated β -cyclodextrin: Physicochemical properties and chemotherapeutic efficacy in in-vitro tumor models. *Pharmaceutics*, 11(9). Article number: 427. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11090427>.
- Mohandoss, S., Atchudan, R., Edison, T. N. J. I., Mandal, T. K. et al. 2019. Enhanced solubility of guanosine by inclusion complexes with cyclodextrin derivatives: Preparation, characterization, and evaluation. *Carbohydrate Polymers*, 224. Article number: 115166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115166>.
- Moini, J., Pereira, K., Samsam, M. 2020. Epidemiology of thyroid disorders. Elsevier; Amsterdam, The Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03841-4>.
- Mura, P. 2014. Analytical techniques for characterization of cyclodextrin complexes in aqueous solution: A review. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 101, pp. 238–250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2014.02.022>.
- Mura, P. 2015. Analytical techniques for characterization of cyclodextrin complexes in the solid state: A review. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 113, pp. 226–238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2015.01.058>.
- Natural sources, physicochemical characterization and applications. 2016. Ed.: C. Apetrei. Bentham Science Publishers (Series Title: Frontiers in Bioactive Compounds, Vol. 1). DOI: <https://doi.org/10.2174/97816810834141160101>.
- Neoh, T.-L., Noda, Y., Yoshii, H., Furuta, T. 2006. Release characteristics of iodine encapsulated in cyclodextrins. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 56, pp. 117–123. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10847-006-9072-7>.
- Nikolaeva, N. V., Mitroshina, D. P., Slavyansky, A. A., Gribkova, V. A. et al. 2021. Sucrose crystals as the basis of sugar-containing products. *Sugar*, 8, pp. 34–39. = Николаева Н. В., Митрошина Д. П., Славянский А. А., Грибкова В. А. [и др.]. Кристаллы сахарозы как основа сахаросодержащих продуктов // Сахар. 2021. № 8. С. 34–39. DOI: 10.24412/2413-5518-2021-8-34-38. EDN: ONLDGW. (In Russ.)
- O’Kane, S. M., Mulhern, M. S., Pourshahidi, L. K., Strain, J. J. et al. 2018. Micronutrients, iodine status and concentrations of thyroid hormones: A systematic review. *Nutrition reviews*, 76(6), pp. 418–431. DOI: <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy008>.
- Polumbryk, M., Kravchenko, V., Pasichnyi, V., Omelchenko, C. et al. 2019. The effect of intake of sausages fortified with β -CD-I2 complex on iodine status and thyroid function: A preliminary study. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 51, pp. 159–163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.10.014>.
- Qu, Q., Tucker, E., Christian, S. D. 2002. Sulfoalkyl ether β -cyclodextrin derivatives: Synthesis and characterizations. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 43, pp. 213–222. DOI: <https://doi.org/10.1023/a:1021255314835>.
- Raffaini, G., Ganazzoli, F. 2019. A molecular dynamics study of a photodynamic sensitizer for cancer cells: Inclusion complexes of γ -Cyclodextrins with C_{70} . *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19). Article number: 4831. DOI: <http://doi.org/10.3390/ijms20194831>.
- Saokham, P., Muankaew, C., Jansook, P., Loftsson, T. 2018. Solubility of cyclodextrins and drug/cyclodextrin complexes. *Molecules*, 23(5). Article number: 1161. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules23051161>.
- Sbârcea, L., Ledeti, A., Udrescu, L., Văruț, R. M. et al. 2019. Betulonic acid-cyclodextrins inclusion complexes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138, pp. 2787–2797. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10973-019-08359-6>.

- Sharipov, A. T., Boboev, Z. D., Fazliev, S. A., Aminov, S. N. 2017. Standartization of the iodine- β -cyclodextrine substance. *Pharmaceutical Journal*, 2, pp. 59–63.
- Slavyansky, A. A., Gribkova, V. A., Nikolaeva, N. V., Mitroshina, D. P. 2021. Study of the possibility of using a granulated sugar-containing product with functional additives in the production of jelly fillings. *Food Processing: Techniques and Technology*, 51(4), pp. 859–868. = Славянский А. А., Грибкова В. А., Николаева Н. В., Митрошина Д. П. Исследование возможности применения гранулированного сахаросодержащего продукта с функциональными добавками при производстве жележных начинок // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 4. С. 859–868. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-859-868>. EDN: NEQQJX. (In Russ.)
- Slavyansky, A. A., Sapronov, A. R., Lobanova, A. P., Pugachev, V. A. et al. 1984. Improving the working conditions of the product department at the Chimshinsky sugar plant. *Sugar Industry*, 10, pp. 22–25. = Славянский А. А., Сапронов А. Р., Лобанова А. П., Пугачев В. А. [и др.]. Улучшение условий работы продуктового отделения на Чимшинском сахарном заводе // Сахарная промышленность. 1984. № 10. С. 22–25. EDN: EECHCT. (In Russ.)
- Topuz, F., Uyar, T. 2022. Advances in the development of cyclodextrin-based nanogels/microgels for biomedical applications: Drug delivery and beyond. *Carbohydrate Polymers*, 297. Article number: 120033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120033>.
- Tsyplikhin, N. O., Komarova, E. V., Fedorova, M. G., Vasiliev, V. S. 2025. Statistics of general morbidity and mortality from non-neoplastic diseases of the thyroid gland in iodine-deficient regions located in the zone of radioactive contamination (on the example of the Penza region). *The Siberian Scientific Medical Journal*, 45(1), pp. 221–227. = Цыплихин Н. О., Комарова Е. В., Фёдорова М. Г., Васильев В. С. Статистика общей заболеваемости и смертности от неопухолевых заболеваний щитовидной железы в йододефицитных регионах, находившихся в зоне радиоактивного загрязнения (на примере Пензенской области) // Сибирский научный медицинский журнал. 2025. Т. 45, № 1. С. 221–227. DOI: <https://doi.org/10.18699/SSMJ20250124>. EDN: FUNSYE. (In Russ.)
- Venuti, V., Corsaro, C., Stancanelli, R., Paciaroni, A. et al. 2019. Analysis of the thermal fluctuations in inclusion complexes of genistein with β -cyclodextrin derivatives. *Chemical Physics*, 516, pp. 125–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2018.09.003>.
- Wang, T., Li, B., Feng, Y., Guo, Q. 2011. Preparation, quantitative analysis and bacteriostasis of solid state iodine inclusion complex with β -cyclodextrin. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 69, pp. 255–262. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10847-010-9836-y>.
- Xiao, Z., Hou, W., Kang, Y., Niu, Y. et al. 2019. Encapsulation and sustained release properties of watermelon flavor and its characteristic aroma compounds from γ -cyclodextrin inclusion complexes. *Food Hydrocolloids*, 97. Article number: 105202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105202>.
- Zhang, J., Ma, P. X. 2013. Cyclodextrin-based supramolecular systems for drug delivery: Recent progress and future perspective. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65(9), pp. 1215–1233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2013.05.001>.
- Zhu, G., Feng, N., Xiao, Z., Zhou, R. et al. 2015. Production and pyrolysis characteristics of citral-monochlorotriazinyl- β -cyclodextrin inclusion complex. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120, pp. 1811–1817. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4498-z>.
- Zimmermann, M. B. 2012. Iodine and iodine deficiency disorders. In *Present Knowledge in Nutrition*. Eds.: J. W. Erdman, I. A. Macdonald, S. H. Zeisel. Wiley-Blackwell; Oxford, UK, pp. 554–567. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119946045.ch36>.

Сведения об авторах

Грибкова Вера Анатольевна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), канд. техн. наук, доцент;
e-mail: vera_gribkova@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-8132>

Vera A. Gribkova – 73 Zemlyanoy Val Str., Moscow, Russia, 109004;
Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University),
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: vera_gribkova@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5079-8132>

Митрошина Дарья Петровна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), канд. техн. наук, доцент;
e-mail: d_mitr96@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8724-3368>

Daria P. Mitroshina – 73 Zemlyanoy Val Str., Moscow, Russia, 109004;
Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University),
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: d_mitr96@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8724-3368>

Славянский Анатолий Анатольевич – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), д-р техн. наук, профессор;
e-mail: mgutu-sahar@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0262-8841>

Anatoliy A. Slavyanskiy – 73 Zemlyanoy Val Str., Moscow, Russia, 109004;
Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University),
Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: mgutu-sahar@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0262-8841>

Николаева Наталья Валерьевна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), канд. техн. наук, доцент;
e-mail: nata_nik@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4349-1287>

Natalia V. Nikolaeva – 73 Zemlyanoy Val Str., Moscow, Russia, 109004;
Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University),
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: nata_nik@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4349-1287>

Литвяк Владимир Владимирович – ул. Некрасова, 11, г. Люберцы, Московская обл., Россия, 140051;
ВНИИ крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья – филиал Федерального исследовательского
центра картофеля имени А. Г. Лорха, д-р техн. наук, канд. хим. наук, доцент, вед. науч. сотрудник;
e-mail: besserk1974@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1456-9586>

Vladimir V. Litvyak – 11 Nekrasov Str., Lyubertsy, Moscow region, Russia, 140051;
All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing –
Branch of Russian Potato Research Centre,
Dr Sci. (Engineering), Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Leading Researcher;
e-mail: besserk1974@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1456-9586>

Шилов Валерий Викентьевич – ул. Долгобродская, 23/1, г. Минск, Республика Беларусь, 220070;
Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова Белорусского
государственного университета, канд. биол. наук; доцент;
e-mail: valery.shilov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2716-4182>

Valery V. Shilov – 23/1 Dolgobrodskaya Str., Minsk, Republic of Belarus, 220070;
International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University,
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor;
e-mail: valery.shilov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2716-4182>

УДК 665.939.14

Разработка рецептур функциональных мучных кондитерских изделий с использованием альтернативных белковых компонентов

Д. А. Иванова*, Е. В. Тарабанова

*Новосибирский государственный аграрный университет, г. Новосибирск, Россия;

e-mail: iva_dasha@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8400-1455>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
01.04.2025;

получена
после доработки
29.04.2025;

принята
к публикации
15.05.2025

Ключевые слова:

функциональные
пищевые продукты,
альтернативный белок,
растительный белок,
бобовые культуры,
аквафаба,
бисквит

Тема поиска альтернативных источников белка является актуальной во всем мире по целому ряду причин: дефицит пищевого белка, аллергии на определенные виды белка, опасность животноводства для экологии, рост популярности вегетарианства и веганства, рост численности представителей определенных религиозных конфессий. В качестве замены традиционному животному белку часто рассматривают растительные белки, особенно белки зерновых и зернобобовых культур. Из последних сообществом вегетарианцев и веганов было получено вещество, по своим физическим свойствам схожее с белком яйца – аквафаба. Она представляет собой отвар или заливочную жидкость консервов из бобовых культур. В статье представлена разработка рецептур мучных кондитерских изделий с использованием аквафабы фасоли в качестве альтернативы белка куриного яйца. При составлении первой рецептуры яичный белок заменяли аквафабой на 50 %, во второй рецептуре – на 100 %. В качестве функционального ингредиента в рецептуру ввели морковный порошок как источник пищевых волокон. В результате опытов установлено, что оптимальное качество готовой продукции достигается при введении в состав 50 % аквафабы. Органолептические, физико-химические и микробиологические показатели бисквита с аквафабой соответствуют требованиям нормативной документации.

Для цитирования

Иванова Д. А. и др. Разработка рецептур функциональных мучных кондитерских изделий с использованием альтернативных белковых компонентов. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 164–174. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-164-174>.

Modeling of flour confectionery recipes using alternative functional components

Darya A. Ivanova*, Evgeniya V. Tarabanova

*Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia;

e-mail: iva_dasha@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8400-1455>

Article info

Received
01.04.2025;

received
in revised form
29.04.2025;

accepted
15.05.2025

Key words:

functional food
products,
alternative protein,
vegetable protein,
legumes,
aquafaba,
biscuit

Abstract

Finding alternative sources of protein is topical worldwide for a number of reasons: deficiency of dietary protein, allergies to certain types of protein, environmental hazards of animal agriculture, the growing popularity of vegetarianism and veganism, and the growing number of representatives of certain religious denominations. Plant proteins, especially proteins from cereals and legumes, are often considered as a substitute for traditional animal protein. From the latter, the vegetarian and vegan community has produced a substance similar in physical properties to egg white – aquafaba. It represents a decoction or pouring liquid of canned legumes. The paper presents the development of recipes of flour confectionery products with the use of aquafaba beans as an alternative to the protein of chicken eggs. In the first formulation, egg white was replaced with aquafaba by 50 %, in the second formulation – by 100 %. As a functional ingredient, carrot powder has been introduced into the formulation as a source of dietary fiber. As a result of experiments it has been found that the optimal quality of the finished product is achieved when 50 % aquafaba is introduced into the composition. Organoleptic, physicochemical and microbiological indicators of biscuits with aquafaba meet the requirements of regulatory documentation.

For citation

Ivanova, D. A. et al. 2025. Modeling of flour confectionery recipes using alternative functional components. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 164–174. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-164-174>.

Введение

Продовольственная безопасность обеспечивается устойчивыми продовольственными системами. В последних белок играет жизненно важную роль, поскольку он выполняет в организме человека множество функций: является источником энергии, строительным материалом, входит в состав ферментов и гормонов и многое другое (Величко и др., 2022; Бурак и др., 2024). В настоящее время человечество продолжает бороться со всемирным дефицитом белка (Герасимов, 2024). Численность населения нашей планеты с каждым годом неизбежно растет, а обеспечить людей пищей, богатой полноценными белками, становится сложнее (Фоменко, 2021).

Тема поиска альтернативных источников пищевого белка становится все актуальнее. Это связано с целым рядом причин: рост численности населения, недоступность животного белка для малообеспеченных слоев общества, влияние животноводства на экологию, пищевые аллергии на отдельные виды животных белков, увеличение популярности вегетарианства и веганства и др. (Стешиц, 2023; Гостюхин и др., 2022). Поиск новых источников полноценных белков проводится в различных направлениях – от использования традиционных растительных белков до получения белка из насекомых и микроорганизмов (Сутула и др., 2023; Борисова, 2021; Прохода и др., 2024).

Одним из наиболее многообещающих альтернативных источников белка, изучаемых с помощью пищевых технологий, является белок растительного происхождения. Подобного рода белки получают из различных растений, таких как соевые бобы, горох, чечевица и нут (Черникова и др., 2018; Мирзаев и др., 2023). Среди растительных белков одними из наиболее полноценных по аминокислотному составу считаются белки бобовых культур, валовый сбор которых неуклонно растет (Полухин и др., 2022). Зернобобовые растения содержат большое количество незаменимых аминокислот, особенно лизина и лейцина (табл. 1), необходимых для формирования иммунитета, построения и развития мышечных тканей (Радионова и др., 2020).

Таблица 1. Содержание белка и незаменимых аминокислот в различных видах бобовых культур
(Радионова и др., 2020)

Table 1. Protein and essential amino acids content in different types of legumes (Radionova et al., 2020)

Виды бобовых культур	г/100 г	мг/100 г									
	Белки	Trp	Ile	Val	Leu	Thr	Lys	Met	Phe	Arg	His
Люпин	36,2	289	161,5	151	274,3	133,1	193,3	25,5	143,5	387,7	103
Соевые бобы	34,9	654	1643	1737	2750	1506	2183	679	1696	2611	1020
Чечевица	24,0	220	1020	1270	1890	960	1720	290	1250	2050	710
Маш	23,5	260	1008	1010	1847	782	1664	286	1443	1672	695
Фасоль	21,0	260	1030	1120	1740	870	1590	240	1130	1120	570
Горох	20,5	260	1090	1010	1650	840	1550	210	1010	1620	460
Нут	20,1	200	882	865	1465	766	1377	270	1103	1939	566

Изучение белков бобовых началось еще в XIX в. с работ Томаса Берра Осборна и его коллег (Бельшикина, 2018). В 2014 г. при попытке использования жидкости консервированного нута для приготовления вегетарианской меренги, французским вегетарианцем Жоэлем Росселем было открыто новое вещество – аквафаба.

Аквафаба (от лат. aqua – вода, faba – боб) – это название вязкой жидкости, получаемой в результате варки зерен бобовых культур (Serventi, 2020). Аквафаба является широко используемой в домашней кулинарии заменой яичного белка: 30–40 мл отвара бобовых используют вместо белка 1 куриного яйца. При взбивании аквафаба превращается в плотную белую пену – такую же, как при взбивании белка яиц (Рязанцева и др., 2022; Huang et al., 2022). Обладая такими функциональными свойствами, как пенообразование, эмульгирование, стабилизация и загущение, аквафаба находит применение в приготовлении многих пищевых продуктов: муссов, майонезов, масла, беже, бисквитов и т. д. (Fuentes Choya et al., 2023).

На сегодняшний день известно несколько видов аквафабы:

- порошковая;
- полученная при отваривании зерен бобовых культур;
- полученная из консервированных бобовых культур.

Использование последней является примером развития безотходного производства, поскольку ранее эта часть консервов считалась бесполезной и утилизировалась.

Многие годы исследования растительного белка проводились исключительно на сое. Другие бобовые культуры, несмотря на широкое применение, долгое время не подвергались тщательному изучению

(Белышкина, 2018; Синеговский, 2024). В Европе первой была открыта аквафаба нута, и большая часть зарубежных рецептов также используют жидкость именно из этой консервированной культуры. Если говорить о промышленных масштабах, то порошковая аквафаба сегодня также производится из нута. Однако в России широко распространены такие бобовые, как горох и фасоль. По химическому составу эти культуры, также как и нут, сопоставимы с белком куриного яйца (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав белка куриного яйца и отдельных видов аквафабы бобовых культур
(Ларькина и др., 2023)

Table 2. Chemical composition of protein of hen egg and some species of legume aquafaba
(Larkina et al., 2023)

Показатель	Содержание			
	Яичный белок	Аквафаба гороха	Аквафаба фасоли	Аквафаба нута
Белки, г	11,1	2,75	6,1 г	6,3
Жиры, г	0,2	–	–	–
Углеводы, г	1,0	5,3	14,9	15,8
Дубильные в-ва, %	3,2	3,2	3,2	3,2
Витамин К1, %	–	2,1	0,1	4,0
Витамины группы В, %	3	4,2	0,8	0,2
β-каротин, %	–	0,1	0,2	4,0
Калий, %	6,1	11,0	0,4	3,0
Кальций, %	1,0	4,7	1,5	2,5
Магний, %	2,3	8,3	2,5	5,3
Железо, %	0,8	8,2	0,6	3,2
Марганец, %	–	16,0	0,5	10,0
Медь, %	5,2	16,0	1,0	5,0
Цинк, %	1,9	4,7	8,3	1,7
Кобальт, %	10	0,1	10,0	0,1

Однако в настоящее время в России и странах СНГ на полках магазинов практически полностью отсутствуют продукты на основе или с использованием аквафабы. Это связано с неосведомленностью производителей о существовании данного вида сырья, его технологических свойствах и перспективах использования. Последние несколько лет увеличилось количество русскоязычных научных статей, посвященных исследованию аквафабы, получаемой различными способами и из различных видов бобовых культур. При этом тема все еще является малоизученной, что обуславливает научную новизну данного исследования. Необходимо большее количество данных об аквафабе как сырье и продуктах на ее основе для дальнейшего внедрения аквафабы в пищевую промышленность.

Помимо альтернативных источников белка трендовым направлением в пищевой индустрии на сегодняшний день являются функциональные продукты питания. Функциональные продукты питания – это пищевые продукты, обогащенные дополнительными ингредиентами, обладающими научно обоснованными и подтвержденными свойствами и предотвращающими или восполняющими имеющийся в организме человека дефицит питательных веществ, что способствует сохранению и улучшению здоровья населения (Снегирева, 2021).

Физиологически функциональный пищевой ингредиент – это вещество или комплекс веществ животного, растительного, микробиологического, минерального происхождения или идентичные натуральным, а также живые микроорганизмы, входящие в состав функционального пищевого продукта в количестве от 10 до 15 % от суточной физиологической потребности в расчете на одну порцию продукта. Они обладают способностью благоприятно воздействовать на организм человека, помогая лучше усваивать те или иные полезные вещества, попадающие в организм вместе с пищей (Морева, 2020). К физиологически функциональным пищевым ингредиентам относят пищевые волокна, витамины, минеральные вещества, полиненасыщенные жирные кислоты, пробиотики, пребиотики или синбиотики.

В настоящее время установлено, что в рацион питания человека помимо основных пищевых веществ должны быть включены балластные вещества: клетчатка, гемицеллюлоза, пектин, которые являются физиологически важными компонентами пищи. Особое место в рациональном питании человека отводится неусвояемым углеводам – пищевым волокнам, которые играют важную роль в процессе пищеварения и обмена веществ в целом, а также оказывают влияние на развитие нормальной кишечной микрофлоры. Пищевые волокна могут быть получены из различного овощного сырья путем его измельчения и высушивания (Мазалевский и др., 2023; Дроздов и др., 2019). В данной работе будет использован порошок моркови.

Таблица 3. Химический состав сушеной моркови (*Химический...*, 1987)
Table 3. Chemical composition of dried carrots (*Chemical...*, 1987)

Показатель	Содержание
Вода, г/100 г	14,0 г
г/100 г сухих веществ	
Белки	7,8 г
Жиры	0,6 г
Углеводы	49,2 г
Клетчатка	7,2 г
Минеральные вещества, мг/100 г сухих веществ	
Na	59,0 мг
K	967,0 мг
Ca	105,0 мг
Mg	56,0 мг
P	294,0 мг
Fe	3,0 мг
Витамины, мг/100 г сухих веществ	
β-каротин	40,0 мг
Тиамин (B1)	0,12 мг
Рибофлавин (B2)	0,3 мг
Ниацин (PP)	2,6 мг
Витамин С	10,0 мг
Энергетическая ценность на 100 г, ккал	
226	

Помимо содержания клетчатки пищевая ценность моркови обусловлена высоким содержанием углеводов, пищевых волокон, минеральных элементов и т. д. Отмечается особенно высокое содержание в моркови калия, кальция и фосфора (табл. 3), играющих большую роль в работе сердечно-сосудистой и опорно-двигательной систем организма. Бета-каротин обладает антиканцерогенными, антимутагенными, антиоксидантными, радиопротекторными, иммуномодулирующими, противовоспалительными и антитоксическими свойствами (*Ачмиз и др.*, 2023). Морковь является практически идеальной культурой, для нее характерна высокая урожайность корнеплодов, неприхотливость к условиям возделывания, стойкость к болезням и вредителям (*Толстомятова*, 2016).

Материалы и методы

Исследования проведены на базе лабораторий кафедры технологии пищевых производств и индустрии питания Новосибирского государственного аграрного университета (НГАУ).

Объектами исследований являлись образцы кондитерских изделий (бисквит), изготавливаемые с использованием морковного порошка "Порошок моркови столовой сушеной" торговой марки Mageric и аквафабы консервированной красной и белой фасоли марки "Красная цена" (рис. 1).



Рис. 1. Образцы аквафабы, используемые в исследованиях
Fig. 1. Aquafaba samples used in the research

Изготавливали контрольные и опытные образцы по стандартной технологии бисквитного полуфабриката в соответствии со "Сборником рецептов мучных, кондитерских и булочных изделий"¹.

¹ Сборник рецептов мучных, кондитерских и булочных изделий / сост. А. В. Павлов. СПб. : Профи, 2012. 296 с.

Оценка органолептических показателей проводилась по 5-балльной шкале в соответствии с ГОСТ 31986-2012² "Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания".

Массовую долю влаги и сухих веществ высушиванием определяли согласно ГОСТ 5900-2014³ "Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ в сушильном шкафу ШСВ-250-01".

Определение кислотности титрованием проводилось согласно требованиям ГОСТ 5898-2022⁴ "Изделия кондитерские. Методы определения кислотности и щелочности".

Пищевую и энергетическую ценности рассчитывали по стандартной формуле.

Результаты и обсуждение

В рецептурах опытных образцов производили замену 50 и 100 % яичного белка и желтка на аквафабу красной или белой фасоли.

Рецептуры бисквитов были рассчитаны на 1 кг готового теста (табл. 4). Основными компонентами рецептуры бисквитного теста являлись мука, сахар, яйцо. Функциональная добавка – порошок моркови – был введен в рецептуру в количестве не менее 15 % от суточной физиологической потребности пищевых волокон согласно требованиям ГОСТ Р 52349-2005⁵ "Продукты пищевые. Продукты пищевые функциональные. Термины и определения".

Таблица 4. Модельные рецептуры бисквита с использованием аквафабы

Table 4. Model biscuit recipes using aquafaba

Сырье	Масса сырья, нетто, г				
	Контроль	Опыт 1 (50 % яйцо + 50 % а/ф красной фасоли)	Опыт 2 (100 % а/ф красной фасоли)	Опыт 3 (50 % яйцо + 50 % а/ф белой фасоли)	Опыт 4 (100 % а/ф белой фасоли)
Мука пшеничная	296,1	296,1	296,1	296,1	296,1
Яйцо (белок)	251,5	110,55	–	110,55	–
Яйцо (желток)	88,6	59,5	–	59,5	–
Аквафаба	–	170,05	340,1	170,05	340,1
Соль	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Сахар-песок	352,3	342,3	342,3	342,3	342,3
Морковный порошок	–	10,0	10,0	10,0	10,0
Разрыхлитель	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7
Выход	1000	1000	1000	1000	1000

На рис. 2 представлены технологические схемы для производства бисквита с полной и частичной заменой животного белка растительным. При частичной замене куриного яйца аквафаба взбивается в течение 2 мин, отдельно взбивается желток, к которому параллельно добавляется сахар и соль. При частичной замене куриного яйца аквафаба взбивается в течение 2 мин, отдельно взбивается желток, к которому параллельно добавляется сахар и соль. Обе смеси аккуратно объединяются, постепенно добавляется просеянную муку с разрыхлителем и морковный порошок, перемешивается до однородной консистенции. Тесто раскладывают в формы, предварительно смазанные маслом или выстланные бумагой, и выпекают при температуре 160 °С в течение 25 мин. Готовые изделия охлаждают до температуры 25 °С.

При проведении органолептической оценки (рис. 3) установили, что образцы 1 и 3 с заменой яйца на 50 % аквафабой красной или белой фасолью получили максимальное среднее количество баллов 4,75, у данных образцов отмечено отсутствие яичного привкуса. Образцам 2 и 4 была снижена оценка (3,75) по показателям внешний вид и консистенция, поскольку изделия недостаточно поднялись при выпекании, вследствие чего отсутствовала характерная выпуклая поверхность на изделиях, а также присутствовало послевкусие бобовых, тесто недостаточно пропеклось, мякиш имел липкую консистенцию.

² ГОСТ 31986-2012. Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/54760/?ysclid=maxkh0y69h923663274>.

³ ГОСТ 5900-2014. Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ в сушильном шкафу ШСВ-250-01. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/59225/?ysclid=maxkl0sq5n99044403>.

⁴ ГОСТ 5898-2022. Изделия кондитерские. Методы определения кислотности и щелочности. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/78162/?ysclid=maxklxqp5g392406406>.

⁵ ГОСТ Р 52349-2005. Продукты пищевые. Продукты пищевые функциональные. Термины и определения. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/2161/?ysclid=maxknrug9t810833098>.

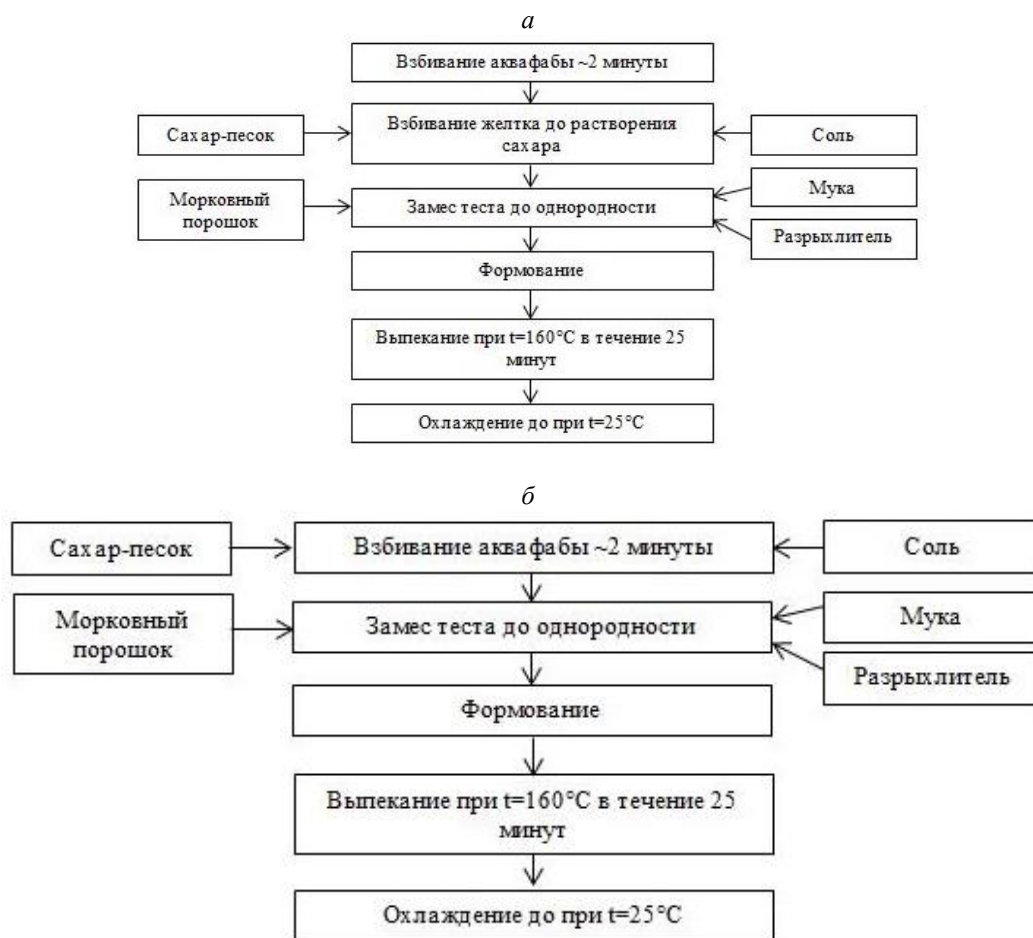


Рис. 2. Технологическая схема приготовления бисквита с заменой белка аквафабой:
а – с частичной; *б* – с полной

Fig. 2. Technological scheme of biscuit preparation with protein replacement by aquafaba:
a – partial; *b* – full

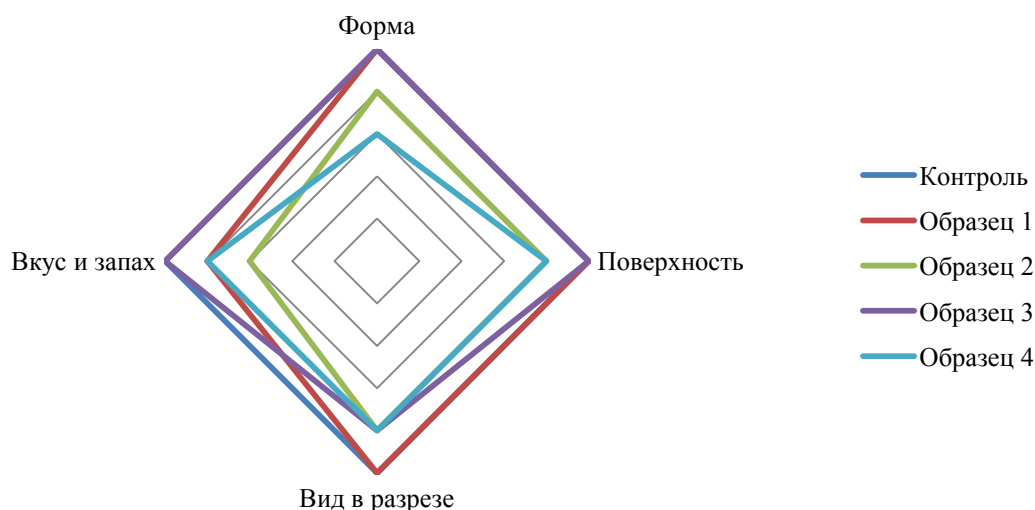


Рис. 3. Органолептические параметры бисквита с использованием аквафабы
Fig. 3. Organoleptic parameters of biscuit with aquafaba use

При изучении вида на разрезе (рис. 4) отмечалось, что 1 и 3 опытные образцы на основе смеси 50 : 50 яйца и аквафабы имеют характерный для данного вида изделий вид – пропеченное изделие с равномерной пористой структурой, без пустот и следов непромеса. Состояние мякиша – характерное и сопоставимо с контролем.

Напротив, при полной замене яйца на аквафабу как белой, так и красной фасоли отмечалось, что 2 и 4 опытные образцы муки имеют нехарактерный для бисквитов мякиш, липкую структуру.



Контроль



Опыт 1

50 % яйца + 50 % а/ф красной фасоли



Опыт 2

100 % а/ф красной фасоли



Опыт 3

50 % яйца + 50 % а/ф белой фасоли



Опыт 4

100 % а/ф белой фасоли

Рис. 4. Вид на разрезе бисквитов с использованием в рецептуре аквафабы фасоли

Fig. 4. Sectional view of biscuits using bean aquafaba in the recipe

По содержанию влаги в кондитерских изделиях с использованием аквафабы можно отметить, что в опытных образцах бисквита 2 и 4 наблюдается увеличение данного показателя в среднем на 4–5 % в сравнении с контролем (рис. 5). Повышенное содержание влаги отмечено также у образцов 2 и 4, вследствие чего при определении органолептических показателей, внешнего вида и вида на разрезе у них отметили влажный липкий мякиш. Таким образом, после выпекания образцов бисквитов с использованием аквафабы установили, что при полной замене яйца на аквафабу тесто получалось более клейкое и недопеченное.

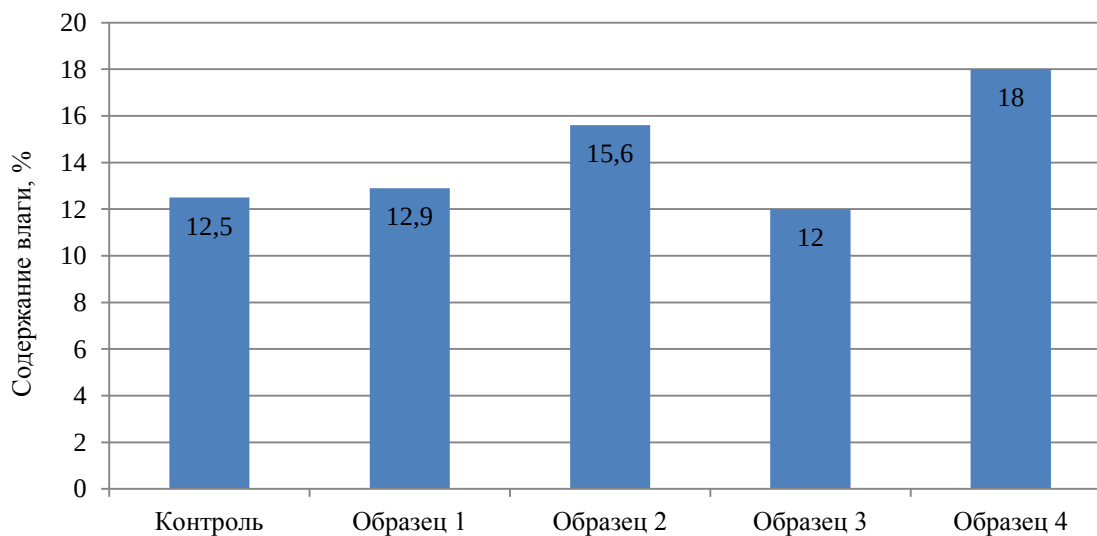


Рис. 5. Содержание влаги в бисквите с использованием аквафабы

Fig. 5. Moisture content in biscuits using aquafaba

Пищевая и энергетическая ценность мучных кондитерских изделий с использованием аквафабы устанавливали расчетным путем. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5. Пищевая ценность бисквита с использованием аквафабы
Table 5. Nutritional value of biscuits using aquafaba

Показатель	Контроль	Опыт 1, 3 (50 % яйцо + 50 % аквафаба)	Опыт 2, 4 (100 % аквафаба)
Белки, г	7,09	5,4	4,16
Жиры, г	2,93	1,43	0,39
Углеводы, г	57,6	57,7	57,92
Клетчатка, г	2,96	3,66	3,66
Энергетическая ценность, ккал / кДж	285,13 / 1 192,98	265,27 / 1 109,89	251,79 / 1 053,49

Анализ пищевой ценности показал, что в сравнении с контролем образцы бисквита с аквафабой имеют меньшую калорийность. Опыты 1 и 3 с частичной заменой имели потерю 1,69 г белка, опыты 2 и 4 с полной заменой яйца аквафабой на 2,93 г в сравнении с контролем, но вместе с тем отмечается снижение содержания жира в опытных образцах на 1 и 2,5 г соответственно.

По калорийности опытных образцов отмечается снижение на 19,86 (опыты 1 и 3) и 33,34 ккал (опыты 2 и 4) в сравнении с контролем (265,27 и 251,79 ккал в 1 и 2 опытных образцах соответственно против 285,13 ккал в контроле).

Добавление порошка моркови увеличило содержание клетчатки в 1,2 раза. Норма потребления клетчатки в сутки для взрослого человека составляет 20–25 г. Процент удовлетворения суточной потребности в клетчатке с добавлением порошка моркови возрос с 11,84 до 14,64 % при норме 25 г/сутки.

Исходя из результатов органолептической и физико-химической экспертизы, оптимальными рецептурами признаны номера 1 и 3 с частичной заменой куриного яйца аквафабой.

Заключение

Технология бисквита, обогащенного пищевыми волокнами, разработана с использованием альтернативного источника белка – аквафабы, по своему химическому составу и реологическим свойствам схожего с яичным белком.

В результате проведенного опыта экспериментально доказана возможность замены белка яйца растительным белком с сохранением качественных показателей готового продукта.

В качестве функционального ингредиента в рецептуру введен порошок моркови, служащий дополнительным источником витаминов, макроэлементов и пищевых волокон.

Итогом исследований стала готовая рецептура с оптимизированной технологией производства бисквитов на основе аквафабы консервированной белой и красной фасоли. Разработанные изделия отличаются высокими органолептическими показателями и обогащенным химическим составом. Калорийность продукта снижена по сравнению с классическим яичным бисквитом, а функциональная значимость повышена за счет включения в состав пищевых волокон.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Ачмиз А. Д., Лисовая Е. В., Викторова Е. П., Схалыхов А. А. Физиологическая роль каротиноидов и их применение в технологиях пищевых продуктов // Новые технологии. 2023. Т. 19, № 1. С. 14–25. DOI: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-1-14-25>. EDN: PKGVVF.
- Бельшикина М. Е. Проблема производства растительного белка и роль зерновых бобовых культур в ее решении // Природообустройство. 2018. № 2. С. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-2-65-73>. EDN: OSIEZF.
- Борисова К. С. Сравнительная оценка альтернативных источников белка // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 2. С. 171–174. EDN: UNBETW.
- Бурак Л. Ч., Егорова З. Е., Саманкова Н. В. Альтернативные источники белка и современные методы его извлечения: обзор предметного поля // Sciences of Europe. 2024. № 150(150). С. 10–23. DOI: 10.5281/zenodo.13926294. EDN: EZAIQ.
- Величко К. И., Калинкина Е. В. Биохимия. Основные питательные вещества человека // Аллея науки. 2022. Т. 1, № 5(68). С. 50–57. EDN: KXNKWO.
- Герасимов А. Б. Проблема дефицита полноценного белка в питании современного человека: пути решения // Стихия Земля : сб. науч. тр. Межрегион. науч.-практ. конф. "Стихия ЗЕМЛЯ", Санаторий "Хилово", Псковская обл., 16–17 января 2024 г. / под ред. М. А. Мамаевой. СПб. : СТЕЛЛА, 2024. С. 107–112. EDN: MKYWFP.

- Гостюхин В. Д., Лопаева Н. Л. Переход на альтернативный белок: предпосылки и перспективы // Молодежь и наука. 2022. № 12. Номер статьи: 1. EDN: QGMEAM.
- Дроздов Р. А., Кожухова М. А., Борисова М. М., Дроздова Т. А. Функциональные свойства пищевых волокон, полученных из продуктов переработки овощей // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2019. № S9. С. 50–61. EDN: EBWYFV.
- Ларькина А. В., Сазонова А. В., Янова М. А. Сравнительная характеристика бобовых культур для производства аквафабы // Научно-практические аспекты развития АПК : материалы национ. науч. конф., г. Красноярск, 18 ноября 2022 г. Красноярск, 2023. С. 202–205. EDN: LYSWBW.
- Мазалевский В. Б., Волончук С. К., Чекрыга Г. П., Станкевич С. В. Способ производства мягкого сыра с порошком из моркови функциональной направленности // Ползуновский вестник. 2023. № 3. С. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.25712/astu.2072-8921.2023.03.014>. EDN: LUUTLM.
- Мирзаев Ж. Д., Эргашев А. М. У. Использование пищевых технологий для разработки альтернативных источников белка // Universum: технические науки. 2023. № 9–4(114). С. 31–32. EDN: FHMERZ.
- Морева А. В. Функциональные пищевые продукты питания // Символ науки: международный научный журнал. 2020. № 5. С. 84–85. EDN KHTZVJ.
- Полухин А. А., Лытнева Н. А., Парушина Н. В. Анализ рынка зерновых и зернобобовых культур в системе ФГИС "Зерно" для продовольственной безопасности страны // Зернобобовые и крупяные культуры. 2022. № 4(44). С. 12–23. DOI: [10.24412/2309-348X-2022-4-12-23](https://doi.org/10.24412/2309-348X-2022-4-12-23). EDN: XJVLCT.
- Прохода И. А., Кубышкин А. В., Слезко Е. И. Протеинсодержащее натуральное сырье как альтернатива пищевого белка // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2024. № 4(72). С. 159–164. DOI: <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2024-72-4-159-164>. EDN: MFCUXP.
- Родионова Н. С., Щетилина И. П., Короткова К. Г., Шолин В. А. [и др.]. Перспективы применения зернобобовых в инновационных технологиях функциональных продуктов питания // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82, № 3(85). С. 153–163 DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-3-153-163>. EDN: QHUIJP.
- Рязанцева А. С., Ковалева А. Е. Использование аквафабы в рецептуре бисквитов, как альтернативы яичному сырью // Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее : сб. науч. ст. 5-й Всерос. науч. конф., Курск, 20–21 октября 2022 г. В 4 т. Т. 3. Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. С. 325–327. EDN: UNHGTI.
- Синеговский М. О. Соя как инструмент компенсации дефицита белка (исторический аспект) // Агронаука. 2024. Т. 2, № 1. С. 16–22. DOI: [10.24412/2949-2211-2024-2-1-16-22](https://doi.org/10.24412/2949-2211-2024-2-1-16-22). EDN: COYGUS.
- Снегирева Н. В. Основные направления создания технологий производства функциональных продуктов питания // Мир Инноваций. 2021. № 4. С. 18–21. EDN: VCXWUM.
- Стешиц О. Анализ тенденций мирового рынка продовольствия и его новых развивающихся сегментов // Аграрная экономика. 2023. № 5(336). С. 81–93. DOI: <https://doi.org/10.29235/1818-9806-2023-5-81-93>. EDN: SONUOR.
- Сутула Г. И., Рябухин Д. С. Микроводоросли и насекомые как альтернативные источники белка: преимущества и риски // Пищевые системы. 2023. Т. 6, № 4. С. 497–503. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-497-503>. EDN: EDWAOR.
- Толстомятова В. А. Подбор функциональных ингредиентов для обогащения мучных изделий // Образование и наука без границ: социально-гуманитарные науки. 2016. № 3. С. 311–314. EDN: UQEUES.
- Фоменко И. А. Белковая недостаточность в питании человека // Евразийское Научное Объединение. 2021. № 7–1(77). С. 52–53. EDN: IRMEWS.
- Химический состав пищевых продуктов. Книга 1. Справочные таблицы содержания основных пищевых веществ и энергетической ценности пищевых продуктов / под ред. И. М. Скурихина, М. Н. Волгарева. М. : Агропромиздат, 1987. 224 с.
- Черникова Н. А., Кошкарова Е. А., Гаптар С. Л., Тарабанова Е. В. [и др.]. Совершенствование технологии производства пищевых продуктов функционального направления // Наука и инновации: векторы развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Барнаул, 24–25 октября 2018 г. : сб. науч. ст. В 2 кн. Кн. 2. Барнаул : РИО Алтайского ГАУ, 2018. С. 128–133. EDN: ZDLBTN.
- Fuentes Choya P., Combarros-Fuertes P., Abarquero Camino D., Renes Bañuelos E. [et al.]. Study of the technological properties of *Pedrosillano* chickpea aquafaba and its application in the production of egg-free baked meringues // Foods. 2023. Vol. 12, Iss. 4. Article number: 902. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods120409022>.
- Huang Z.-g., Wang X.-y., Zhang J.-y., Liu Y. [et al.]. High-pressure homogenization modified chickpea protein: Rheological properties, thermal properties and microstructure // Journal of Food Engineering. 2022. Vol. 335. P. 111196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111196>. EDN: NTAAOZ.
- Serventi L. Upcycling legume water: From wastewater to food ingredient // Springer Nature. Cham, Switzerland, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-42468-8>.

References

- Achmiz, A. D., Lisovaya, E. V., Viktorova, E. P., Skhalyakhov, A. A. 2023. Physiological role of carotenoids and their use in food technology. *New Technologies*, 19(1), pp. 14–25. DOI: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-1-14-25>. EDN: PKGVVF. (In Russ.)
- Belyshkina, M. E. 2018. The problem of plant protein production and the role of grain legumes in its solution. *Prirodooobustrojstvo*, 2, pp. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-2-65-73>. EDN: OSIEZF. (In Russ.)
- Borisova, K. S. 2021. Comparative evaluation of alternative sources of protein. *Bulletin of Youth Science of Altai State Agrarian University*, 2, pp. 171–174. EDN: UNBETW. (In Russ.)
- Burak, L. Ch., Egorova, Z. E., Samankova, N. V. 2024. Alternative protein sources and modern methods of protein extraction: a review of the subject field. *Sciences of Europe*, 150(150), pp. 10–23. DOI: 10.5281/zenodo.13926294. EDN: EZAIPQ. (In Russ.)
- Velichko, K. I., Kalinkina, E. V. 2022. Biochemistry. Basic nutrients of human. *Alley of Science*, 1(5(68)), pp. 50–57. EDN: KXNKWO. (In Russ.)
- Gerasimov, A. B. 2024. Problem of deficiency of high-grade protein in the nutrition of modern man: Ways to solve. Coll. of articles of the Interregional Scientific and Practical Conf. *Earth Element*, Pskov, January 16–17, 2024. St. Petersburg, pp. 107–112. EDN: MKYWFP. (In Russ.)
- Gostyukhin, V. D., Lopaeva, N. L. 2022. Transition to alternative protein: prerequisites and prospects. *Youth and Science*, 12. Article number: 1. EDN: QGMEAM. (In Russ.)
- Drozdov, R. A., Kozhukhova, M. A., Borisova, M. M., Drozdova, T. A. 2019. Functional properties of dietary fibers derived from vegetable processing products. *Electronic Network Polythematic Journal "Scientific Works of KUBSTU"*, S9, pp. 50–61. EDN: EBWYFV. (In Russ.)
- Larkina, A. V., Sazonova, A. V., Yanova, M. A. 2023. Comparative characteristics of legume crops for aquafaba production. Proceedings of the national scientific conf. *Scientific and practical aspects of agroindustrial complex development*, Krasnoyarsk, November 18, 2022. Krasnoyarsk, pp. 202–205. EDN: LYSWBW. (In Russ.)
- Mazalevsky, V. B., Volonchuk, S. K., Chekryga, G. P., Stankevich, S. V. 2023. Method of production of soft cheese with carrot powder of functional orientation. *Polzunovskiy Vestnik*, 3, pp. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.25712/astu.2072-8921.2023.03.014>. EDN: LUUTLM. (In Russ.)
- Mirzaev, J. D., Ergashev, A. M. U. 2023. Use of food technologies for the development of alternative protein sources. *Universum: Technical Sciences*, 9–4(114), pp. 31–32. EDN: FHMERZ. (In Russ.)
- Moreva, A. V. 2020. Functional food nutritional products. *Symbol of Science: International Scientific Journal*, 5, pp. 84–85. EDN: KHTZVJ. (In Russ.)
- Polukhin, A. A., Lytneva, N. A., Parushina, N. V. 2022. Market analysis of cereals and leguminous crops in the system of FGIS "grain" for food security of the country. *Legumes and Groat Crops*, 4(44), pp. 12–23. DOI: 10.24412/2309-348X-2022-4-12-23. EDN: XJVLCT. (In Russ.)
- Prokhoda, I. A., Kubyshev, A. V., Slezko, E. I. 2024. Protein-containing natural raw materials as an alternative to food protein. *Vestnik of the Bashkir State Agrarian University*, 4(72), pp. 159–164. DOI: <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2024-72-4-159-164>. EDN: MFCUXP. (In Russ.)
- Radionova, N. S., Shchetilina, I. P., Korotkova, K. G., Sholin, V. A. et al. 2020. Prospects for the use of grain legumes in innovative technologies of functional foods. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 82(3(85)), pp. 153–163. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-3-153-163>. EDN: QHJGJP. (In Russ.)
- Ryazantseva, A. S., Kovaleva, A. E. 2022. The use of aquafaba in the formulation of biscuits as an alternative to egg raw material. Coll. of articles of the 5th All-Russian scientific conf. *Problems and prospects of development of Russia: Youth perspective in the future*. In 4 vol., Kursk, October 20–21, 2022. Vol. 3. Kursk, pp. 325–327. EDN: UNHGTI. (In Russ.)
- Sinegovsky, M. O. 2024. Soybean as a tool to compensate for protein deficiency (historical aspect). *Agronauka*, 2(1), pp. 16–22. DOI: 10.24412/2949-2211-2024-2-1-16-22. EDN: COYGUS. (In Russ.)
- Snegireva, N. V. 2021. Main directions of creation of technologies for the production of functional foods. *World of Innovation*, 4, pp. 18–21. EDN: VCXWUM. (In Russ.)
- Steshits, O. 2023. Analysis of trends in the world food market and its new emerging segments. *Agrarian Economics*, 5(336), pp. 81–93. DOI: <https://doi.org/10.29235/1818-9806-2023-5-81-93>. EDN: SONUOR. (In Russ.)
- Sutula, G. I., Ryabukhin, D. S. 2023. Microalgae and insects as alternative sources of protein: Benefits and risks. *Food systems*, 6(4), pp. 497–503. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-497-503>. EDN: EDWAOR. (In Russ.)
- Tolstopiatova, V. A. 2016. Selection of functional ingredients for enrichment of flour products. *Education and Science without Borders: Social and Humanities*, 3, pp. 311–314. EDN: UQUEUS. (In Russ.)
- Fomenko, I. A. 2021. Protein deficiency in human nutrition. *Evrasiiskoe Nauchnoe Ob'edinenie*, 7–1(77), pp. 52–53. EDN: IRMEWS. (In Russ.)

- Chemical composition of food products. Book 1. Reference tables of the content of basic nutrients and energy value of food products. 1987. Eds. Skurikhin I. M., Volgarev M. N. Moscow. (In Russ.)
- Chernikova, N. A., Koshkarova, E. A., Gaptar, S. L., Tarabanova, E. V. et al. 2018. Improvement of the technology of production of food products of functional direction. Coll. of articles *Science and innovation: Vectors of development*, in 2 books. Barnaul, Book 2, pp. 128–133. EDN: ZDLBTN. (In Russ.)
- Fuentes Choya, P., Combarros-Fuertes, P., Abarquero Camino, D., Renes Bañuelos, E. et al. 2023. Study of the technological properties of *Pedrosillano* chickpea aquafaba and its application in the production of egg-free baked meringues. *Foods*, 12(4). Article number: 902. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods120409022>.
- Huang, Z.-g., Wang, X.-y., Zhang, J.-y., Liu, Y. et al. 2022. High-pressure homogenization modified chickpea protein: Rheological properties, thermal properties and microstructure. *Journal of Food Engineering*, 335, pp. 111196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111196>. EDN: NTAAOZ.
- Serventi, L. 2020. Upcycling legume water: From wastewater to food ingredient. Springer Nature. Cham, Switzerland. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-42468-8>.

Сведения об авторах

Иванова Дарья Алексеевна – ул. Добролюбова, 160, г. Новосибирск, Россия, 630039;
Новосибирский государственный аграрный университет, аспирант;
e-mail: iva_dasha@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8400-1455>

Darya A. Ivanova – 160 Dobrolyubova Str., Novosibirsk, Russia, 630039;
Novosibirsk State Agrarian University, PhD Student;
e-mail: iva_dasha@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8400-1455>

Тарабанова Евгения Викторовна – ул. Добролюбова, 160, г. Новосибирск, Россия, 630039;
Новосибирский государственный аграрный университет, канд. биол. наук, доцент;
e-mail: evtarabanova@mail.ru

Evgeniya V. Tarabanova – 160 Dobrolyubova Str., Novosibirsk, Russia, 630039;
Novosibirsk State Agrarian University, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,
e-mail: evtarabanova@mail.ru

УДК 663.05, 633.8, 615.32

Биоактивные соединения в экстрактах из листьев облепихи и смородины: от химического состава до практического применения

Э. В. Сынгеева*, Г. П. Ламажапова

*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия;
e-mail: syngeeva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4001-4047>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
25.02.2025;

получена
после доработки
14.04.2025;

принята
к публикации
30.04.2025

Ключевые слова:

смородина,
облепиха,
водно-спиртовые
экстракты,
биологически активные
вещества,
витамин С,
дубильные вещества,
флавоноиды,
витамины,
суммарное содержание
антиоксидантов,
функциональный
ингредиент

Для цитирования

В статье представлены результаты исследования биологически активных веществ (БАВ) в листьях облепихи и смородины, произрастающих в Республике Бурятия. Проведен анализ содержания витамина С, дубильных веществ, флавоноидов и общего количества антиоксидантов в водно-спиртовых экстрактах, полученных с использованием этанола различной концентрации. Установлено, что для максимального извлечения отдельных БАВ требуются специфические условия экстракции, включая оптимальную концентрацию спирта и продолжительность процесса. Например, наибольшее содержание аскорбиновой кислоты в листьях облепихи достигается при использовании 60%-го этанола и настаивании в течение 120 ч, а для дубильных веществ оптимальным является 70%-й раствор спирта с кипячением в течение 45 мин. В листьях смородины максимальная концентрация витамина С наблюдалась после 120 ч мацерации с 50%-м этанолом, а наибольший выход флавоноидов – при экстракции 70%-м спиртом в течение 60 мин. Наибольшее содержание антиоксидантов в листьях облепихи достигалось при использовании 60%-го спирта, а в листьях смородины – 50%-го. Также в экстрактах определено содержание водорастворимых витаминов. Экстракт из листьев облепихи содержит витамин С – 0,805 мг/г, экстракт из листьев смородины – 0,105 мг/г. В экстрактах из листьев облепихи и смородины определено содержание витаминов группы В. Полученные данные подтверждают перспективность использования растительного сырья Бурятии и его экстрактов для разработки биологически активных добавок, фармацевтических препаратов и функциональных ингредиентов для пищевой промышленности. Исследование подчеркивает важность оптимизации технологических процессов для сохранения биологической активности экстрактов и их дальнейшего применения в различных отраслях.

Сынгеева Э. В. и др. Биоактивные соединения в экстрактах из листьев облепихи и смородины: от химического состава до практического применения. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 175–185. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-175-185>.

Bioactive compounds in extracts from sea buckthorn and currant leaves: From chemical composition to practical application

Erzhena V. Syngееva*, Galina P. Lamazhapova

*East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia;
e-mail: syngeeva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4001-4047>

Article info

Received
25.02.2025;

received
in revised form
14.04.2025;

accepted
30.04.2025

Key words:

currant,
sea buckthorn,
hydroalcoholic extracts,
biologically active
substances,
vitamin C,
tannins,
flavonoids,
vitamins,
total antioxidant content,
functional ingredient

For citation

Abstract

The paper presents the results of studying biologically active substances (BAS) in the leaves of sea buckthorn and black currant growing in the Republic of Buryatia. The analysis of the content of vitamin C, tannins, flavonoids, and the total amount of antioxidants in water-alcohol extracts obtained using ethanol of various concentrations has been carried out. It has been established that specific extraction conditions, including the optimal alcohol concentration and duration of the process, are required for the maximum extraction of individual BAS. For example, the highest content of ascorbic acid in sea buckthorn leaves is achieved using 60 % ethanol and maceration for 120 hours, while for tannins, the optimal condition is a 70 % alcohol solution with boiling for 45 minutes. In black currant leaves, the maximum concentration of vitamin C is observed after 120 hours of maceration with 50 % ethanol, and the highest yield of flavonoids has been achieved by extraction with 70 % alcohol for 60 minutes. The highest content of antioxidants in sea buckthorn leaves has been achieved using 60 % alcohol, while in black currant leaves, it has been achieved with 50 % alcohol. The content of water-soluble vitamins has also been determined in the extracts. The extract from sea buckthorn leaves contains vitamin C – 0,805 mg/g, while the extract from black currant leaves – 0,105 mg/g. Additionally, the content of B-group vitamins has been determined in the extracts from sea buckthorn and black currant leaves. The obtained data confirm the potential of using plant raw materials from Buryatia and their extracts for the development of dietary supplements, pharmaceutical preparations, and functional ingredients for the food industry. The study emphasizes the importance of optimizing technological processes to preserve the biological activity of extracts and their further application in various fields.

Syngееva, E. V. et al. 2025. Bioactive compounds in extracts from sea buckthorn and currant leaves: From chemical composition to practical application. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 175–185. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-175-185>.

Введение

В настоящее время традиционно выращенные растения, богатые ценными биоактивными соединениями, привлекают внимание благодаря растущему спросу потребителей на здоровую и натуральную продукцию. В качестве таких продуктов могут использоваться обогащенные фенольными соединениями пищевые продукты, проявляющие антиоксидантную, противовоспалительную и иную биологическую активность. В соответствии с российскими нормами питания взрослому человеку в день требуется до 30 мг флавононов и 30 мг флавонолов, до 200 мг флаван-3-олов, а также по 200 мг конденсированных и гидролизуемых танинов¹. В обзоре *Тутельяна В. А. и др. (2013)* приведены обширные данные о содержании флавононов и флавонолов в различных группах продуктов, включая овощи, фрукты, ягоды, бобовые, чай и вино. Кроме того, представлена информация об уровне потребления этих соединений в разных странах, таких как Нидерланды, Хорватия, Сербия, Греция, Италия, Германия, Дания, США, Китай, Япония, Австралия и Великобритания. Анализ литературных источников выявил отсутствие данных о количественном потреблении флавоноидов населением Российской Федерации. Также на отечественном рынке в настоящее время не представлены функциональные продукты, способные полностью удовлетворить суточную потребность организма в этих биологически активных соединениях. Уникальный питательный состав облепихи и смородины позволяет использовать все части этих растений в безотходных технологиях, а также перерабатывать питательные побочные продукты и остатки для создания высококачественных нутрицевтиков.

Облепиха крушиновидная (*Hippophae rhamnoides L.*) является уникальным растением и на данный момент становится все более популярным объектом аграриев для выращивания с целью получения сырья для пищевой и нутрицевтической промышленности. Bei-Bei Ran в своих исследованиях показал, что ягоды и листья облепихи имеют схожий состав и содержание флавоноидов, тритерпенов, стероидов, органических кислот и летучих масел, при этом имеют некоторые различия, однако содержание флавоноидов в листьях облепихи больше, чем в ягодах (*Ran et al., 2019*).

Raghunath Pariyani с коллегами исследовали листья двух сортов облепихи, выращенных на юге и севере Финляндии в течение двух сезонов роста. Благодаря нецелевому методу метаболомики с использованием протонного ядерного магнитного резонанса (ЯМР) ими было обнаружено, что наибольшая вариация метаболического профиля связана со стадией роста: листья в первые 7 недель сбора урожая содержат много полифенолов, в то время как углеводы и сахара становятся более распространенными в последующие недели роста. Место произрастания кустарников также оказывает значительное влияние на метаболический профиль – сравнение севера и юга показало различия в жирных кислотах и сахарах. Была обнаружена потенциальная связь метаболома и с естественными абиотическими стрессорами – показана обратная корреляция между содержанием углеводов/сахаров и жирных кислот с более длинными цепями углерода, а также установлена связь с температурными переменными (*Pariyani et al., 2020*).

Nicole Ollinger с коллегами изучали воздействие облепихового масла, экстрактов плодов, листьев и жмыха на метаболизм глюкозы после приема пищи. В результате исследований выявлено, что облепиха в опытах *in vivo* стимулировала перемещение GLUT4 в плазматическую мембрану, сравнимую с инсулином, что приводило к увеличению выведения глюкозы из кровотока за счет присутствия в ней изорамнетина. Биологическую активность изорамнетина, обнаруженного во всех исследованных образцах облепихи, авторы связали с его способностью вызывать транслокацию GLUT4 из цитоплазмы на поверхность клеток (*Ollinger et al., 2022*).

В Селенгинском районе Республики Бурятия (2023) был запущен завод по промышленной переработке облепихи. Предприятие специализируется на производстве высококачественного облепихового масла, однако ассортимент продукции из других ценных частей растения остается пока ограниченным (*Котова и др., 2023*). В связи с этим перспективным направлением представляется исследование листьев облепихи, которые также содержат ценные биологически активные соединения и могут расширить линейку функциональных продуктов предприятия.

Черная смородина (*Ribes nigrum L.*) – это небольшой многолетний кустарник, естественно произрастающий в Центральной Европе и Северной Азии. Кроме традиционного применения в народной медицине, современные исследования выявили у черной смородины значительные противовоспалительные, антиоксидантные и антимикробные свойства. Эти свойства обусловлены биохимическим составом ягод, который включает антоцианы (в частности, дельфинидин-3-О-глюкозид, дельфинидин-3-О-рутинозид, цианидин-3-О-глюкозид и цианидин-3-О-рутинозид), флавонолы, фенольные кислоты и полиненасыщенные жирные кислоты (*Bilici, 2021*). Также исследования сосредоточены на терапевтическом потенциале черной смородины в отношении гипертонии и других сердечно-сосудистых заболеваний, онкологических, нейродегенеративных и глазных болезней, нефролитиаза и диабетической нейропатии. Рассматривались вопросы безопасности и будущие направления исследований, включая необходимость тщательного изучения

¹ МР 2.3.1.0253-21. Об утверждении рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающим современным требованиям здорового питания / приказ Минздрава РФ от 19.08.2016. № 614. М. : Вестник образования России, 2021. № 19. 72 с.

точных механизмов действия, специфических антиоксидантных свойств черной смородины и важность проведения хорошо спланированных клинических испытаний для успешного применения черной смородины в клинической практике (Garbacki et al., 2004). Листья смородины богаты флавоноидами (кемпферол, кверцетин и мирицетин), эфирными маслами (сабинен, фенол, нафтол, карен, кариофиллен, цимен, линалоол, гераниол, лимонен, пеландрен, метилсалицилат, бензальдегид и метилэтилбензоат), иридоидами (асперулин), цианогенными соединениями и катехинами (катехин, раллокатехин), углеводами (глюкоза, фруктоза, сахарозаны и пентозаны), фенолкарбоновыми и другими карбоновыми кислотами (Стрельцина и др., 2010; Paniagua-Zambrana et al., 2024).

Антиоксидантные свойства экстракта листьев *R. nigrum* были дополнительно изучены на моделях микроглиальных клеток BV-2. Исследования показали, что экстракт влияет на активность ключевых ферментов, таких как каталаза и Асu1-СoА оксидаза 1 (АСОХ1), а также на экспрессию связанных генов (*Cat*, *iNos*, *Il-1 β* , *Tnf- α* , *Abcd1*) в микроглиальных клетках Wt. В клетках Wt после 24-часовой обработки экстрактом активность АСОХ1 снижалась, тогда как активность каталазы оставалась неизменной. При более длительном воздействии наблюдалось снижение активности как каталазы, так и АСОХ1. В клетках, которые служат моделью окислительного стресса, увеличение активности каталазы отмечалось только через 48 ч после обработки. При этом экстракт способствовал снижению образования активных форм кислорода и оксида азота (NO), что подтверждает его выраженные антиоксидантные свойства в исследуемых клеточных моделях (Minasyan et al., 2025).

В настоящее время одной из актуальных задач в области переработки растительного сырья является эффективное извлечение и сохранение ценных БАВ. При переработке, например, в экстракты полезные соединения из листьев становятся более доступными для усвоения организмом, что позволяет максимизировать их пользу без риска побочных эффектов.

Цель данного исследования состояла в анализе химического состава экстрактов, полученных из листьев облепихи и смородины, для оценки их потенциала в качестве функциональных компонентов в пищевой промышленности.

Материалы и методы исследования

Растительный материал для исследования был собран на территории республики Бурятия в период с 2022 по 2024 гг. Для приготовления водно-спиртовых экстрактов (ВСЭ) листья смородины и облепихи измельчали до размера частиц 2 ± 1 мм. Экстракция проводилась методом дробной мацерации при температурах от 20 до 80 °С с использованием этанола различной концентрации от 40 до 70 % (Сынгеева и др., 2023).

Содержание аскорбиновой кислоты (АК) и витаминов группы В определялось методом капиллярного электрофореза (ГОСТ 31483-2012. Премикусы. Определение содержания витаминов: В1 (тиаминхлорида), В2 (рибофлавина), В3 (пантотеновой кислоты), В5 (никотиновой кислоты и никотиамида), В6 (пиридоксина), Вс (фолиевой кислоты), С (аскорбиновой кислоты) методом капиллярного электрофореза²) на анализаторе "Капель 105 М" в Центре коллективного пользования "Прогресс" Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (ВСГУТУ).

Содержание дубильных веществ (ДВ) устанавливали в соответствии с ОФС 1.5.3.000.15 в пересчете на танин, содержание флавоноидов (ФЛ) – спектрофотометрическим методом в пересчете на рутин на основе реакции образования комплекса с $AlCl_3$ на Spectrophotometer Cary 300 (Varian) при длине волны 430 нм. Суммарное содержание антиоксидантов (ССА) в исследуемом сырье и полученных экстрактах определяли амперометрическим методом в пересчете на кверцетин с использованием анализатора "Цвет-Яуза 01-АА" (НПО "Химавтоматика") в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54037-2010. Продукты пищевые. Определение содержания водорастворимых антиоксидантов амперометрическим методом в овощах, фруктах, продуктах их переработки, алкогольных и безалкогольных напитках³. В исследуемом сырье и полученных экстрактах было измерено суммарное содержание антиоксидантов (ССА) амперометрическим методом в пересчете на кверцетин на приборе "Цвет-Яуза 01-АА" НПО "Химавтоматика" в соответствии с ГОСТ Р 54037-2010.

Эксперименты проводились с пятикратной повторностью для обеспечения достоверности результатов. Полученные данные обработаны и проанализированы с использованием статистических программ Statistica 10.0 и MS Excel, что позволило провести корректную интерпретацию результатов и выявить значимые закономерности.

² ГОСТ 31483-2012. Премикусы. Определение содержания витаминов: В1 (тиаминхлорида), В2 (рибофлавина), В3 (пантотеновой кислоты), В5 (никотиновой кислоты и никотиамида), В6 (пиридоксина), Вс (фолиевой кислоты), С (аскорбиновой кислоты) методом капиллярного электрофореза. М., 2020.

³ ГОСТ Р 54037-2010. Продукты пищевые. Определение содержания водорастворимых антиоксидантов амперометрическим методом в овощах, фруктах, продуктах их переработки, алкогольных и безалкогольных напитках. М., 2019.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены данные о содержании некоторых биологически активных соединений в исходном растительном сырье – листьях облепихи и смородины.

Таблица 1. Содержание дубильных веществ, флавоноидов, суммарного содержания антиоксидантов и аскорбиновой кислоты в листьях облепихи и смородины

Table 1. Content of tannins, flavonoids, and total antioxidant content in sea buckthorn and black currant leaves

Содержание БАВ	Листья облепихи	Листья смородины
Дубильные вещества (танин), %	14,46 ± 1,63	11,17 ± 0,68
Флавоноиды (рутин), %	3,16 ± 0,22	0,77 ± 0,52
ССА (кверцетин), мг/г	0,352 ± 0,08	2,80 ± 0,08
Аскорбиновая кислота, мг/г	16,08 ± 2,37	32,24 ± 3,61

Содержание ДВ в листьях облепихи составило 14,46 ± 1,31 %, содержание ФЛ – 3,16 ± 0,09 %. Литературные данные указывают на содержание ФЛ в листьях облепихи в диапазоне 2,8–3,5 % (Новрузов и др., 2018). Содержание кверцетина составило 1,76 ± 0,24 мг/г. В обзоре Zuzana Ciesarová (2020) содержание кверцетина в листьях облепихи находится в пределах 1,5–2,0 мг/г. Содержание аскорбиновой кислоты (АК) составило 16,08 ± 2,37 мг/г. Литературные данные указывают на содержание АК в листьях облепихи в диапазоне 10–20 мг/г (Скуридин и др., 2014).

Содержание ДВ в листьях смородины составило 11,17 ± 0,68 %. Согласно литературным данным содержание танинов в листьях смородины варьируется в пределах 8–12 % (Петрова и др., 2014). Полученные значения соответствуют верхнему диапазону литературных данных, что указывает на высокое качество сырья. Содержание ФЛ составило 0,77 ± 0,52 %. Литературные данные указывают на содержание ФЛ в листьях смородины в диапазоне 0,5–1,21 % (Попова и др., 2011; Михайлова и др., 2021). ССА в пересчете на кверцетин в листьях смородины составило 2,80 ± 0,08 мг/г. В обзоре Paunovic S. M. et al. (2020) содержание кверцетина в листьях смородины до 3,0 мг/г, в исследованиях Аджаахметовой С. Л. и др. (2021) суммарное содержание антиоксидантов в пересчете на кверцетин – от 0,6 мг/г. Содержание АК в листьях смородины – 32,24 ± 3,61 мг/г. Литературные данные указывают на содержание АК в листьях смородины в диапазоне 25–35 мг/г (Петрова и др., 2014).

Извлечение БАВ осуществлялось методом дробной мацерации, включающей настаивание (1 этап) и кипячение с принудительной циркуляцией экстрагента (2 этап). Период смачивания растительного материала спиртовым экстрагентом был определен экспериментальным путем, проведена серия опытов по определению содержания витамина С в водно-спиртовых (ВС) вытяжках, экстрагируемых в течение 72, 120, 168, 240 ч в соотношении 1 : 10 с концентрацией этанола от 40 до 70 % при комнатной температуре (22 ± 3 °C). Данные представлены на рис. 1.

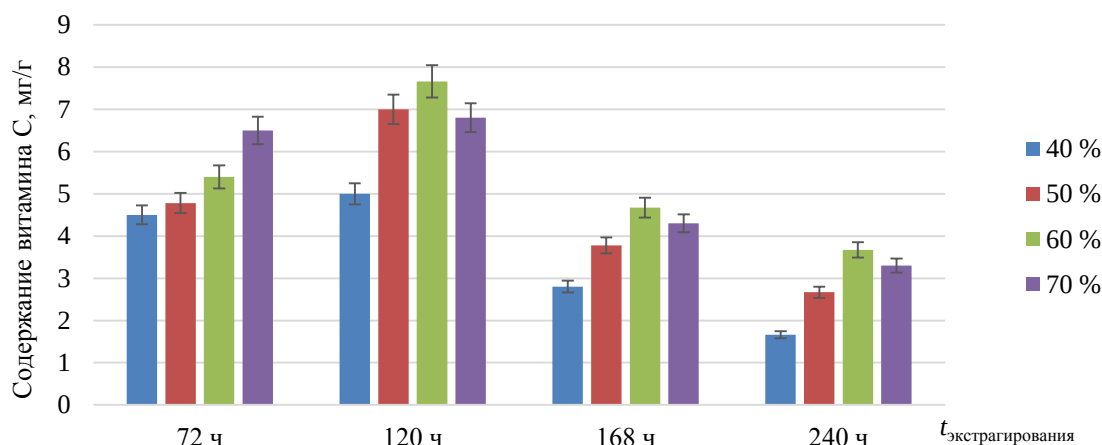


Рис. 1. Содержание аскорбиновой кислоты в водно-спиртовых экстрактах из листьев облепихи

Fig. 1. Ascorbic acid content in hydroalcoholic extracts from sea buckthorn leaves

Наибольшее количество АК из листьев облепихи было получено в ВС растворе с 60%-й концентрацией C₂H₅ОН после 120 ч экстракции. Данные о концентрации аскорбиновой кислоты в различных ВСЭ, полученных из листьев смородины, приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, максимальное количество аскорбиновой кислоты из листьев смородины переходило в экстракт через 5 суток (120 ч) мацерации с использованием 50%-го раствора этанола. Однако при дальнейшем увеличении продолжительности экстракции наблюдалось снижение концентрации АК в экстракте. Это может быть обусловлено процессами окисления аскорбиновой кислоты при длительном контакте с растворителем, что приводит к ее частичному разрушению. Таким образом, оптимальным временем для экстракции АК из листьев смородины является 120 ч, так как именно в этот период достигается максимальный выход вещества без значительных потерь его активности. Данные результаты подчеркивают важность контроля времени экстракции для сохранения биологической активности целевых компонентов.

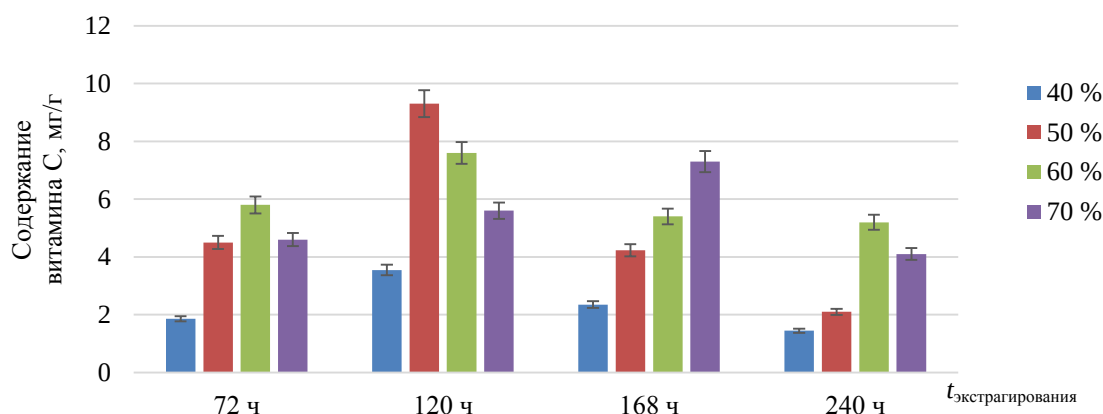


Рис. 2. Содержание аскорбиновой кислоты в водно-спиртовых экстрактах из листьев смородины
Fig. 2. Ascorbic acid content in hydroalcoholic extracts from currant leaves

После завершения первой экстракции экстракт был отфильтрован, и получена первая вытяжка. Оставшийся шрот повторно залили спиртом тех же концентраций в соотношении 1 : 15 и подвергли кипячению в ротаторном испарителе RI-213b при скорости вращения 80 об/мин и температуре 80 °C в течение 15, 30, 45 и 60 мин. Разные временные интервалы позволяют оценить как изменяется выход целевых компонентов со временем. Слишком короткая экстракция (<15 мин) может быть недостаточной для достижения равновесия. Короткие интервалы (15–30 мин) могут показать начальную стадию экстракции, тогда как более длительные (45–60 мин) – выход на плато, когда дальнейшее увеличение времени не дает значимого прироста экстрагируемых веществ. Слишком долгая экстракция (например, >60 мин) может привести к деградации термолабильных соединений (при 80 °C некоторые вещества могут разрушаться), а также к избыточному расходу энергии (Chemat et al., 2017).

Данные по содержанию ДВ в ВСЭ из листьев облепихи с различными концентрациями спирта в зависимости от времени экстракции представлены на рис. 3.

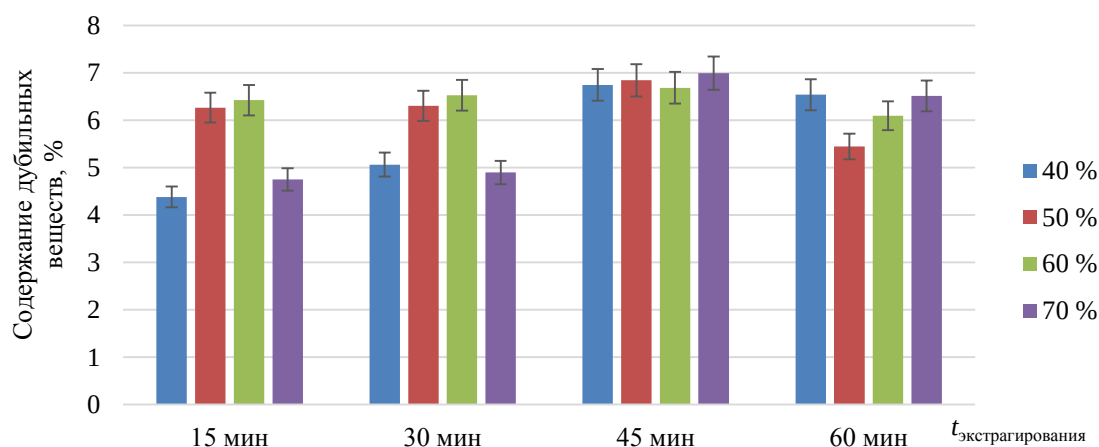


Рис. 3. Содержание дубильных веществ (%) в водно-спиртовых экстрактах из листьев облепихи
Fig. 3. Tannin content (%) in hydroalcoholic extracts from sea buckthorn leaves

Повышение концентрации экстрагента выше указанных значений не привело к увеличению выхода ДВ. Возможно, это связано с тем, что коэффициент диффузии веществ из растительного сырья в раствор

снижался при дальнейшем увеличении концентрации спирта. Коэффициент диффузии можно описать с помощью уравнения Фика

$$J = \frac{\partial C}{\partial x},$$

где J – поток вещества, $\frac{\partial C}{\partial x}$ – градиент концентрации.

При увеличении концентрации спирта выше определенного уровня градиент концентрации может уменьшаться, что приводит к снижению эффективности экстракции (Cussler, 2009).

Согласно результатам исследований максимальное извлечение ДВ из листьев облепихи достигалось при использовании 70%-го раствора этилового спирта и кипячении в течение 45 мин. При этом статистически значимых различий между значениями в различных пробах при 45-минутном кипячении не было выявлено, что свидетельствует о стабильности и оптимальности данных условий для экстракции. Это подтверждает, что указанные параметры (70%-й этанол и 45 мин кипячения) являются наиболее эффективными для извлечения дубильных веществ из листьев облепихи, что важно для дальнейшего применения экстрактов.

Показатели степени извлечения ДВ из листьев смородины этанолом различных концентраций представлены на рис. 4.

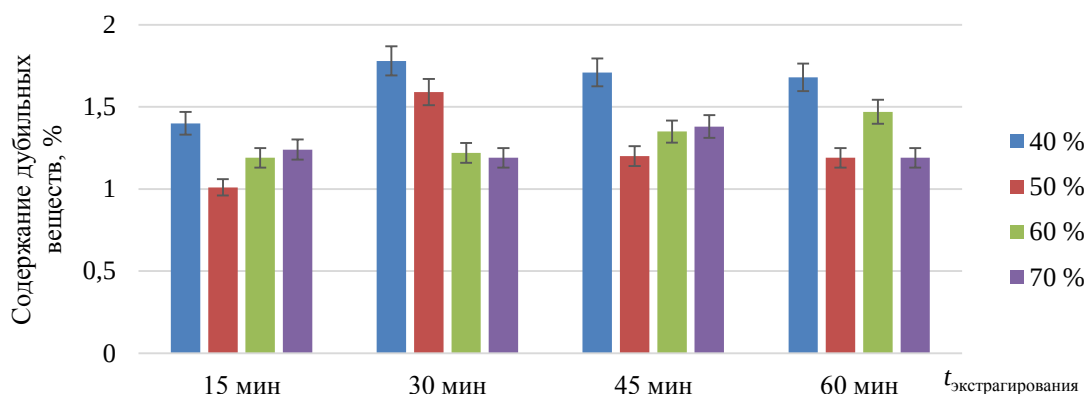


Рис. 4. Содержание дубильных веществ (%) в водно-спиртовых экстрактах из листьев смородины
Fig. 4. Tannin content (%) in hydroalcoholic extracts from black currant leaves

Как показано на рис. 4, наиболее эффективное извлечение ДВ наблюдалось при использовании 40%-го ВС экстрагента и кипячении в течение получаса. Полученные данные свидетельствуют о том, что именно эти условия обеспечивают максимальный выход ДВ, что подтверждается статистически значимыми различиями по сравнению с другими вариантами экстракции. Это подчеркивает важность подбора оптимальных параметров (концентрация экстрагента и время обработки) для повышения эффективности извлечения БАВ.

Далее в полученных экстрактах было определено содержание ФЛ, данные представлены на рис. 5.

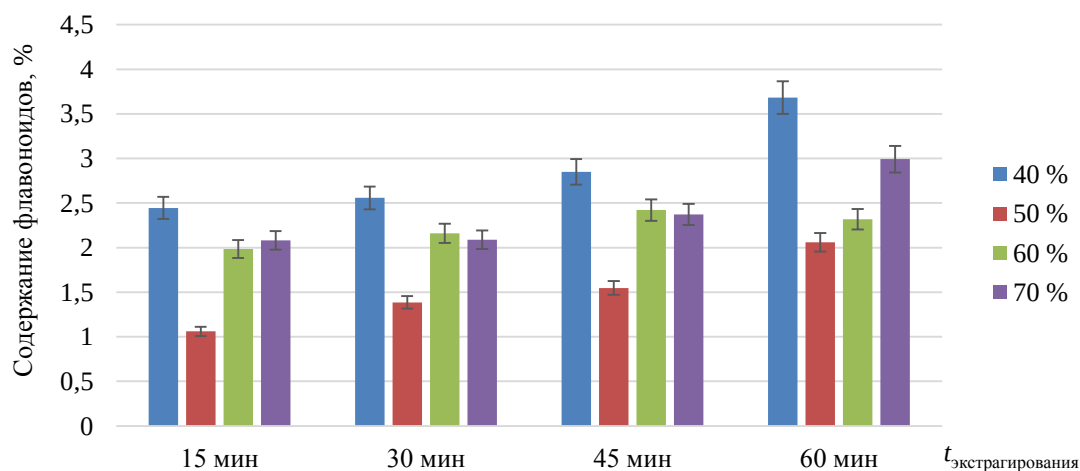


Рис. 5. Содержание флавоноидов в водно-спиртовых экстрактах из листьев облепихи, %
Fig. 5. Flavonoid content in hydroalcoholic extracts from sea buckthorn leaves, %

Из рис. 5 видно, что наибольший выход ФЛ из листьев облепихи в экстракт происходил после 60 мин кипячения 40%-м раствором спирта. При этом наблюдалась тенденция роста исследуемого показателя с увеличением времени экстрагирования, что требует дополнительных исследований.

На рис. 6 представлено содержание ФЛ в ВСЭ из листьев смородины с концентрациями спирта 40, 50, 60 и 70 %.

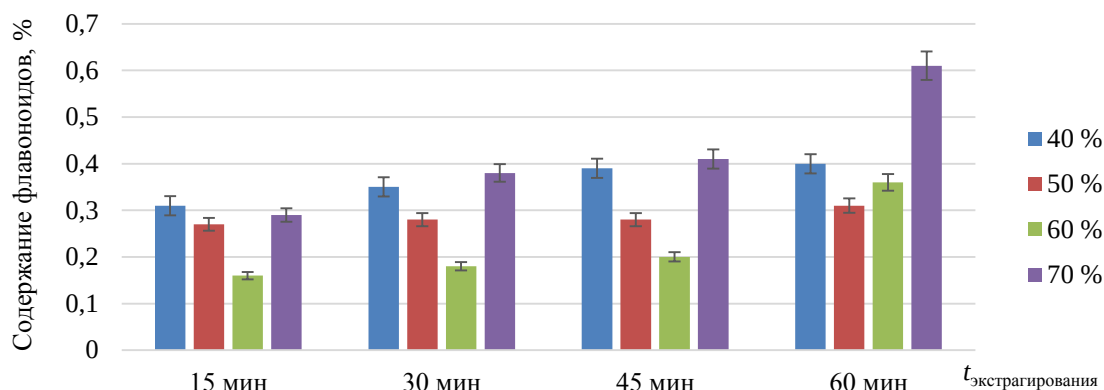


Рис. 6. Содержание флавоноидов в водно-спиртовых экстрактах из листьев смородины, %
Fig. 6. Flavonoid content in hydroalcoholic extracts from black currant leaves, %

Достоверно максимальное содержание ФЛ в экстрактах из листьев смородины наблюдалось после экстрагирования в течение 1 ч с концентрацией спирта 70 %.

Данный подход к двухэтапной экстракции обеспечивает более полное извлечение биологически активных веществ, что подтверждается анализом их содержания в полученных вытяжках. Это подчеркивает эффективность использования повторной экстракции для повышения выхода целевых компонентов. Затем вытяжку 1 и вытяжку 2 объединяли, и в объединенных экстрактах было определено суммарное содержание антиоксидантов (ССА).

Результаты измерений ССА в образцах экстрактов из листьев облепихи и смородины представлены в табл. 2.

Таблица 2. Суммарное содержание антиоксидантов в водно-спиртовых экстрактах из листьев облепихи и смородины

Table 2. Total antioxidant content in hydroalcoholic extracts from sea buckthorn and currant leaves

Концентрация спирта (%)	ССА в экстрактах из листьев облепихи (мг/г)	ССА в экстрактах из листьев смородины (мг/г)
40	$1,83 \pm 0,29$	$2,94 \pm 0,33$
50	$1,89 \pm 0,15$	$3,27 \pm 0,25$
60	$1,92 \pm 0,18$	$3,02 \pm 0,19$
70	$1,78 \pm 0,22$	$1,51 \pm 0,21$

Таким образом, статистически значимые различия в ССА в экстракте из листьев смородины были установлены для 70%-го спирта. При использовании 40, 50 и 60%-го спирта достоверных различий в содержании ССА в экстрактах из листьев смородины не выявлено, так и для всех исследуемых концентраций спирта экстрактов из листьев облепихи.

Проведенные эксперименты показали, что для эффективного извлечения БАВ из растительного сырья необходим индивидуальный подбор условий ВСЭ для каждого вида растений. В случае листьев облепихи максимальная концентрация АК была достигнута при использовании 60%-го спиртового раствора и настаивании в течение 120 ч. Для извлечения ДВ из облепиховых листьев оптимальными условиями оказались 70%-й раствор этилового спирта и 45 мин кипячения, что обеспечило наибольшее содержание экстрактивных веществ среди всех исследованных концентраций. Максимальный выход ФЛ из листьев облепихи наблюдался после 60 мин кипячения в 40%-м спиртовом растворе.

Для листьев смородины наилучшие условия экстракции АК были достигнуты при настаивании в 50%-м растворе этанола в течение 120 ч. Наибольшее извлечение ДВ происходило при использовании

40%-го спиртового раствора и кипячении в течение 30 мин. Повышенное содержание ФЛ в экстрактах из листьев смородины наблюдалось после 1 ч экстракции с применением 70%-го спирта.

Что касается общего содержания антиоксидантов, оптимальные результаты для листьев облепихи были получены при использовании 60%-го спиртового раствора, а для листьев смородины – 50%-го экстрагента.

С использованием указанных концентраций экстрагента были получены сухие экстракты. Для этого ВС растворы подвергались удалению растворителя на ротаторном испарителе, после чего образцы дополнительно высушивались в сушильном шкафу при температуре 37 ± 2 °C до постоянной массы.

В полученных экстрактах было определено содержание водорастворимых витаминов и сахаров, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3. Содержание водорастворимых витаминов в экстрактах из листьев облепихи и смородины
Table 3. The content of water-soluble vitamins in extracts from sea buckthorn and currant leaves

Содержание водорастворимых витаминов (мг/г)	Экстракт из листьев облепихи (мг/г)	Экстракт из листьев смородины (мг/г)
Витамин С	0,805	0,105
Витамин В2	0,181	0,022
Витамин В3	0,349	–
Витамин В5	0,279	0,677
Витамин Вс	0,040	0,013
Витамин В6	–	0,899

Экстракт из листьев облепихи содержит значительно большее количество витамина С (0,805 мг/г) по сравнению с экстрактом из листьев смородины (0,105 мг/г). Витамин В2 (рибофлавин) также присутствует в большем количестве в экстракте из листьев облепихи (0,181 мг/г) по сравнению с экстрактом из листьев смородины (0,022 мг/г). Витамин В3 (ниацин) обнаружен только в экстракте из листьев облепихи (0,349 мг/г), в то время как в экстракте из листьев смородины он отсутствует. Витамин В5 (пантотеновая кислота) содержится в большем количестве в экстракте из листьев смородины (0,677 мг/г) по сравнению с экстрактом из листьев облепихи (0,279 мг/г). Витамин Вс (фолиевая кислота) присутствует в обоих экстрактах, но его содержание выше в экстракте из листьев облепихи (0,040 мг/г) по сравнению с экстрактом из листьев смородины (0,013 мг/г). Витамин В6 (пиридоксин) обнаружен только в экстракте из листьев смородины (0,899 мг/г), в то время как в экстракте из листьев облепихи он отсутствует.

Заключение

Экстракт из листьев облепихи является более богатым источником витаминов С, В2, В3 и Вс, тогда как экстракт из листьев смородины содержит больше витаминов В5 и В6. Оба экстракта могут быть полезны для восполнения дефицита различных водорастворимых витаминов, но их применение зависит от конкретных потребностей организма.

Создание микса из экстрактов листьев облепихи и смородины может быть эффективным способом объединить их полезные свойства и создать продукт с более сбалансированным содержанием водорастворимых витаминов. Содержание витаминов в комбинированном экстракте, полученном путем смешивания экстрактов облепихи и смородины в соотношении 1 : 1, было рассчитано методом усреднения данных по индивидуальным экстрактам. Предполагаемые значения составили: витамин С – 0,455 мг/г; витамин В2 – 0,1015 мг/г; витамин В3 – 0,1745 мг/г; витамин В5 – 0,478 мг/г; витамин В9 (фолат) – 0,0265 мг/г; витамин В6 – 0,4495 мг/г. Следует отметить, что приведенные данные носят ориентировочный характер, так как фактическое содержание витаминов в смеси может отличаться от расчетных значений вследствие возможных синергетических или антагонистических взаимодействий между биологически активными компонентами исходных экстрактов. Для получения точных данных необходимо проведение экспериментальных исследований с использованием современных аналитических методов.

Данные витаминные миксы из экстрактов листьев смородины и облепихи можно добавлять в напитки, сиропы, БАДы или функциональные продукты питания. Возможно их использование в составе кремов, сывороток или масок для кожи, так как витамины группы В и С обладают антиоксидантными свойствами.

Таким образом, создание микса из экстрактов листьев облепихи и смородины является перспективным решением для получения продукта с более широким спектром полезных свойств.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств гранта "Молодые ученые ВСГУТУ 2024" и в рамках программы "Приоритет-2036" № 075-15-2025-049.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Аджихметова С. Л., Червонная Н. М., Поздняков Д. И., Оганесян Э. Т. Изучение суммарного содержания антиоксидантов, полисахаридов, элементного состава и аминокислот растительного сырья смородины черной // Химия растительного сырья. 2021. № 3. С. 265–274. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2021037774>. EDN: LSLMM.
- Котова Т. И., Хантургаева В. А., Цыцыков В. А., Лубсанов Э. Ю. [и др.]. Исследование процесса получения густых экстрактов из листьев облепихи // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 1(88). С. 29–35. DOI: https://doi.org/10.53980/24131997_2023_1_29. EDN: GQVEMJ.
- Михайлова И. В., Филиппова Ю. В., Кузьмичева Н. А., Винокурова Н. В. [и др.]. Смородина черная как перспективный источник полифенольных антиоксидантов // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 7–2(109). С. 28–32. DOI: 10.23670/IRJ.2021.109.7.038. EDN: CWSKZP.
- Новрузов Э. Н., Мамедов З. Г., Мустафаева Л. А., Мирюсифова Х. М. [и др.]. Состав и содержание флавоноидов листьев *Hippophae rhamnoides* L., произрастающих в Азербайджане // Химия растительного сырья. 2018. № 3. С. 209–214. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2018033772>. EDN: YABUYH.
- Петрова С. Н., Кузнецова А. А. Состав плодов и листьев смородины черной *Ribes nigrum* (обзор) // Химия растительного сырья. 2014. № 4. С. 43–50. EDN: TQBWMT.
- Попова Т. С., Потанина О. Г. Флавоноиды листьев и почек черной смородины // Фармация. 2011. № 6. С. 19–21. EDN: OEELAB.
- Скуридин Г. М., Чанкина О. В., Легкодимов А. А., Багинская Н. В. [и др.]. Элементарный состав и интенсивность накопления химических элементов в листьях сибирской облепихи (*Hippophae rhamnoides* L.) // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. № 22. С. 301–305. EDN: SMJZEV.
- Стрельцина С. А., Тихонова О. А. Питательные и биологически активные вещества ягод и листьев смородины черной (*Ribes nigrum* L.) в условиях Северо-Запада России // Аграрная Россия. 2010. № 1. С. 24–31. EDN: TNCMWL.
- Сынгеева Э. В., Ламажапова Г. П., Шенаршеева А. А., Ламаханова Б. Ж. Определение биологически активных веществ в водно-спиртовых экстрактах из листьев облепихи и смородины // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 3(90). С. 44–51. DOI: 10.53980/24131997_2023_3_44. EDN: NHWJGZ.
- Тутельян В. А., Лашнева Н. В. Биологически активные вещества растительного происхождения. Флавонолы и флавоны: распространенность, пищевые источники, потребление // Вопросы питания. 2013. Т. 82, № 1. С. 4–22. EDN: PYATND.
- Bilici M. The effect of currant (ribes) on human health and determination of certain antioxidant activities // Eastern Journal of Medicine. 2021. Vol. 26, Iss. 3. P. 470–474. DOI: <https://doi.org/10.5505/ejm.2021.89725>.
- Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.-G., Meullemiestre A. [et al.]. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. Vol. 34. P. 540–560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>.
- Ciesarová Z., Murkovic M., Cejpek K., Kreps F. [et al.]. Why is sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) so exceptional? A review // Food Research International. 2020. Vol. 133. Article number: 109170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109170>.
- Cussler E. L. Diffusion: Mass transfer in fluid systems. Cambridge : Cambridge University Press, 2009.
- Garbacki N., Tits M., Angenot L., Damas J. Inhibitory effects of proanthocyanidins from *Ribes nigrum* leaves on carrageenin acute inflammatory reactions induced in rats // BMC Pharmacology. 2004. Vol. 4. Article number: 25. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2210-4-25>.
- Minasyan A., Pires V., Gondcaille C., Ginovyan M. [et al.]. *Ribes nigrum* leaf extract downregulates pro-inflammatory gene expression and regulates redox balance in microglial cells // BMC Complementary Medicine and Therapies. 2025. Vol. 25. Article number: 49. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12906-025-04780-7>.
- Ollinger N., Neuhauser C., Schwarzingen B., Wallner M. Anti-hyperglycemic effects of oils and extracts derived from sea buckthorn – A comprehensive analysis utilizing in vitro and in vivo models. 2022. Vol. 66, Iss. 12. Article number: 2101133. DOI: <https://doi.org/10.1002/mnfr.202101133>.
- Paniagua-Zambrana N. Y., Bussmann R. W., Kikvidze Z., Khojimatov O. K. *Ribes alpinum* L. *Ribes nigrum* L. *Ribes rubrum* L. *Ribes uva-crispa* L. GROSSULARIACEAE // Ethnobotany of the Mountain Regions of Eastern Europe. Ethnobotany of Mountain Regions / eds.: R. W. Bussmann, N. Y. Paniagua-Zambrana, Z. Kikvidze. Springer, Cham., 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98744-2_247-1.
- Pariyani R., Kortessniemi M., Liimatainen J., Sinkkonen J. [et al.]. Untargeted metabolic fingerprinting reveals impact of growth stage and location on composition of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) leaves // Journal of Food Science. 2020. Vol. 85, Iss. 2. P. 364–373. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15025>.

- Paunović S. M., Mašković P. Phenolic compounds, antioxidant and cytotoxic activity in berry and leaf extracts of black currant (*Ribes nigrum* L.) as affected by Soil Management Systems // *Erwerbs-Obstbau*. 2020. Vol. 62. P. 293–300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10341-020-00491-0>.
- Ran B. B., Li W.-D. Research progress on chemical constituents and their differences between sea buckthorn berries and leaves // *Zhongguo Zhong Yao Za Zhi*. 2019. Vol. 44, Iss. 9. P. 1767–1773. 2019. DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20190222.002.

References

- Adzhiakhmetova, S. L., Chervonnaia, N. M., Pozdniakov, D. I., Oganessian, E. T. 2021. Study of the total content of antioxidants, polysaccharides, elemental composition, and amino acids in black currant plant raw materials. *Chemistry of Plant Raw Material*, 3, pp. 265–274. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021037774>. EDN: LSLMM. (In Russ.)
- Kotova, T. I., Khanturgaeva, V. A., Tsytikov, V. A., Lubсанov, E. Yu. et al. 2023. Study of the process of obtaining thick extracts from sea buckthorn leaves. *ESSUTM Bulletin*, 1(88), pp. 29–35. DOI: https://doi.org/10.53980/24131997_2023_1_29. EDN: GQVEMJ. (In Russ.)
- Mikhailova, I. V., Filippova, Yu. V., Kuzmicheva, N. A., Vinokurova, N. V. et al. 2021. Black currant as a promising source of polyphenolic antioxidants. *International Research Journal*, 7–2(109), pp. 28–32. DOI: 10.23670/IRJ.2021.109.7.038. EDN: CWSKZP. (In Russ.)
- Novruzov, E. N., Mamedov, Z. G., Mustafayeva, L. A., Miryusifova, Kh. M. et al. 2018. Composition and content of flavonoids in leaves of *Hippophae rhamnoides* L. growing in Azerbaijan. *Chemistry of plant raw material*, 3, pp. 209–214. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033772>. EDN: YABUYH. (In Russ.)
- Petrova, S. N., Kuznetsova, A. A. 2014. Composition of fruits and leaves of black currant *Ribes nigrum*. *Khimiya Rastitelnogo Syr'a*, 4, pp. 43–50. EDN: TQBWMT. (In Russ.)
- Popova, T. S., Potanina, O. G. 2011. Flavonoids of leaves and buds of black currant. *Farmatsiya*, 6, pp. 19–21. EDN: OEELAB. (In Russ.)
- Skuridin, G. M., Chankina, O. V., Legkodymov, A. A., Baginskaya, N. V. et al. 2014. Elemental composition and accumulation intensity of chemical elements in leaves of Siberian sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.). *Chemistry for Sustainable Development*, 22, pp. 301–305. EDN: SMJZEV. (In Russ.)
- Streletsina, S. A., Tikhonova, O. A. 2010. Nutrients and biologically active substances in berries and leaves of black currant (*Ribes nigrum* L.) in the conditions of the North-West of Russia. *Agrarian Russia*, 1, pp. 24–31. EDN: TNCMWL. (In Russ.)
- Syngееva, E. V., Lamazhapova, G. P., Shenarsheeva, A. A., Lamakhanova, B. Zh. et al. 2023. Determination of biologically active substances in water-alcohol extracts from sea buckthorn and currant leaves. *ESSUTM Bulletin*, 3(90), pp. 44–51. DOI: 10.53980/24131997_2023_3_44. EDN: NHWJGZ. (In Russ.)
- Tutelian, V. A., Lashneva, N. V. 2013. Bioactive compounds of plant origin: Flavonols and flavones – prevalence. *Problems of Nutrition*, 82(1), pp. 4–22. EDN: PYATND. (In Russ.)
- Bilici, M. 2021. The effect of currant (ribes) on human health and determination of certain antioxidant activities. *Eastern Journal of Medicine*, 26(3), pp. 470–474. DOI: <https://doi.org/10.5505/ejm.2021.89725>.
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A. et al. 2017. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, pp. 540–560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>.
- Ciesarová, Z., Murkovic, M., Cejpek, K., Kreps, F. et al. 2020. Why is sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) so exceptional? A review. *Food Research International*, 133. Article number: 109170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109170>.
- Cussler, E. L. 2009. Diffusion: Mass transfer in fluid systems. Cambridge: Cambridge University Press.
- Garbacki, N., Tits, M., Angenot, L., Damas, J. 2004. Inhibitory effects of proanthocyanidins from *Ribes nigrum* leaves on carrageenin acute inflammatory reactions induced in rats. *BMC Pharmacology*, 4. Article number: 25. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2210-4-25>.
- Minasyan, A., Pires, V., Gondcaille, C., Ginovyan, M. et al. 2025. *Ribes nigrum* leaf extract downregulates pro-inflammatory gene expression and regulates redox balance in microglial cells. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 25. Article number: 49. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12906-025-04780-7>.
- Ollinger, N., Neuhauser, C., Schwarzing, B., Wallner, M. 2022. Anti-hyperglycemic effects of oils and extracts derived from sea buckthorn – A comprehensive analysis utilizing in vitro and in vivo models, 66(12). Article number: 2101133. DOI: <https://doi.org/10.1002/mnfr.202101133>.
- Paniagua-Zambrana, N. Y., Bussmann, R. W., Kikvidze, Z., Khojimatov, O. K. 2024. *Ribes alpinum* L. *Ribes nigrum* L. *Ribes rubrum* L. *Ribes uva-crispa* L. GROSSULARIACEAE. Ethnobotany of the Mountain Regions of Eastern Europe. Ethnobotany of Mountain Regions. Eds.: R. W. Bussmann, N. Y. Paniagua-Zambrana, Z. Kikvidze. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98744-2_247-1.

- Pariyani, R., Kortessniemi, M., Liimatainen, J., Sinkkonen, J. et al. 2020. Untargeted metabolic fingerprinting reveals impact of growth stage and location on composition of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides*) leaves. *Journal of Food Science*, 85(2), pp. 364–373. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15025>.
- Paunović, S. M., Mašković, P. 2020. Phenolic compounds, antioxidant and cytotoxic activity in berry and leaf extracts of black currant (*Ribes nigrum* L.) as affected by Soil Management Systems. *Erwerbs-Obstbau*, 62, pp. 293–300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10341-020-00491-0>.
- Ran, B. B., Li, W.-D. 2019. Research progress on chemical constituents and their differences between sea buckthorn berries and leaves. *Zhongguo Zhong Yao Za Zhi*, 44(9), pp. 1767–1773. 2019. DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20190222.002.

Сведения об авторах

Сынгеева Эржэна Владимировна – ул. Ключевская, 40В, г. Улан-Удэ, Россия, 670013;
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: syngeeva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4001-4047>

Erzhena V. Syngeeva – 40V Klyuchevskaya Str., Ulan-Ude, Russia, 670013;
East-Siberian State University of Technology and Management, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: syngeeva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4001-4047>

Ламажапова Галина Петровна – ул. Ключевская, 40В, г. Улан-Удэ, Россия, 670013;
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, д-р биол. наук, доцент;
e-mail: lamazhap@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4118-215X>

Galina P. Lamazhapova – 40V Klyuchevskaya Str., Ulan-Ude, Russia, 670013;
East-Siberian State University of Technology and Management, Dr Sci. (Biology), Associate Professor;
e-mail: lamazhap@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4118-215X>

УДК 664.66

Исследование влияния порошка из черники на качество хлебобулочного изделия

Н. З. Дубкова, В. В. Харьков*, Г. К. Шакирова

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия;

e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
06.02.2025;

получена
после доработки
22.04.2025;

принята
к публикации
28.04.2025

Ключевые слова:

рецептура,
показатели качества,
черника,
порошок черники,
растительная добавка,
цветность

Использование добавок из натуральных растительных ингредиентов в рецептуре хлебобулочных изделий становится актуальным для современной хлебопекарной промышленности в связи с увеличивающимися запросами населения на продукцию здорового и диетического питания. Ягоды черники являются перспективным видом растительного сырья для включения их в рецептуры новых видов хлебобулочных изделий с повышенной пищевой ценностью. В статье исследуется возможность частичной замены пшеничной муки в рецептуре хлебобулочного изделия на порошок из черники. Данный порошок получается путем переработки ягод в вакуумной вибрационной сушилке-мельнице в щадящем режиме для сохранения термолабильных веществ растительного сырья. Проведено сравнение нормативных органолептических (внешний вид, состояние мякиша, вкус и запах) и физико-химических показателей (влажность, кислотность, пористость, удельный объем, цветность) выпеченных образцов хлебобулочного изделия – контрольного и экспериментального с 5 % заменой муки на черничный порошок. Установлено, что значения влажности, кислотности и пористости для обоих исследуемых образцов соответствуют действующей нормативной документации. Органолептический анализ выявил, что добавление порошка черники при замесе теста положительно сказывается на вкусовых качествах готового хлебобулочного изделия. Результаты определения цветности корки и мякиша образцов хлебобулочных изделий с помощью цифрового колориметра показали, что тонкодисперсный порошок черники способствует равномерному прокрашиванию корки и мякиша за счет его хорошей растворимости и высокой красящей способности, придает им привлекательный коричневый цвет с синеватым оттенком. В дальнейшем планируется провести оценку влияния различной дозировки черничного порошка в рецептуре теста на качественные показатели готовых хлебобулочных изделий, а также химического состава изделий на наличие веществ, придающих им функциональные свойства.

Для цитирования

Дубкова Н. З. и др. Исследование влияния порошка из черники на качество хлебобулочного изделия. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 186–197. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-186-197>.

Study on effect of blueberry powder on quality of bakery products

Nailya Z. Dubkova, Vitaly V. Kharkov*, Gadilia K. Shakirova

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;

e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Article info

Received
06.02.2025;

received
in revised form
22.04.2025;

accepted
28.04.2025

Abstract

The use of natural plant-based additives in bakery formulations is gaining relevance in the modern baking industry due to increasing consumer demand for healthy and dietary food products. Blueberries represent a promising plant-derived ingredient for incorporation into novel bakery products with increased nutritional value. This study investigates the partial substitution of wheat flour with blueberry powder in bakery formulations. The powder has been obtained by processing berries in a vacuum vibration dryer-mill under gentle conditions to preserve thermolabile substances of plant-based materials. A comparative analysis of standard sensory (appearance, crumb condition, taste, and aroma) and physicochemical parameters (moisture content, acidity, porosity, specific volume, and color) has been conducted between a control bread sample and an experimental sample containing 5 % blueberry powder. The results have shown that moisture content, acidity, and porosity of both samples complied with current regulatory standards. Sensory analysis has revealed that the addition of blueberry powder into the dough positively influences the taste profile of the final product. Color analysis of crust and crumb using a digital colorimeter has demonstrated that finely ground blueberry powder has ensured uniform crust and crumb coloration due to its high solubility and strong pigmentation capacity, imparting an attractive brown color with a bluish tint. Future research will focus on evaluating the effect of various dosages blueberry powder into dough formulation on the qualitative characteristics of bakery products, as well as the chemical composition of the products on the presence of substances which give them functional properties.

Key words:

recipe,
quality indicators,
blueberry,
blueberry powder,
plant-based additive,
color

For citation

Dubkova, N. Z. et al. 2025. Study on effect of blueberry powder on quality of bakery products. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 186–197. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-186-197>.

Введение

Хлеб является одним из самых распространенных продуктов питания в рационе человека на протяжении нескольких тысяч лет. В настоящее время перед современной хлебопекарной промышленностью стоят две задачи. Первая задача заключается в разработке позиций новых рецептур хлеба и хлебобулочных изделий, обогащенных различными дополнительными ингредиентами, которые соответствуют принципам здорового и диетического питания. Вторая задача направлена на продление или увеличение срока хранения продукции (Mitelut et al., 2021). Продукты питания повышенной пищевой ценности – это широкая категория товаров, которые обеспечивают пользу для здоровья человека за счет биологических и энергетических свойств дополнительных ингредиентов (Харьков и др., 2016; Vignesh et al., 2024; Naveed et al., 2024).

Для повышения пищевой ценности хлебобулочной продукции широко используется различное растительное сырье. В работе (Мусаева и др., 2020) предлагается добавлять в рецептуру хлебобулочных изделий разные сушеные растительные ингредиенты. Сушка сырья проводилась при температурах 60–70 °С в течение 4–5 ч с целью сохранения его витаминного состава. Внесение добавок позволило повысить пищевую ценность хлебобулочных изделий, в частности, на 100–120 % при использовании сушеных дикорастущих ягод, до 44 % – из кожицы и семян винограда, на 30–95 % – из кожицы тыквы, на 5–24 % – из семян и кожицы яблок. Авторы (Колесниченко и др., 2014) разработали рецептуру хлеба из ржаной муки с добавлением измельченных плодов жимолости в объеме 2–3 % с целью получения обогащенного продукта. Хлеб с измельченными плодами жимолости по сравнению с контрольным образцом содержит большее количество пищевых волокон, пектинов, сахаров, биологически активных и минеральных веществ. Полученный хлеб обладает повышенной пищевой ценностью и рекомендуется для людей, ведущих здоровый образ жизни.

В статье (Дорн и др., 2020) предложена рецептура ржано-пшеничного хлеба с гречневой мукой и добавлением порошков черемухи и облепихи. Хлеб с частичной заменой ржаной муки на гречневую и добавлением порошка черемухи или облепихи обладает повышенным содержанием витаминов С, группы В, Р, А, Е и других полезных веществ, таких как флавоноиды, органических кислот, микроэлементов, пектина и др. В статье (Шевелева и др., 2021) представлены результаты исследования влияния добавления ягод барбариса в виде порошка и отвара на технологический процесс, а также на показатели качества и сроки хранения различных типов хлебобулочных изделий. Было выявлено, что добавление ягодного компонента сокращает время брожения и расстойки на 10–20 мин при различных способах тестоприготовления, при этом качество готовой продукции остается на уровне, соответствующем требованиям нормативных документов.

Авторами (Ковалев и др., 2020) было предложено добавлять в рецептуру пшеничного хлеба порошок ламинарии японской, обработанной ультразвуком разной мощности, а именно 25, 50, 75, 100 Вт в течение 5 мин. В результате выявлено положительное влияние добавки на технологические свойства хлеба, к тому же подъемная сила дрожжей, кислотность теста и органолептические показатели готового изделия остались прежними. В статье (Негматуллоева и др., 2023) приводится способ повышения биологической ценности хлеба из пшеничной муки высшего сорта за счет введения в рецептуру высокобелкового порошка из семян маша в количестве от 10 до 30 %. Приводятся результаты расчета аминокислотного сора в разных образцах для оценки по аминокислотному составу. Авторами (Доев и др., 2018) было предложено введение в рецептуру хлебобулочных изделий порошка облепихи, высушенного при температуре 55–60 °С в течение 36 ч, в качестве источника дополнительных биологически активных веществ. Полученное изделие обладает повышенной пищевой ценностью за счет увеличения содержания углеводов, витаминов и полифенольных соединений. Использование ферментированного амаранта в рецептуре белого хлеба позволяет не только обогатить его минералами и микронутриентами, но и увеличить срок хранения хлеба за счет его антифугицидного действия (Kia et al., 2024). В обзорной работе (Quitral et al., 2022) собраны данные по использованию водорослей в пищевых продуктах для увеличения их полезности за счет высокого содержания полифенолов в водорослях и их антиоксидантной способности. Приводится максимальная концентрация порошка водорослей в составе хлебобулочных (4 %) и мучных кондитерских изделий (5 %).

В качестве дополнительного источника биологически активных веществ могут быть использованы лекарственные растения. В работе (Ахметзянова и др., 2024) предложено добавить в хлеб из пшеничной муки первого сорта корень лопуха в количестве до 3 %. Установлено положительное влияние добавки, поскольку изделие по органолептическим и физико-химическим показателям соответствовало требованиям нормативной документации. Авторами (Маслов и др., 2022) представлены данные влияния комплексной добавки на основе растительных компонентов, состоящей из порошков пророщенной спельты, семян тыквы, плодовых тел грибов вешенки и ягод крыжовника, на реологические свойства теста, а также водопоглощение и состояние белково-протеиназного комплекса мучных смесей. Внесение биологически активных добавок связано не только с улучшением пищевой ценности готового изделия, но и с целью

активации дрожжей, что позволяет получать продукцию с повышенными технологическими характеристиками (Левашов и др., 2015). Флавоноиды, витамины, микроэлементы, содержащиеся в растительном сырье, позволяют интенсифицировать бродильную активность и повысить качество хлебопекарных дрожжей. Применение растительных добавок в условиях внедрения ускоренных технологий тестоприготовления позволяет адаптировать дрожжи-сахаромицеты, имеющие высокую бродильную активность в анаэробных условиях, к аэробным условиям за счет активации, во время которой происходит перестройка ферментативного комплекса дрожжей с дыхания на брожение. Использование активированных дрожжей позволяет ощутимо сократить время брожения теста, при этом замечено и повышение качественных показателей хлебобулочных изделий (Мингалеева и др., 2019). В работе (Левашов и др., 2017) применение растительной добавки с ягодами калины позволило снизить время брожения на 30 мин, получить хлебобулочное изделие с привлекательными вкусом и ароматом и повышенной пищевой ценностью.

В рамках данного исследования предлагается использовать порошок, полученный из ягод черники, как растительную добавку в рецептуры хлебобулочных изделий. Введение порошка черники в рецептуры хлебобулочных изделий является перспективным, но при этом исследованным недостаточно, что определяет актуальность данной работы. Черника является богатым источником витаминов А, Е и С и различных полифенолов (флавоноидов, флавонолов, фенольных кислот и производных стильбена) (Ashique et al., 2024). Одно из самых главных качеств черники заключается в высоком содержании антиоксидантов. Большое количество антоцианов, отвечающих за глубокий сине-фиолетовый цвет, является одним из ключевых факторов антиоксидантной способности черничного сырья. Эти антиоксиданты способствуют снятию воспалений и повышению иммунных свойств организма, а также полезны при заболеваниях сердечно-сосудистой системы, онкологических заболеваниях и при диабете (Ginwala et al., 2019). Регулярное употребление черники приводит к понижению артериального давления и уровня холестерина, что улучшает кровоток и снижает вероятность инфарктов и инсультов (Machado et al., 2015). Также черника, обладающая низкой калорийностью, является источником пищевых волокон, что позволяет отнести ее к продуктам диетического назначения (Blundell et al., 2009). Главной проблемой переработки ягод черники является уменьшение или даже полная потеря биологических полезных веществ, в частности антоцианов (Алексеев и др., 2023). Поэтому технология получения порошка из черники должна быть разработана с учетом сохранности компонентов данного вида сырья (Кузнецов и др., 2016; Харьков и др., 2017). Таким образом, добавление порошка черники в хлебобулочные изделия может способствовать повышению их пищевой ценности за счет обогащения пищевыми волокнами, антоцианами и полифенолами.

Целью исследования является изучение влияния применения порошка из черники в рецептуре теста хлебобулочного изделия из пшеничной муки на его органолептические и физико-химические свойства.

Материалы и методы

Для проведения исследования были проведены пробные выпечки двух образцов хлебобулочных изделий из пшеничной муки по ГОСТ Р 56631-2015¹. Рецепт контрольного образца (образец 1), выработанного по традиционной рецептуре по ГОСТ Р 55972-2014², и экспериментального образца с добавлением порошка черники (образец 2) представлена в табл. 1. Масса порошка из ягод черники составляла 5 % от массы муки.

Таблица 1. Рецептуры образцов хлебобулочного изделия
Table 1. Bakery product samples formulations

Наименования сырья	Количество вносимого сырья, % от массы муки	
	Образец 1 (контрольный)	Образец 2 (экспериментальный)
Мука пшеничная высшего сорта	300	285
Дрожжи прессованные хлебопекарные	2,1	2,1
Соль поваренная пищевая	4,5	4,5
Сахар	3	3
Вода	172	172
Порошок из ягод черники обыкновенной	—	15

Порошок из ягод черники предварительно был получен в вибрационной сушилке-мельнице ВСМ-0,5, работающей под вакуумом, в которой процесс термического обезвоживания совмещен с процессом измельчения (Dubkova et al., 2021; Kuznetsov et al., 2021). Такая конструкция позволяет проводить процесс сушки

¹ ГОСТ Р 56631-2015. Изделия хлебобулочные из пшеничной хлебопекарной муки. Общие технические условия. М., 2016.

² ГОСТ Р 55972-2014. Изделия хлебобулочные. Рецепт и технологическая инструкция. Общие требования к оформлению, построению и содержанию. М., 2014.

растительного сырья при щадящих температурных режимах, что сохраняет термолабильные компоненты черники. За счет одновременного измельчения и вакуумной сушки порошок черники был получен при температуре 40 °С в течение 40 мин. По результатам рассева черничного порошка, полученного в сушилке-мельнице, эквивалентный диаметр равен 313±50 мкм.

Тесто для образцов хлебобулочных изделий готовилось безопасным способом. Брожение теста происходило в течение 1 ч при температуре 45 °С. Расстойка тестовых заготовок проводилась при температуре 45 °С и относительной влажности воздуха 75–80 % в течение 30–40 мин. Выпечка велась в лабораторной электрической печи при температуре 180 °С в течение 40–45 мин. Охлаждение готовых хлебобулочных изделий осуществлялось естественным путем при комнатной температуре.

Качественный анализ образцов хлебобулочных изделий проведен согласно ГОСТ 31805-2018³ через 16–18 ч после выпечки по органолептическим показателям (внешний вид, состояние мякиша, вкус, запах) и физико-химическим показателям мякиша (влажность, кислотность, пористость). Дегустационная оценка полученных изделий по 5-балльной шкале была проведена согласно ГОСТ 31986-2012⁴. Количество человек в дегустационной группе – 10.

Анализ показателей мякиша проводился по стандартным методикам для влажности по ГОСТ 21094-2022⁵, кислотности по ГОСТ 5670-96⁶, пористости по ГОСТ 5669-96⁷. Дополнительно был проведен анализ образцов на цветность и удельный объем по ГОСТ 27669-88⁸.

Цветность изделий определялась с помощью цифрового колориметра CS-10 (Китай), диаметр области измерения 50 мм. Образцы освещали искусственным дневным светом D65 (стандартный угол 10°). Результаты выражены в цветовом пространстве $L^*a^*b^*$, где значение L^* обозначает яркость в диапазоне от 0 (черный) до 100 (белый), a^* и b^* – цветовые координаты (положительные значения a^* характеризуют интенсивность красного оттенка образца, а отрицательные a^* – интенсивность зеленого; положительные значения b^* характеризуют желтизну образца, а отрицательные b^* – синеву). Используя измеренные значения для проб исследуемых образцов, рассчитывают насыщенность цвета C^* и угол цветового тона h^* по формулам (1) и (2):

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}; \quad (1)$$

$$h^* = \arctg \frac{b^*}{a^*}. \quad (2)$$

Разница цвета ΔE_{2000} между двумя образцами рассчитывалась по формуле (Mokrzycki et al., 2011)

$$\Delta E_{2000} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2} \dots, \quad (3)$$

где $\Delta L' = L_2 - L_1$; $K_L = 1$; $S_L = 1 + \frac{0,015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}$; $\bar{L}' = (L_1 + L_2)/2$; $\Delta C' = C_2' - C_1'$; $C_1' = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2}$;

$$C_2' = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2}; \quad a_1' = a_1(1+G); \quad a_2' = a_2(1+G); \quad G = \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right) / 2; \quad S_C = 1 + 0,045\bar{C}'; \quad \bar{C}' = (C_1' + C_2')/2;$$

$$C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}; \quad C_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2}; \quad K_C = 1; \quad \Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin(\Delta h' / 2); \quad K_H = 1; \quad S_H = 1 + 0,015\bar{C}'T.$$

Объем выпеченного хлеба определялся стандартным методом с помощью лабораторного измерителя ОХЛ-2, работающего по принципу вытесненного хлебом объема сыпучего заполнителя (сахарный песок). Объем хлеба определяют по разнице объема сахара в емкости без хлеба и в емкости с хлебом. Удельный объем хлебобулочного изделия определяется путем деления его объема (в см³) на его массу (в г).

За окончательный результат всех измерений физико-химических показателей образцов принималось среднее арифметическое двух параллельных измерений. Допускаемые отклонения между параллельными определениями не превышали 5 %.

³ ГОСТ 31805-2018. Изделия хлебобулочные из пшеничной хлебопекарной муки. Общие технические условия. М., 2019.

⁴ ГОСТ 31986-2012. Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания. М., 2019.

⁵ ГОСТ 21094-2022. Изделия хлебобулочные. Методы определения влажности. М., 2022.

⁶ ГОСТ 5670-96. Хлебобулочные изделия. Методы определения кислотности. Минск, 1997.

⁷ ГОСТ 5669-96. Хлебобулочные изделия. Метод определения пористости. Минск, 1997.

⁸ ГОСТ 27669-88. Мука пшеничная хлебопекарная. Метод пробной лабораторной выпечки хлеба. М., 2007.

Результаты и обсуждение

Согласно табл. 1 была рассчитана энергетическая ценность образцов: для контрольного образца она составила 123,64 ккал/100 г, для экспериментального образца – 126,55 ккал/100 г, т. е. добавление порошка черники повышает энергетическую ценность примерно на 2,4 %.

На рис. 1 показаны тестовые заготовки после расстойки.



Рис. 1. Тестовые заготовки после расстойки (слева – образец 1, справа – образец 2)

Fig. 1. Dough pieces after proofing (left – sample 1, right – sample 2)

Визуально обе заготовки одинаковы по объему, а цвет экспериментального образца имеет темный цвет по сравнению с контрольным образцом. Результаты органолептической оценки представлены в табл. 2. Установлено, что оба образца по всем показателям соответствуют требованиям действующего стандарта. Выявлено, что образец 2 отличается от образца 1 коричневатым цветом с синеватым оттенком корки и мякиша.

Таблица 2. Результаты органолептической оценки образцов хлебобулочного изделия

Table 2. Results of sensory evaluation of bakery products samples

Показатель	Образец 1 (контрольный)	Образец 2 (экспериментальный)
Внешний вид:		
форма	Круглая	
поверхность	Ровная, без трещин	
цвет	Равномерный, не бледный и не подгоревший	
Состояние мякиша:		
пропеченность	Пропеченный, не липкий, не влажный на ощупь, после легкого надавливания пальцами мякиш принимает первоначальную форму	
промес	Без комочков и следов непромеса	
пористость	Развитая, без пустот и уплотнений	
Вкус	Приятный, свойственный данному виду изделия, без посторонних привкусов	Приятный, слегка чувствуется вкус черники, слегка сладковатый, без посторонних привкусов
Запах	Приятный, свойственный данному виду изделия	Приятный, свойственный данному виду изделия

Проведенная дегустация исследуемого хлебобулочного образца представлена в табл. 3.

Таблица 3. Сводный дегустационный лист

Table 3. Summary tasting sheet

Показатель	Внешний вид	Цвет	Состояние мякиша	Аромат	Вкус	Средняя оценка
Образец 2 (хлебобулочное изделие с черничным порошком)	5	5	5	5	5	5,0
	5	5	5	5	5	5,0
	5	5	4	5	4	4,6
	4	5	5	5	4	4,6
	5	4	5	5	5	4,8
Средний балл	4,8	4,8	4,8	5	4,6	

Согласно результатам дегустационной оценки средний балл по всем показателям не ниже 4,6, а по аромату получен максимальный балл 5,0.

Для оценки влияния черничного порошка на физико-химические показатели хлеба из пшеничной муки высшего сорта был проведен сравнительный анализ мякиша готовых хлебобулочных изделий по влажности, кислотности и пористости. Результаты анализа представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты физико-химической оценки исследуемых образцов
Table 4. Results of physicochemical estimation of the studied samples

Показатель	Влажность, %	Кислотность, град	Пористость, %
Образец 1 (контрольный)	43,9 ± 1,5	2,4 ± 0,2	74 ± 1,0
Образец 2 (экспериментальный)	43,7 ± 1,5	3,2 ± 0,2	66 ± 1,0

Таким образом, значения влажности и кислотности для обоих образцов соответствуют ГОСТ Р 56631-2015⁹.

Влажность мякиша образца 2 немного ниже влажности мякиша образца 1, что может быть вызвано действием ферментов растительной добавки на крахмал муки, в результате чего образовалось некоторое количество свободной воды, которая во время выпечки испарилась с поверхности тестовых заготовок. Кислотность мякиша образца 2 выше, чем у контрольного образца на 0,8 град, что объясняется наличием в ягодах черники органических кислот.

Стандартная пористость хлеба различных сортов хлебобулочных изделий из пшеничной муки составляет не менее 54–70 %. Пористость образцов 1 и 2 составляет 74 и 66 % соответственно, что соответствует требованиям ГОСТ 31805-2018¹⁰ и также указывает на соблюдение требований технологического процесса при приготовлении изделий (табл. 1). Также отмечается, что замена части муки черничным порошком привела к уменьшению пористости мякиша на 8 %. Это связано с увеличением содержания клетчатки в тесте, которая мешает образованию пузырьков газа при брожении, что приводит к получению более плотной структуры мякиша.

Также согласно визуальному осмотру изделий выявлено, что образец 2 имеет меньший объем. Расчет объема образцов показал, что объемный выход образца 1 составил 491 см³/г, а образца 2 – 441 см³/г, т. е. меньше примерно на 10 %. Объемный выход хлеба из муки высшего сорта должен быть не менее 400 см³/г, таким образом, оба образца соответствуют этому нормативному показателю.

На основе анализа внешнего вида хлебобулочных изделий видно, что корка (рис. 2) и мякиш (рис. 3) образца 2 имеют насыщенный коричневый цвет за счет высокой красящей способности порошка черники, а также реакции меланоидинообразования в процессе выпечки.



Рис. 2. Внешний вид готовых хлебобулочных изделий (слева – образец 1, справа – образец 2)

Fig. 2. Bakery products appearance (left – sample 1, right – sample 2)

⁹ ГОСТ Р 56631-2015. Изделия хлебобулочные из пшеничной хлебопекарной муки. Общие технические условия. М., 2016.

¹⁰ ГОСТ 31805-2018. Изделия хлебобулочные из пшеничной хлебопекарной муки. Общие технические условия. М., 2019.

Результаты определения цветности корки образцов (рис. 2) колориметрическим методом представлены на рис. 4. Отмечается, что яркость (светлота) корки (L^*) образца 1 больше, чем образца 2. Оба образца имели положительные значения координаты a^* , т. е. имели красный оттенок, что характерно для поджаренных и выпеченных продуктов и является характерным признаком для корки хлебобулочных изделий. Большее значение координаты b^* образца 1 соответствует желтизне корки, а низкое значение b^* для образца 2 – наличию коричневого оттенка. Высокие положительные значения C^* для обоих образцов свидетельствуют о высокой интенсивности цвета корки. При значении разницы цвета ΔE_{2000} , рассчитанного по формуле (3), более 5 можно утверждать, что цвета образцов различные. Для корки $\Delta E_{2000} = 7,7$, соответственно, можно говорить о разнице цвета, что подтверждается визуально (рис. 2).



Рис. 3. Внешний вид мякиша хлебобулочных изделий (слева – образец 1, справа – образец 2)
Fig. 3. Appearance of bakery products crumb (left – sample 1, right – sample 2)

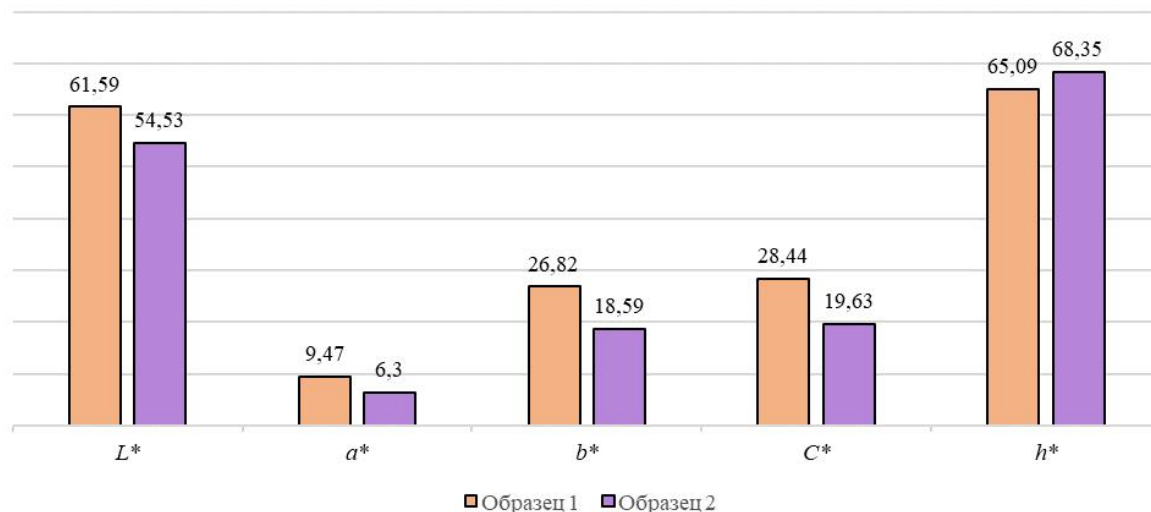


Рис. 4. Результаты определения цветности корки хлебобулочных изделий:
 L^* – яркость (светлота); a^* – цветовая координата от зеленого к красному;
 b^* – цветовая координата от синего к желтому; C^* – насыщенность цвета; h^* – угол цветового тона
 Fig. 4. Color test results for the crust of bakery products:
 L^* – brightness (lightness); a^* – color in the green-red field;
 b^* – color in the blue-yellow field; C^* – saturation; h^* – hue

Результаты определения параметров цветности мякиша (рис. 3) представлены на рис. 5. При добавлении в хлебобулочное изделие порошка черники значение светлоты L^* , желтого b^* оттенка, а также значение насыщенности C^* для образца 2 снижались. На основании полученных значений разницы цвета для

мякиша $\Delta E_{2000} = 29,56$ можно сделать вывод о существенной разнице цвета мякиша у исследуемых образцов хлебобулочных изделий.

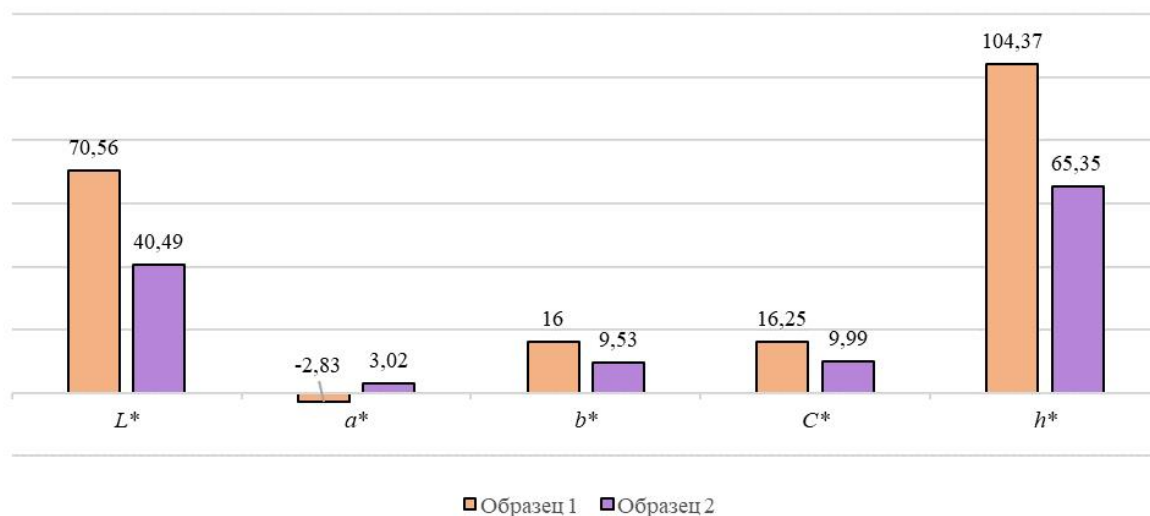


Рис. 5. Результаты определения цветности мякиша хлебобулочных изделий:

L^* – яркость (светлота); a^* – цветовая координата от зеленого к красному;

b^* – цветовая координата от синего к желтому; C^* – насыщенность цвета; h^* – угол цветового тона

Fig. 5. Color test results for the crumb of bakery products:

L^* – brightness (lightness); a^* – color in the green-red field;

b^* – color in the blue-yellow field; C^* – saturation; h^* – hue

Заключение

На основе проведенной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Применение порошка черники в рецептуре теста хлебобулочного изделия позволяет получить продукт с повышенной энергетической ценностью, обладающий оригинальным вкусом и ароматом.

2. Значения влажности, пористости и кислотности хлебобулочного изделия с порошком черники соответствуют требованиям ГОСТ 26987-2018¹¹. Установлено, что замена 5 % массы муки черничным порошком привела к уменьшению пористости мякиша на 8 % и удельного объема на 10 % за счет увеличения содержания клетчатки.

3. Согласно анализу цветности исследуемых изделий можно сделать вывод, что при добавлении черничного порошка корка и мякиш прокрашиваются равномерно за счет хорошей растворимости и высокой красящей способности тонкодисперсного порошка черники. Корка и мякиш хлебобулочного изделия имеют коричневый цвет с синеватым оттенком.

В дальнейших исследованиях планируется провести оценку влияния различной дозировки черничного порошка (например, 10, 15 %) в рецептуру теста на качественные показатели готовых хлебобулочных изделий. Также планируется оценить химический состав изделий на наличие веществ, придающих готовой продукции функциональные свойства (антоцианов, витаминов, полифенолов и др.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Алексеев Е. В., Каримова Н. Ю., Цветкова А. А. Современное состояние и перспективы развития способов переработки ягод черники: обзор предметного поля // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 1. С. 22–44. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.353>. EDN: VLMBNR.
- Ахметзянова М. А., Маслов А. В., Мингалева З. Ш. Применение лекарственного сырья в производстве пшеничного хлеба // Инновационные технологии в АПК: теория и практика : сб. ст. XII Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 15–16 марта 2024 г. Пенза : Пензен. гос. аграр. ун-т, 2024. С. 13–16. EDN: ZJITYG.

¹¹ ГОСТ 26987-2018. Хлеб белый из пшеничной муки высшего, первого и второго сортов. Технические условия. М., 1986.

- Доев А. С., Джабоева А. С., Тедтова В. В., Тедтов И. Э. Использование порошка из плодов облепихи в рецептуре хлебобулочных изделий // Технологии и продукты здорового питания : материалы X Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 20-летию кафедры "Технологии продуктов питания", 100-летию факультета ветеринарной медицины, пищевых и биотехнологий, Саратов, 24–25 мая 2018 г. Саратов, 2018. С. 10–15. EDN: TPEUWN.
- Дорн Г. А., Москвин В. И. Разработка рецептуры ржано-пшеничного хлеба с гречневой мукой и добавлением порошков из нетрадиционного растительного сырья // Агропродовольственная политика России. 2020. № 4. С. 12–16. EDN: DDNXHJ.
- Ковалев Н. Н., Кращенко В. В. Исследование влияния ламинации японской разных способов обработки на качество пшеничного хлеба // Научные труды Дальрыбвтуза. 2020. Т. 51, № 1. С. 54–61. EDN: DTCHBQ.
- Колесниченко М. Н., Козубаева Л. А., Юршева Е. А. Ржано-пшеничный хлеб с жимолостью // Вестник алтайской науки. 2014. № 1(19). С. 310–313. EDN: SIOWXJ.
- Кузнецов М. Г., Харьков В. В., Хакимова Е. Г. Измельчение растительного сырья в гидродинамических мельницах // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19, № 16. С. 59–61. EDN: WMUHLN.
- Левашов Р. Р., Мингалеева З. Ш. Исследование влияния добавки растительного происхождения на биотехнологические свойства дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 18. С. 268–269. EDN: UYYVKZ.
- Левашов Р. Р., Мингалеева З. Ш., Тазеева А. И., Лучкина А. С. [и др.]. Влияние комплексной добавки на показатели качества пшеничного хлеба // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 20. С. 133–134. EDN: ZXFJRF.
- Маслов А. В., Мингалеева З. Ш., Ямашев Т. А., Шибаева Н. Ф. Изучение влияния комплексной растительной добавки на свойства мучных смесей и пшеничного теста // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52, № 3. С. 511–525. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2385>. EDN: UBJCWN.
- Мингалеева З. Ш., Маслов А. В., Старовойтова О. В., Решетник О. А. Совершенствование технологии хлеба белого из муки пшеничной высшего сорта // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2019. № 6(59). С. 29–33. EDN: VURCGR.
- Мусаева Н. М., Бутгаева И. Р. Возможности использования вторичных сырьевых ресурсов // Современные проблемы и перспективы развития АПК Республики Дагестан : материалы региональной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, Махачкала, 27 февраля 2020 г. Махачкала, 2020. С. 102–111. EDN: ZWTHKN.
- Негматуллоева М. Н., Гафаров А. А., Мухиддинов А. Р., Собиров Р. Э. Повышение биологической ценности хлеба с применением высокобелкового порошка из семян маша // Вестник Технологического университета Таджикистана. 2023. № 4–2(55). С. 50–58. EDN: RABYQK.
- Харьков В. В., Докучаева И. С. Исследование технологических характеристик овощных ферментированных соков повышенной биологической ценности // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19, № 16. С. 35–37. EDN: WMUHIP.
- Харьков В. В., Николаев А. Н. Особенности кинетики реакций термического разложения материала при концентрировании во взвешенном слое // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 5. С. 33–37. DOI: [10.24153/2079-5920-2017-7-5-33-37](https://doi.org/10.24153/2079-5920-2017-7-5-33-37). EDN: ZQLDFJ.
- Шевелева Т. Л. Нетрадиционное растительное сырье в рецептурах хлебобулочных изделий // Вестник КрасГАУ. 2021. № 2(167). С. 143–150. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-2-143-150>. EDN: BPHMKF.
- Ashique S., Mukherjee T., Mohanty S., Garg A. [et al.]. Blueberries in focus: Exploring the phytochemical potentials and therapeutic applications // Journal of Agriculture and Food Research. 2024. Vol. 18. Article number: 101300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101300>.
- Blundell J., De Graaf K., Finlayson G., Halford J. C. G. [et al.]. Measuring food intake, hunger, satiety, and satiation in the laboratory // Handbook of Assessment Methods for Eating Behaviours and Weight-Related Problems: Measures, Theory and Research / eds.: D. Alison, M. Baskin. Sage Publications, United Kingdom, 2009. P. 283–325.
- Dubkova N. Z., Kharkov V. V., Vakhitov M. R. Using Jerusalem artichoke powder in functional food production // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9, Iss. 1. P. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-69-78>.
- Ginwala R., Bhavsar R., Chigbu D. G. I., Jain P. [et al.]. Potential role of flavonoids in treating chronic inflammatory diseases with a special focus on the anti-inflammatory activity of apigenin // Antioxidants. 2019. Vol. 8, Iss. 2. Article number: 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox8020035>.

- Kia P. S., Sadeghi A., Kashaninejad M., Zarali M. [et al.]. Application of controlled fermented amaranth supplemented with purslane (*Portulaca oleracea*) powder to improve technological functionalities of wheat bread // *Applied Food Research*. 2024. Vol. 4, Iss. 1. Article number: 100395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100395>.
- Kuznetsov M. G., Dubkova N. Z., Kharkov V. V., Gumerova G. H. [et al.]. Study of power consumption in vibromixing apparatus during Jerusalem artichoke drying // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 640. Article number: 072006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/7/072006>. (International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials 26–29 February 2020, Voronezh, Russian Federation).
- Machado A. M., de Paula H., Cardoso L. D., Costa N. M. B. Effects of brown and golden flaxseed on the lipid profile, glycemia, inflammatory biomarkers, blood pressure and body composition in overweight adolescents // *Nutrition*. 2015. Vol. 31, Iss. 1. P. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nut.2014.05.002>.
- Mitelut A. C., Popa E. E., Popescu P. A., Popa M. E. Trends of innovation in bread and bakery production // *Trends in wheat and bread making* / ed.: C. M. Galanakis. Academic Press, 2021. P. 199–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821048-2.00007-6>. (Chapter 7).
- Mokrzycki W., Tatol M. Color difference Delta E – A survey // *Machine Graphics and Vision*. 2011. Vol. 20, Iss. 4. P. 383–411.
- Naveed H., Sultan W., Awan K. A., Imtiaz A. [et al.]. Glycemic impact of cereal and legume-based bakery products: Implications for chronic disease management // *Food Chemistry: X*. 2024. Vol. 24. Article number: 101959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101959>.
- Quitral V., Sepúlveda M., Gamero-Vega G., Jiménez P. Seaweeds in bakery and farinaceous foods: A mini-review // *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2022. Vol. 28. Article number: 100403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100403>.
- Vignesh A., Amal T. C., Sarvalingam A., Vasanth K. A review on the influence of nutraceuticals and functional foods on health // *Food Chemistry Advances*. 2024. Vol. 5. Article number: 100749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100749>.

References

- Alekseenko, E. V., Karimova, N. Yu., Tsvetkova, A. A. 2023. Current state and prospects for the development of blueberry processing methods: A review of the subject field. *Storage and Processing of Farm Products*, 1, pp. 22–44. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.353>. EDN: VLMBNR. (In Russ.)
- Akhmetzyanova, M. A., Maslov, A. V., Mingaleeva, Z. Sh. 2024. Use of medicinal raw materials in the production of wheat bread. Collection of articles of the XII International scientific and practical conf. *Innovative technologies in the agro-industrial complex: Theory and practice*, 15–16 March, 2024, Penza. Penza, pp. 13–16. EDN: ZJITYG. (In Russ.)
- Doev, A. S., Dzhaboeva, A. S., Tedtova, V. V., Tedtov, I. E. 2018. The use of sea buckthorn powder in the formulation of bakery products. Proceedings of the X International scientific and practical conf. dedicated to the 20th anniversary of the Department of Food Technology and the 100th anniversary of the Faculty of Veterinary Medicine, Food and Biotechnology *Technologies and healthy food products*, Saratov, 24–25 May, 2018. Saratov, pp. 10–15. EDN: TPEUWN. (In Russ.)
- Dorn, G. A., Moskvina, V. I. 2020. Development of a recipe for rye-wheat bread with buckwheat flour and the addition of powders from non-traditional plant materials. *Agro-Food Policy in Russia*, 4, pp. 12–16. EDN: DDNXHJ. (In Russ.)
- Kovalev, N. N., Krashchenko, V. V. 2020. Study of the influence of Japanese laminaria of different processing methods on the quality of wheat bread. *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University*, 51(1), pp. 54–61. EDN: DTCHBQ. (In Russ.)
- Kolesnichenko, M. N., Kozubaeva, L. A., Yursheva, E. A. 2014. Rye-wheat bread with honeysuckle. *Vestnik altayskoy nauki*, 1(19), pp. 310–313. EDN: SIOWXJ. (In Russ.)
- Kuznetsov, M. G., Kharkov, V. V., Khakimova, E. G. 2016. Grinding of plant materials in hydrodynamic mills. *Herald of Technological University*, 19(16), pp. 59–61. EDN: WMUHLH. (In Russ.)
- Levashov, R. R., Mingaleeva, Z. Sh. 2015. Study of the influence of plant-based additives on the biotechnological properties of *Saccharomyces cerevisiae* yeast. *Herald of Technological University*, 18(18), pp. 268–269. EDN: UYYVKZ. (In Russ.)
- Levashov, R. R., Mingaleeva, Z. Sh., Tazeeva, A. I., Luchkina, A. S. 2017. The influence of a complex additive on the quality indicators of wheat bread. *Herald of Technological University*, 20(20), pp. 133–134. EDN: ZXFJRF. (In Russ.)
- Maslov, A. V., Mingaleeva, Z. Sh., Yamashev, T. A., Shibaeva, N. F. 2022. Study of the influence of complex plant additive on the properties of flour mixtures and wheat dough. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(3), pp. 511–525. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2385>. EDN: UBJCWH. (In Russ.)

- Mingaleeva, Z. Sh., Maslov, A. V., Starovoitova, O. V., Reshetnik, O. A. 2019. Improving the technology of white bread from premium wheat flour. *Technology and Merchandising of the Innovative Foodstuff*, 6(59), pp. 29–33. EDN: VURCGR. (In Russ.)
- Musayeva, N. M., Buttayeva, I. R. 2020. Possibilities of using secondary raw materials. Materials of the regional scientific and practical conf. of students, postgraduates and young scientists dedicated to the 75th anniversary of Victory in the Great Patriotic War *Modern problems and prospects for the development of the agro-industrial complex of the Republic of Dagestan*, 27 February, 2020, Makhachkala. Makhachkala, pp. 102–111. EDN: ZWTHKH. (In Russ.)
- Negmatulloeva, M. N., Gafarov, A. A., Mukhiddinov, A. R., Sobirov, R. E. 2023. Increasing the biological value of bread using high-protein powder from mung bean seeds. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta Tadjikistana*, 4–2(55), pp. 50–58. EDN: RABYQK. (In Russ.)
- Kharkov, V. V., Dokuchaeva, I. S. 2016. Investigation of technological characteristics of fermented vegetable juices of increased biological value. *Herald of Technological University*, 19(16), pp. 35–37. EDN: WMUHIP. (In Russ.)
- Kharkov, V. V., Nikolaev, A. N. 2017. Features of the kinetics of reactions of thermal decomposition of the material during concentration in a suspended layer. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 5, pp. 33–37. DOI: 10.24153/2079-5920-2017-7-5-33-37. EDN: ZQLDFJ. (In Russ.)
- Sheveleva, T. L. 2021. Non-traditional plant-based raw materials in bakery product recipes. *Bulletin of KSAU*, 2(167), pp. 143–150. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-2-143-150>. EDN: BPHMKF. (In Russ.)
- Ashique, S., Mukherjee, T., Mohanty, S., Garg, A. et al. 2024. Blueberries in focus: Exploring the phytochemical potentials and therapeutic applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18. Article number: 101300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101300>.
- Blundell, J., De Graaf, K., Finlayson, G., Halford, J. C. G. et al. 2009. Measuring food intake, hunger, satiety, and satiation in the laboratory. *Handbook of Assessment Methods for Eating Behaviours and Weight-Related Problems: Measures, Theory and Research*. Eds.: D. Alison, M. Baskin. Sage Publications, United Kingdom, pp. 283–325.
- Dubkova, N. Z., Kharkov, V. V., Vakhitov, M. R. 2021. Using Jerusalem artichoke powder in functional food production. *Foods and Raw Materials*, 9(1), pp. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-69-78>.
- Ginwala, R., Bhavsar, R., Chigbu, D. G. I., Jain, P. et al. 2019. Potential role of flavonoids in treating chronic inflammatory diseases with a special focus on the anti-inflammatory activity of apigenin. *Antioxidants*, 8(2). Article number: 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox8020035>.
- Kia, P. S., Sadeghi, A., Kashaninejad, M., Zarali, M. et al. 2024. Application of controlled fermented amaranth supplemented with purslane (*Portulaca oleracea*) powder to improve technological functionalities of wheat bread. *Applied Food Research*, 4(1). Article number: 100395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100395>.
- Kuznetsov, M. G., Dubkova, N. Z., Kharkov, V. V., Gumerova, G. H. et al. 2021. Study of power consumption in vibromixing apparatus during Jerusalem artichoke drying. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 640. Article number: 072006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/7/072006>. (International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials 26–29 February 2020, Voronezh, Russian Federation).
- Machado, A. M., de Paula, H., Cardoso, L. D., Costa, N. M. B. 2015. Effects of brown and golden flaxseed on the lipid profile, glycemia, inflammatory biomarkers, blood pressure and body composition in overweight adolescents. *Nutrition*, 31(1), pp. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nut.2014.05.002>.
- Mitelut, A. C., Popa, E. E., Popescu, P. A., Popa, M. E. 2021. Trends of innovation in bread and bakery production. *Trends in wheat and bread making*. Ed.: C. M. Galanakis. Academic Press, pp. 199–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821048-2.00007-6>. (Chapter 7).
- Mokrzycki, W., Tatol, M. 2011. Color difference Delta E – A survey. *Machine Graphics and Vision*, 20(4), pp. 383–411.
- Naveed, H., Sultan, W., Awan, K. A., Imtiaz, A. et al. 2024. Glycemic impact of cereal and legume-based bakery products: Implications for chronic disease management. *Food Chemistry: X*, 24. Article number: 101959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101959>.
- Quitral, V., Sepúlveda, M., Gamero-Vega, G., Jiménez, P. 2022. Seaweeds in bakery and farinaceous foods: A mini-review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 28. Article number: 100403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100403>.
- Vignesh, A., Amal, T. C., Sarvalingam, A., Vasanth, K. 2024. A review on the influence of nutraceuticals and functional foods on health. *Food Chemistry Advances*, 5. Article number: 100749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100749>.

Сведения об авторах

Дубкова Наиля Зуфаровна – ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Россия, 420015;
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
канд. техн. наук, доцент; e-mail: dubkova_n@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5207-3701>

Nailya Z. Dubkova – 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia, 420015;
Kazan National Research Technological University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: dubkova_n@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5207-3701>

Харьков Виталий Викторович – ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Россия, 420015;
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
канд. техн. наук, доцент; e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Vitaly V. Kharkov – 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia, 420015;
Kazan National Research Technological University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Шакирова Гадиля Камиловна – ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Россия, 420015;
Казанский национальный исследовательский технологический университет, студент;
e-mail: w-delia@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5717-2903>

Gadilia K. Shakirova – 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia, 420015;
Kazan National Research Technological University, Student;
e-mail: w-delia@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5717-2903>

УДК 664.66, 664.66.022.39

Технология производства хлебных палочек для питания женщин в периоды прегравидарной подготовки, беременности и лактации

Н. Г. Иванова*, А. А. Волконская

*Московский государственный университет технологий
и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Россия;
e-mail: n.ivanova@mgutm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3878-6355>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
25.03.2025;

получена
после доработки
13.05.2025;

принята
к публикации
15.05.2025

Ключевые слова:
хлебобулочные изделия,
хлебные палочки,
прегравидарная
подготовка, беременность
и лактация,
витамины группы В,
белок, кальций, магний

Во время беременности женский организм испытывает повышенную потребность в эссенциальных веществах. В ходе разработки технологии хлебных палочек в качестве источников витаминов группы В, кальция и магния, оказывающих благоприятное воздействие на состояние сердца, сосудов и нервной системы беременной женщины, вносили пюре шпината (30 %), меланж (15 %) и сыр "Пармезан" тертый (8 %). Мука нуттовая цельнозерновая в смеси с мукой пшеничной хлебопекарной I сорта в соотношении 1:3 использована как дополнительный источник белка. Внесение дополнительных ингредиентов придавало разработанным изделиям выраженный вкус и аромат. Увеличение кислотности не оказывало негативного влияния на органолептические показатели готового продукта. Повышение влажности мякиша обусловлено добавлением пюре шпината, что позволило увеличить расчетную норму выхода изделий на 3–5 %. Данные определения пищевой ценности расчетным методом показывают, что употребление 100 г разработанных хлебных палочек удовлетворяет суточную потребность женщины, находящейся в I триместре беременности, в белке (23 %), витамине К (около 71,7 %), витамине В₂ (11,1 %), витамине В₆ (10,0 %), витамине В₁₂ (6,7 %), фолатах (28,0 %), кальции (13,4 %), магнии (19,4 %). Хлебобулочное изделие "Палочки-выручалочки" рекомендуется для профилактики и устранения микронутритивного дефицита у женщин в период прегравидарной подготовки, а также во время беременности и последующей лактации.

Для цитирования

Иванова Н. Г. и др. Технология производства хлебных палочек для питания женщин в периоды прегравидарной подготовки, беременности и лактации. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 198–209. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-198-209>.

Breadstick technology for women nutrition during preconception preparation, pregnancy and lactation periods

Natalia G. Ivanova*, Alina A. Volkonskaya

*K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies
and Management (The First Cossack University), Moscow, Russia;
e-mail: n.ivanova@mgutm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3878-6355>

Article info

Received
25.03.2025;

received
in revised
13.05.2025;

accepted
15.05.2025

Key words:
bakery products,
breadsticks,
pregnancy preparation,
pregnancy and lactation,
B vitamins, protein,
calcium, magnesium

Abstract

During pregnancy, the female body experiences an increased need for essential substances. In the course of developing the technology of breadsticks, spinach puree (30 %), melange (15 %) and grated Parmesan cheese (8 %) have been added as sources of B vitamins, calcium and magnesium, which have a beneficial effect on the heart, blood vessels and nervous system of a pregnant woman. Whole-ground chickpea flour mixed with first-grade wheat flour in a ratio of 1 : 3 has been used as an additional source of protein. The addition of additional ingredients has given the developed products a distinct taste and aroma. Increased acidity has not had a negative effect on the organoleptic properties of the finished product. The increase in crumb moisture has been due to the addition of spinach puree, which makes it possible to increase the estimated yield of products by 3–5 %. The data of determining the nutritional value by the calculation method show that the consumption of 100 g of the developed bread sticks satisfies the daily requirement of a woman in the first trimester of pregnancy for protein (23 %), vitamin K (about 71.7 %), vitamin B₂ (11.1 %), vitamin B₆ (10.0 %), vitamin B₁₂ (6.7 %), folates (28.0 %), calcium (13.4 %), magnesium (19.4 %). The bakery product Palochki-Vyruchalochki is recommended for the prevention and elimination of micronutrient deficiency in women during pregravid preparation, as well as during pregnancy and subsequent lactation.

For citation

Ivanova, N. G. et al. 2025. Breadstick technology for women nutrition during preconception preparation, pregnancy and lactation periods. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 198–209. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-198-209>.

Введение

Включение в рацион питания продуктов, имеющих повышенную пищевую ценность, способствует укреплению здоровья и защитных функций организма (*Мерцалова и др., 2021*). Сбалансированный рацион питания беременной женщины должен включать разнообразные продукты, которые содержат эссенциальные нутриенты, необходимые для поддержания здоровья будущей матери и правильного развития плода. Новый организм формируется из материалов, поступающих из организма матери, поэтому важно следить за образом жизни и избегать нарушений пищевого поведения, неблагоприятно влияющего на развитие плода (*Матейкович и др., 2021; Rojhani et al., 2021*). Несоблюдение микронутритивного статуса во время беременности может привести к нарушениям нормального внутриутробного развития плода, преждевременным родам, рождению маловесных детей и даже к гибели плода, поэтому крайне необходимы и важны нутритивная поддержка гестации и адекватная подготовка к планируемой беременности – предгравидарная подготовка (*Иванова и др., 2022; Новикова и др., 2023; Marshall et al., 2022*).

Благополучное течение беременности зависит от физического здоровья и морального состояния женщины, поэтому в период планирования беременности необходимо компенсировать исходную недостаточность питания и обеспечить сбалансированное питание будущей матери, подкрепляя его полноценным отдыхом и умеренной физической активностью (*Рудыка, 2021; Dabb et al., 2023*).

В период активного роста и развития плода в первой половине беременности питание матери должно обеспечивать повышенные потребности в питательных веществах. Отмечается, что в России недостаточность витаминов группы В выявляется у 20–100 % женщин, а дефицит трех и более витаминов наблюдается у 70–80 % женщин (*Баранов и др., 2021; Партиева и др., 2024*). Поскольку витамины группы В функционально связаны между собой, то необходимо употреблять совместно и в комплексе с другими нутриентами при сочетании нескольких продуктов, содержащих данные нутриенты (*Камчатнов и др., 2022*). После поступления в организм витамины переходят в метаболически активную форму при участии ферментов. Так, синергетическое действие витаминов В₉ и В₁₂ поддерживает процессы деления и репликации клеток, а также участвует в метаболизме гомоцистеина. Указанный синергетический эффект подкрепляется действием витамина В₂, который в свою очередь является предшественником кофермента, участвующего в метаболизме витамина В₉ и способствующего преобразованию витамина В₁₂ после его превращения в биоактивную коферментную форму (*Коденцова и др., 2021*).

Витамин В₉ (фолиевая кислота, фолаты) играет важнейшую роль в поддержании процессов деления и роста клеток, синтеза гемоглобина и ДНК. Именно с его нехваткой зачастую сталкиваются беременные женщины, так как фолаты необходимы для формирования нервной трубки плода в первые недели беременности. В России в соответствии с МР 2.3.1.0253-21 установлены нормы суточного потребления витаминов для женщин в I триместре беременности [В₂ (рибофлавин) – 1,8–2,0 мг; В₆ (пиридоксин) – 2,1 мг; В₁₂ (цианокобаламин) – 3,0–3,5 мкг; В₉ (фолаты) – 600 мкг], которые могут варьироваться в зависимости от особенностей организма, возраста, генетически обусловленного механизма усвоения (например, фолатный цикл) и состояния здоровья. Следует учитывать тот факт, что избыточное поступление витаминов может повлечь негативные нарушения в процессе беременности: токсический эффект, нарушение органогенеза и макросомия плода, повышенный риск выкидыша и вероятность пищевой аллергии ребенка (*Гродницкая и др., 2021*).

Потребление микроэлементов считается необходимым для развития плода и здоровья беременных, поэтому в настоящее время по всему миру существует более 200 наименований продуктов питания и витаминных лекарственных препаратов, предназначенных для женщин в период беременности и грудного вскармливания (*Han et al., 2022*). В торговых сетях широкий ассортимент специализированной продукции для женщин представлен напитками и продуктами, обогащенными минеральными веществами и витаминами из натуральных источников (в том числе витаминами группы В). На российском рынке присутствуют сухие сбалансированные смеси для приготовления напитков на основе сухого обезжиренного молока или концентрата сывороточных белков от отечественных и зарубежных производителей, обогащенных соков, нектаров и чаев (*Королева и др., 2021*). Активно проводятся исследования по созданию новых хлебобулочных и кондитерских изделий с включением комплексов, содержащих витамины и минеральные вещества. Такие продукты часто могут содержать избыток сахарозы, жиров, натрия и других ингредиентов, необходимых для обеспечения высоких потребительских свойств, однако при этом снижающих их общую пищевую ценность. В таких случаях наиболее рациональным решением будет использование натурального сырья в качестве источников эссенциальных нутриентов (*Баласанян, 2024*).

Анализ научных публикаций, посвященных вопросам организации питания беременных женщин, позволяет сделать вывод о недостаточном удовлетворении потребности в эссенциальных нутриентах, что может привести к повышенному риску развития патологических состояний и заболеваний, негативно влияющих на внутриутробное развитие плода. В настоящее время необходимо проведение исследований

по включению в рецептуру хлебобулочных изделий ингредиентов, содержащих комплекс эссенциальных нутриентов, которые позволят рекомендовать их для включения в рацион будущей матери и станут эффективным способом профилактики различных осложнений беременности, родов и состояния новорожденного ребенка.

Целью работы являлась разработка технологии производства хлебных палочек, содержащих повышенное количество витаминов группы В, белков, кальция и магния, для питания женщин в периоды прегравидарной подготовки, беременности и последующей лактации.

Материалы и методы

Выбор рецептурных ингредиентов проводили на основе анализа опубликованных в период 2020–2025 гг. литературных данных о химическом составе и влиянии на организм природных источников витаминов группы В и других биологически активных веществ. В ходе поиска информации были установлены данные:

- 1) о количественном содержании витаминов группы В в продуктах;
- 2) положительном воздействии продуктов и содержащихся в них исследуемых биологически активных веществ на состояние здоровья матери и плода;
- 3) технологических свойствах сырья, его доступности и стоимости.

При проведении исследований для приготовления образцов изделий было использовано основное и вспомогательное сырье российского производства, соответствующее требованиям нормативной документации:

- мука пшеничная хлебопекарная, сорт I, "С. Пудовъ" (ГОСТ 26574-2017);
- дрожжи хлебопекарные прессованные, "САФ-НЕВА" (ГОСТ Р 54731-2011);
- сахар белый, "Агропак" (ГОСТ 33222-2015);
- масло подсолнечное, "МЭЗ Юг Руси" (ГОСТ 1129-2013);
- мука нуттовая цельносмолотая, "Образ жизни" (ТУ 10.61.20-001-38744625-2016);
- шпинат сырой замороженный, "Лента" (ГОСТ 34301-2017);
- сыр "Пармезан" тертый, "ПиР-ПАК" (ГОСТ Р 53512-2009);
- меланж яичный, "РусАгроГрупп" (ГОСТ 30363-2013);
- соль пищевая "Илецкая" (ГОСТ Р 51574-2018).

Для получения пюре шпината листья размораживали при комнатной температуре, промывали, очищая от примесей и других загрязнений, после чего измельчали на ножевой мельнице РМ-120 ("Спектро Лаб", Россия) до пюреобразного состояния.

Тесто для образцов хлебных палочек (из смеси муки пшеничной хлебопекарной I сорта, муки нуттовой цельносмолотой, дрожжевой суспензии, раствора соли, сахара и воды, масла подсолнечного, пюре шпината, меланжа и тертого сыра "Пармезан") замешивали в лабораторной тестомесильной машине У1-ЕТВ ("Мототех", Россия) в течение 10–15 мин до получения однородной массы. Тесто направляли на отлежку в течение 15–25 мин при комнатной температуре и подвергали натирке. Далее тесто разделявали, формируя длинные округленные с концов заготовки толщиной 10–15 мм, и укладывали на предварительно смазанные противни. Сформованные тестовые заготовки поступали на расстойку в течение 25–30 мин при температуре 35–40 °С и относительной влажности воздуха 75–85 % в шкафу окончательной расстойки, входящем в конструкцию печи. После окончательной расстойки тестовые заготовки, прошедшие предварительное ошпаривание в течение 2–3 мин, выпекали в конвекционной печи CRV FPF 40*605G (CRV bakery, Турция) при температуре 160–190 °С в течение 12–15 мин, затем охлаждали при комнатной температуре в течение 30–40 мин.

В процессе работы были исследованы следующие образцы хлебных палочек:

- образец 1 (контрольный), приготовленный по рецептуре хлебных палочек ярославских простых¹;
- образец 2 (экспериментальный), приготовленный с заменой 25 % муки пшеничной хлебопекарной I сорта мукой нуттовой цельносмолотой и последующим внесением пюре шпината (30 %), меланжа (15 %) и измельченного твердого сыра (8 %) к общей массе смеси муки пшеничной и нуттовой; соотношение нуттовой и пшеничной муки составило 1 : 3.

Количество дополнительных ингредиентов определяли в ходе анализа химического состава ингредиентов и предварительного расчета пищевой ценности методом математического моделирования. Целью расчетов являлось содержание в 100 г продукта витаминов В₂, В₆, фолатов (В₉), белка, кальция и магния; количество каждого вещества должно было составлять не менее 10 % суточной потребности женщин, находящихся в I триместре беременности (в соответствии с МР 2.3.1.0253-21).

Рецептуры образцов хлебных палочек представлены в табл. 1.

¹ Сборник технологических инструкций для производства хлеба и хлебобулочных изделий. Утвержден 7 июля 1988 г. Министерство хлебопродуктов СССР. НПО "Хлебпром". М. : Прейскурантиздат, 1989. 494 с.

Таблица 1. Рецептуры образцов хлебных палочек
Table 1. Formulations of breadstick samples

Наименование сырья	Расход сырья, г на 100 г готовой продукции	
	Образец 1 (контрольный)	Образец 2 (экспериментальный)
Мука пшеничная I сорта	100,0	56,4
Мука нутовая цельносмолотая	–	18,8
Дрожжи прессованные	5,0	3,76
Сахар белый	2,0	1,5
Соль пищевая	1,5	0,75
Масло подсолнечное	2,5	1,13
Пюре шпината	–	22,56
Сыр "Пармезан" тертый	–	6,0
Меланж	–	11,3
Вода питьевая	По расчету для обеспечения влажности теста 30–32 %	

Органолептическая оценка готовой продукции проводилась в соответствии с ГОСТ 5667-2022. Образцы хлебных палочек оценивались по таким показателям, как внешний вид, состояние поверхности, цвет, вкус, запах, вид в изломе и общее впечатление. Органолептическая оценка проводилась дегустационной комиссией в количестве 10 человек с оформлением дегустационных листов по пятибалльной шкале в следующей градации: 1 балл – неудовлетворительно, 2 – удовлетворительно, 3 – приемлемо, 4 – хорошо, 5 – отлично.

В соответствии с ГОСТ 8494-96 влажность хлебных палочек определяли гравиметрическим методом, а кислотность – титриметрическим методом. Коэффициент набухаемости оценивали методом определения набухаемости для изделий хлебобулочных бараночных в соответствии с ГОСТ 32124-2013.

Показатели качества устанавливали в трехкратной повторности; статистическую обработку полученных данных проводили с помощью программного обеспечения Microsoft Excel.

Для определения пищевой ценности готового продукта применяли расчетный метод, разработанный Научно-исследовательским институтом хлебопекарной промышленности, который позволяет определить химический состав и энергетическую ценность хлебобулочных изделий с использованием справочных таблиц². Сравнение степени удовлетворения суточной потребности беременной женщины (первый триместр, возраст 18–29 лет, коэффициент физической активности 1,6) при употреблении 100 г изделия осуществляли в соответствии с МР 2.3.1.0253-2021 "Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации".

Результаты и обсуждение

Анализ литературы показал, что к наиболее распространенным природным источникам фолатов, участвующих в формировании плода, относятся зеленые травянистые растения и листовые овощи: шпинат, салат, руккола, брокколи, кинза, петрушка, базилик и спаржа. Учитывая функциональную связь между витаминами В₂, В₆, В₉ и С, а также тот факт, что источником витамина К, отвечающего за синтез крови и костной ткани, являются зеленые овощи, проведено исследование состава перечисленных витаминов, оказывающих положительное влияние на процессы органогенеза и отвечающих за формирование будущего малыша, в наиболее распространенных растительных источниках (табл. 2) (Бахмет и др., 2021; Причко и др., 2021; Сухарева и др., 2022; Ткачева, 2022; Харитоновна, 2024; Юрин и др., 2022; Zhang et al., 2021).

Таблица 2. Содержание витаминов в наиболее распространенных растительных источниках
Table 2. Content of some vitamins in the most common plant sources

Наименование растительного сырья	Содержание витамина в 100 г продукта				
	В ₂ , мг	В ₆ , мг	В ₉ , мкг	С, мг	К, мкг
Шпинат	0,2	0,2	146,0	28,1	482,9
Брокколи	0,114	0,191	65,0	89,2	102,0
Руккола	0,086	0,073	97,0	15,0	108,6
Сельдерей	0,1	0,08	21,0	38,0	29,3
Базилик	0,076	0,155	68,0	18,0	414,8
Укроп	0,1	0,15	27,0	85,0	62,8
Кинза	0,16	0,15	62,0	27,0	310,0

² Косован А. П., Дремучева Г. Ф., Поландова Р. Д. [и др.]. Методическое руководство по определению химического состава и энергетической ценности хлебобулочных изделий. М. : ГосНИИХП, 2008. 214 с

Согласно данным, приведенным в табл. 2, наибольшим содержанием витамина В₉ отличается шпинат, также он лидирует по показателям содержания витаминов В₂, В₆ и К.

Брокколи, укроп, кинза и базилик могут служить источниками витаминов С и К, однако в связи с более выраженным своеобразным вкусом и/или ароматом их невозможно внести в рецептуру хлебных палочек в свежем или пюреобразном виде в количествах, достаточных для обеспечения не менее 10 % суточной потребности в витаминах без ухудшения органолептических свойств самого изделия. Для сохранения витамина С в готовом продукте важно избегать длительной технологической обработки, в том числе термической. Вследствие этого принято решение о нерациональности применения растительного сырья, содержащего наибольшее количество витамина С: брокколи, укропа и сельдерея. Наиболее приемлемым в данном случае представляется внесение пюре шпината в качестве дополнительного источника витаминов группы В и К для приготовления хлебных палочек.

Мука нутовая цельносомлотая содержит больше белков, витаминов, минеральных веществ и пищевых волокон в сравнении с мукой пшеничной. Нут по своей биологической ценности занимает лидирующее место среди множества бобовых культур, что говорит о целесообразности замены в рецептуре хлебных палочек части муки пшеничной на нуттовую с целью повышения пищевой ценности готового продукта (Зуева и др., 2021).

Сыры характеризуются высокой пищевой и энергетической ценностью, поскольку в их составе присутствуют легкоусвояемые белки, молочный жир и кальций в форме лактата (Семенова и др., 2021). В яичном белке содержится полноценный набор аминокислот и большое содержание необходимых женщине в период беременности и лактации микронутриентов – кальций, натрий, магний и витамины группы В (Зимняков, 2021).

С целью оценки технологических свойств и возможности применения шпината в производстве хлебных палочек определяли его органолептические показатели, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Органолептические показатели качества шпината и пюре шпината

Table 3. Organoleptic quality indicators of spinach and spinach puree

Показатель	Описание	
	Шпинат	Пюре шпината
Внешний вид	Листья свежие, молодые, целые, здоровые, невялые, незагрязненные, непожелтевшие, неповрежденные	Однородная пюреобразная текучая масса; без крупных частиц и волокон
Запах и вкус	Характерные для ботанического сорта; без постороннего запаха и привкуса	
Цвет	Зеленый различных оттенков	

При использовании шпината в качестве дополнительного ингредиента для приготовления хлебных палочек требуется его измельчение до пюреобразного состояния (рис. 1), поскольку применение этой добавки в сыром виде будет вызывать затруднения в получении теста однородной консистенции.



Рис. 1. Внешний вид пюре шпината

Fig. 1. Appearance of spinach puree

Проведенный анализ органолептических свойств муки нутовой цельносмолотой, меланжа, масла подсолнечного и сыра "Пармезан" тертого показало их соответствие нормативной документации.

Результаты определения органолептических и физико-химических показателей качества образцов хлебных палочек представлены в табл. 4, а также на рис. 2 и 3.

Таблица 4. Показатели качества образцов хлебных палочек
Table 4. Quality indicators of breadsticks samples

Показатели	Образец 1 (контрольный)	Образец 2 (экспериментальный)
<i>– органолептические</i>		
Форма	Палочки с закругленными концами длиной 100–120 мм, толщиной 15–20 мм	
Поверхность	Гладкая	Шероховатая
Цвет	Светло-коричневый	Коричневый
Вкус и запах	Свойственный данному виду изделия; без посторонних запахов	Выраженный бобовый привкус, соответствующий запах, легкий травянистый привкус, выраженный аромат сыра
Вид в изломе	Пропеченный, разрыхленный, без признаков непромеса	Пропеченный, разрыхленный, с вкраплениями шпината и равномерно распределенными частицами тертого сыра
<i>– физико-химические</i>		
Влажность, %	$9,0 \pm 0,18$	$12,8 \pm 0,25$
Кислотность, град	$2,0 \pm 0,04$	$3,1 \pm 0,06$
Коэффициент набухаемости	$1,2 \pm 0,02$	$6,0 \pm 0,12$

Как видно из табл. 4, дополнительные ингредиенты оказали значительное влияние на органолептические и физико-химические показатели хлебных палочек. За счет замены 25 % пшеничной муки на нутовую хлебные палочки стали иметь овальную форму, наблюдаемую в изломе. Вследствие добавления пюре шпината и сыра "Пармезан" образец 2 имел легкий травянистый привкус и интенсивный аромат сыра. По результатам дегустационной оценки образец 2 показал более высокие значения в сравнении с образцом 1 (рис. 3). Дегустационная комиссия отмечала привлекательные внешний вид, состояние поверхности и цвет образца 2, а его вкус отличался большей выраженностью по сравнению с образцом 1.

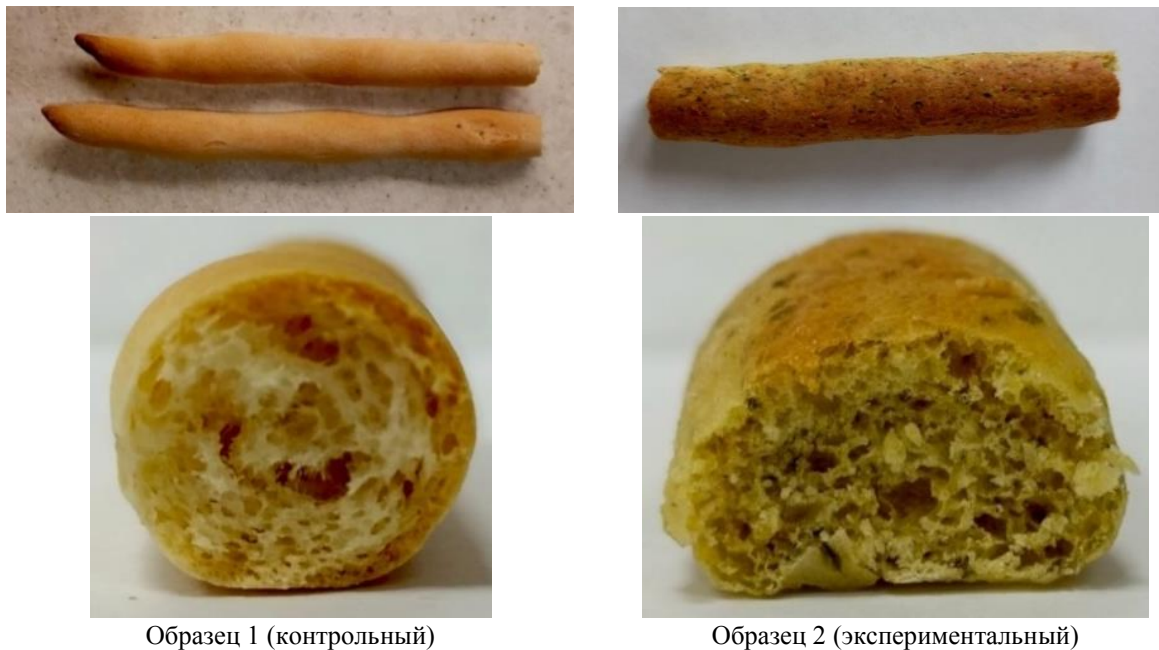


Рис. 2. Внешний вид и вид в изломе образцов хлебных палочек
Fig. 2. Appearance and fracture view of breadsticks samples

При введении пюре шпината, заменяющего часть воды и имеющего повышенную кислотность, наблюдалось увеличение кислотности мякиша образца 2, что не оказывало негативного влияния на органолептические показатели готового продукта. Повышение влажности мякиша образца 2 по сравнению с образцом 1 объясняется главным образом добавлением пюре шпината, что позволяет увеличить расчетную норму выхода изделий на 3–5 %.

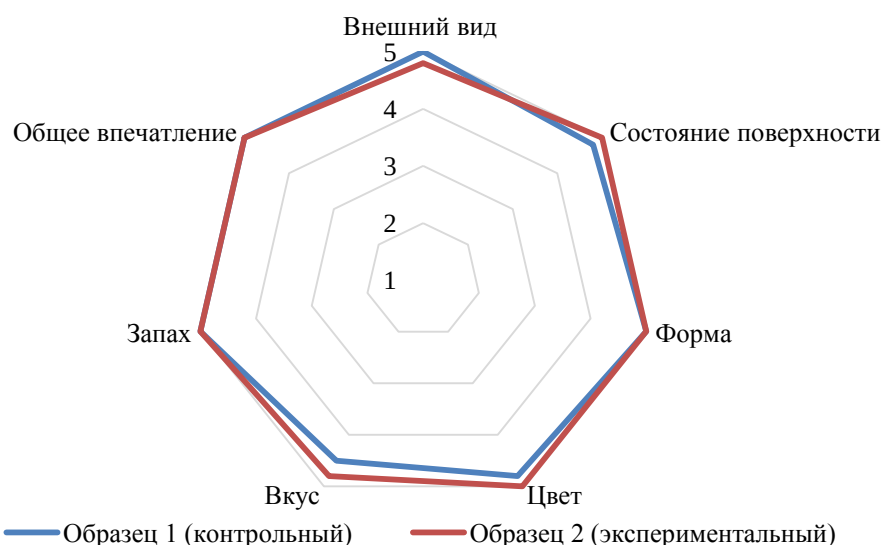


Рис. 3. Балльная оценка дегустационного анализа образцов хлебных палочек

Fig. 3. Scoring of the tasting evaluation of breadsticks samples

Рассматриваемый вид хлебных палочек получил название "Палочки-выручалочки". В ходе исследования разработан проект нормативной документации для приготовления и использования нового продукта. Внешний вид экспериментального образца хлебных палочек "Палочки-выручалочки" приведен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид хлебных палочек "Палочки-выручалочки"

Fig. 4. Appearance of Palochki-Vyruchalochki breadsticks

Результаты расчета пищевой ценности образцов хлебных палочек и определение степени удовлетворения суточной потребности женщины в белках и витаминах в I триместре беременности представлены в табл. 5.

Таблица 5. Расчетные данные пищевой ценности образцов хлебных палочек

Table 5. Nutritional value of breadsticks samples

Показатель	Суточная потребность	Содержание в 100 г продукта		Степень удовлетворения суточной потребности, %	
		Образец 1	Образец 2	Образец 1	Образец 2
Белки, г	66,0	11,9	15,2	18,0	23,0
Жиры, г	77,0	4,0	6,0	5,2	7,8
Углеводы, г	310,0	70,7	52,4	22,7	16,9
Энергетическая ценность, ккал	2 200,0	398	342	18,1	15,6

Витамины					
В ₂ (рибофлавин), мг	1,8	0,1	0,2	5,56	11,1
В ₆ (пиридоксин), мг	2,0	0,1	0,2	5,0	10,0
В ₉ (фолаты), мкг	600,0	70,3	167,8	11,7	28,0
В ₁₂ (цианкобаламин) мкг	3,0	0	0,2	0	6,7
С (аскорбиновая кислота), мг	110,0	0	2,2	0	2,0
К (филлохинон), мкг	120,0	0,4	86,0	0,33	71,7
Минеральные вещества					
Кальций, мг	1 000,0	35,7	134,2	3,57	13,4
Магний, мг	420,0	47,4	81,4	11,3	19,4
Натрий, мг	1 300,0	587,2	421,2	45,17	32,4

Как показывают данные табл. 5, образец 1 по сравнению с образцом 2, содержит на 35 % больше углеводов и обладает более высокой энергетической ценностью (на 16 %), однако содержит на 33 % меньше жиров. При этом образец 2 характеризуется большим количеством белка (на 27,7 %), витаминов [В₂ и В₆ (в 2 раза), В₉ (в 2,4 раза), К (в 215 раз)] и минеральных веществ [кальция (в 3,7 раз), магния (1,7 раз)] и меньшим количеством натрия (в 1,4 раза). Употребление 100 г разработанных хлебных палочек покрывает суточную потребность женщины, находящейся в I триместре беременности, в необходимых для ее здоровья (и здоровья будущего ребенка) веществах, а также положительно влияющих на последующие роды: белки – на 23 %; витамин К – 71,7; витамин В₂ – 11,1; витамин В₆ – 10,0; витамин В₁₂ – 6,7; фолаты – 28,0; кальций – 13,4; магний – на 19,4 %.

Разработанная технология рекомендована для внедрения в производство нового вида хлебобулочных изделий "Палочки-выручалочки", содержащих повышенное количество витаминов группы В, белков, кальция, магния и предназначенных для питания женщин в период прегравидарной подготовки, а также во время беременности и последующей лактации.

Выводы

В результате проведенного исследования разработана технология производства хлебных палочек "Палочки-выручалочки". В качестве источников эссенциальных веществ (витамины группы В, кальций и магний), оказывающих благоприятное воздействие на регулирование работы сердца, сосудов и нервной системы беременной женщины, вносили пюре шпината (30 % к общей массе муки), меланж (15 %) и сыр "Пармезан" тертый (8 %). В качестве дополнительного источника белков была внесена мука нуттовая цельносмолотая в смеси с пшеничной мукой I сорта в соотношении 1 : 3. Полученное в результате расчета пищевой ценности методом математического моделирования соотношение ингредиентов позволило изготовить изделие с наилучшими органолептическими показателями и повышенной пищевой ценностью.

Для обеспечения качества новой продукции был сформирован проект нормативной документации.

В рамках проведенного исследования разработана технология нового вида хлебобулочных изделий, рекомендованных для включения в рацион питания женщин в период прегравидарной подготовки, а также во время беременности и последующей лактации для профилактики и возможного устранения микронутритивного дефицита.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Баласанян С. Ю. Обогащенные продукты питания стратегии улучшения пищевой ценности // Инновационная наука. 2024. № 1–1. С. 12–21. EDN: BCWSCA.
- Баранов И. И., Дмитриев М. Э., Попович Л. Д., Тетрашвили Н. К. [и др.]. Обеспеченность микронутриентами женщин в РФ: влияние на течение беременности, перинатальные исходы и демографические показатели // Акушерство и гинекология: Новости. Мнения. Обучение. 2021. Т. 9, № 4(34). С. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.33029/2303-9698-2021-9-4-44-51>. EDN: PLTRQH.
- Бахмет М. П., Касьянов Г. И. Перспективы получения пищевых добавок из листьев и соцветий базилика эвгенольного и базилика обыкновенного // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2021. № 5–6(383–384). С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2021.5-6.13>. EDN: THPXP.
- Гродницкая Е. Э., Пальчик Е. А., Дуянова О. П. Обеспеченность женщины микронутриентами во время прегравидарной подготовки, беременности и грудного вскармливания. Задачи и перспективы // Вопросы гинекологии, акушерства и перинатологии. 2021. Т. 20, № 1. С. 122–128. DOI: <https://doi.org/10.20953/1726-1678-2021-1-122-128>. EDN: NELFEO.
- Зимняков В. М. Состояние производства яиц в России // Сурский вестник. 2021. № 2(14). С. 82–87. DOI: https://doi.org/10.36461/2619-1202_2021_02_013. EDN: XOAXMY.

- Зуева Е. А., Слугинова Н. И., Варламова Е. Н., Погосян Д. Г. Использование муки из семян нута в технологии пшеничного батона // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10, № 1(53). С. 170–173. DOI: 10.46548/21vek-2021-1053-0031. EDN: QFBBNA.
- Иванова Н. Г., Никитин И. А., Годова Н. М., Пономарева Е. И. [и др.]. Расширение ассортимента булочных изделий улучшенной пищевой ценности // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022. № 3. С. 160–167. DOI: 10.24412/2311-6447-2022-3-160-167. EDN: JCTSCE.
- Камчатнов П. Р., Чугунов А. В., Кабанов А. А. Витамины группы В и заболевания нервной системы // Consilium Medicum. 2022. Т. 24, № 11. С. 783–789. DOI: <https://consilium.orscience.ru/2075-1753/article/view/120216>. EDN: YRRPMO.
- Коденцова В. М., Рисник Д. В., Ладодо О. Б. Потребление витаминов: вклад отдельных пищевых продуктов и последствия различных диет // Медицинский оппонент. 2021. № 1(13). С. 48–56. EDN: KGMNJQ.
- Королева О. А., Горбунчикова М. С. Анализ ассортимента специализированных продуктов питания для беременных женщин на рынке России и города Кемерово // Агропромышленному комплексу – новые идеи и решения : материалы XX Внутривузовской науч.-практ. конф., Кемерово, 4 февраля 2021 г. Кемерово, 2021. С. 159–164. EDN: ZJRMUY.
- Матейкович Е. А., Ермакова П. А., Ермакова А. А., Кайдалова О. В. Оценка форм нарушения пищевого поведения и их влияние на прогноз гестационного периода // Университетская медицина Урала. 2021. Т. 7, № 4(27). С. 23–25. EDN: BSTUCE.
- Мерцалова С. Л., Мерцалов И. О. Основные тенденции функционального питания в современном мире // Научные записки ОрелГИЭТ. 2021. № 1(37). С. 65–68. EDN: JOBTTF.
- Новикова Н. Ю., Цибизова В. И., Первунина Т. М., Малушко А. В. Нутрициология и образ жизни при беременности // Российский журнал персонализированной медицины. 2023. Т. 3, № 2. С. 82–92. DOI: <https://doi.org/10.18705/2782-3806-2023-3-2-82-92>. EDN: RSGROA.
- Парпиева О. Р., Эрматова Г. А., Камалова Д. А., Якубов А. Корреляционная связь между питанием и состоянием здоровья женщин репродуктивного возраста. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11634575>. Ntrcn. (Zenodo [Data set]. 2024).
- Причко Т. Г., Казахмедов Р. Э., Германова М. Г. Исследование питательной ценности отдельных органов капусты брокколи // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2021. № 68(2). С. 242–254. DOI: <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2021-2-68-242-254>. EDN: HAJPEW.
- Рудыка Т. Ю. Влияние факторов нездорового образа жизни на протекание процесса беременности // Повышение качества профессиональной подготовки специалистов социальной и образовательной сфер : сб. науч. ст. / отв. за вып. С. А. Моторов. Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2021. С. 251–254. EDN: ISTGTQ.
- Семенова А. А., Огнева О. А. Сыр и его многообразие // Colloquium-Journal. 2021. № 9–2(96). С. 23–24. EDN: VVYVEI.
- Сухарева Т. Н., Топоркова К. И. Обоснование получения блинчиков со шпинатом // Наука и образование. 2022. Т. 5, № 2. Номер статьи: 370. EDN: LUMFUF.
- Ткачева М. И. Укроп и петрушка как биологически активная добавка витамина К к пище // Эндокринология. Новости. Мнения. Обучение. 2022. Т. 11, № 4(41). С. 132–135. EDN: ZDNLJM.
- Харитоновна И. Б. Исследование химического состава и определение биологически активных веществ в некоторых овощных культурах // Технология органических веществ : материалы 88-й Науч.-технич. конф. проф.-преподавательского состава, науч. сотр. и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 29 янв. – 16 февр. 2024 г. / отв. за изд. И. В. Войтов. Минск : БГТУ, 2024. С. 411–414. EDN: YFXKDC.
- Юрин А. А., Золотко Е. В. Зеленая культура Руккола (Индау) – биологические характеристики, химический состав растения, значение и применение // Вклад молодых ученых в развитие АПК : сб. тез., подготовл. в рамках Всерос. науч.-практ. конф. "Молодежь и наука – 2022", Екатеринбург, 15 марта 2022 г. В 2 т. Т. 2. / науч. ред.: С. А. Маланичев. Екатеринбург : Уральский ГАУ, 2022. С. 36–38. EDN: RBVYVU.
- Dabb C., Dryer R., Brunton R. J., Yap K. [et al.]. Paternal pregnancy-related anxiety: Systematic review of men's concerns and experiences during their partners' pregnancies // Journal of Affective Disorders. 2023. Vol. 323. P. 640–658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jad.2022.11.092>.
- Han T., Dong J., Zhang J., Zhang C. [et al.]. Nutrient supplementation among pregnant women in China: An observational study // Public Health Nutrition. 2022. Vol. 25, Iss. 6. P. 1537–1542. DOI: <https://doi.org/10.1017/s1368980021001269>.
- Marshall N. E., Abrams B., Barbour L. A., Catalano P. [et al.]. The importance of nutrition in pregnancy and lactation: Lifelong consequences // American Journal of Obstetrics and Gynecology. 2022. Vol. 226, Iss. 5. P. 607–632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2021.12.035>.

- Rojhani A., Ouyang P., Gullon-Rivera A., Dale T. M. Dietary quality of pregnant women participating in the special supplemental nutrition program for women, infants, and children // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, Iss. 16. Article number: 8370. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18168370>.
- Zhang Y., Xiao Z., Ager E., Kong L. [et al.]. Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture // *Journal of Future Foods*. 2021. Vol. 1, Iss. 1. P. 58–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.07.001>.

References

- Balasanyan, S. Y. 2024. Fortified food strategies for improving nutritional value. *Innovation Science*, 1–1, pp. 12–21. EDN: BCWCKA. (In Russ.)
- Baranov, I. I., Dmitriev, M. E., Popovich, L. D., Tetrushvili, N. K. et al. 2021. Micronutrient supply to women in the Russian Federation: Impact on pregnancy, perinatal outcomes and demographic indicators. *Obstetrics and Gynecology: News, Opinions, Training*, 9(34), pp. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.33029/2303-9698-2021-9-4-44-51>. EDN: PLTRQH. (In Russ.)
- Bakhmet, M. P., Kasyanov, G. I. 2021. Prospects of obtaining food additives from the leaves and inflorescences of basil eugenol and Basil vulgaris. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 5–6(383–384), pp. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2021.5-6.13>. EDN: THPXP. (In Russ.)
- Grodnitskaya, E. E., Palchik, E. A., Duyanov, O. P. 2021. A woman's provision of micronutrients during pre-pregnancy preparation, pregnancy and breastfeeding. Tasks and prospects. *Gynecology, Obstetrics and Perinatology*, 20(1), pp. 122–128. DOI: <https://doi.org/10.20953/1726-1678-2021-1-122-128>. EDN: NELFEO. (In Russ.)
- Zimnyakov, V. M. 2021. The state of egg production in Russia. *Sursky Vestnik*, 2(14), pp. 82–87. DOI: https://doi.org/10.36461/2619-1202_2021_02_013. EDN: XOAXMY. (In Russ.)
- Zueva, E. A., Sluginova, N. I., Varlamova, E. N., Pogosyan, D. G. 2021. The use of chickpea seed flour in wheat loaf technology. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*, 10(1(53)), pp. 170–173. DOI: 10.46548/21vek-2021-1053-0031. EDN: QFBBNA. (In Russ.)
- Ivanova, N. G., Nikitin, I. A., Godova, N. M., Ponomareva, E. I. et al. 2022. Expanding the range of bakery products with improved nutritional value. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex-Healthy Food Products*, 3, pp. 160–167. DOI: 10.24412/2311-6447-2022-3-160-167. EDN: JCTSCE. (In Russ.)
- Kamchatnov, P. R., Chugunov, A. V., Kabanov, A. A. 2022. B vitamins and diseases of the nervous system. *Consilium Medicum*, 24(11), pp. 783–789. DOI: <https://consilium.orscience.ru/2075-1753/article/view/120216>. EDN: YRRPMO. (In Russ.)
- Kodentsova, V. M., Risnik, D. V., Ladodo, O. B. 2021. Vitamin intake: The contribution of individual foods and the effects of different diets. *Medical Opponent*, 1(13), pp. 48–56. EDN: KGMNJQ. (In Russ.)
- Koroleva, O. A., Gorbunchikova, M. S. 2021. Analysis of the range of specialized food products for pregnant women in the Russian market and the city of Kemerovo. Proceedings of XX scien.-pract. conf. *Agro-industrial Complex – New Ideas and Solutions*, Kemerovo, 4 February, 2021. Kemerovo, pp. 159–164. EDN: ZJRMUY. (In Russ.)
- Mateikovich, E. A., Ermakova, P. A., Ermakova, A. A., Kaidalova, O. V. 2021. Assessment of forms of eating disorders and their impact on the prognosis of the gestational period. *Ural University Medicine*, 7(4(27)), pp. 23–25. EDN: BSTUCE. (In Russ.)
- Mertsalova, S. L., Mertsalov, I. O. 2021. The main trends of functional nutrition in the modern world. *Scientific Notes of OrelGIET*, 1(37), pp. 65–68. EDN: JOBTTF. (In Russ.)
- Novikova, N. Yu., Tsibizova, V. I., Pervunina, T. M., Malushko, A. V. 2023. Nutrition and lifestyle during pregnancy. *Russian Journal for Personalized Medicine*, 3(2), pp. 82–92. DOI: <https://doi.org/10.18705/2782-3806-2023-3-2-82-92>. EDN: RSGROA. (In Russ.)
- Parpieva, O. R., Ermatova, G. A., Kamalova, D. A., Yakubov, A. 2024. Correlation between nutrition and the state of health of women of reproductive age. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11634575>. Ntrcn. (Zenodo [Data set]. 2024). (In Russ.)
- Prichko, T. G., Kazakhmedov, R. E., Germanova, M. G. 2021. Investigation of the nutritional value of individual organs of broccoli cabbage. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*, 68(2), pp. 242–254. DOI: <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2021-2-68-242-254>. EDN: HAJPEW. (In Russ.)
- Rudyka, T. Y. 2021. The influence of unhealthy lifestyle factors on the course of pregnancy. Coll. of scientific articles *Improving the quality of professional training of specialists in the social and educational fields*. Vitebsk, pp. 251–254. EDN: ISTGTQ. (In Russ.)
- Semenova, A. A., Ogneva, O. A. 2021. Cheese and its variety. *Colloquium-Journal*, 9–2(96), pp. 23–24. EDN: VYVYEI. (In Russ.)

- Sukhareva, T. N., Toporkova, K. I. 2022. The rationale for obtaining pancakes with spinach. *Nauka i Obrazovanie*, 5(2). Article number: 370. EDN: LUMFUF. (In Russ.)
- Tkacheva, M. I. 2022. Dill and parsley as a biologically active vitamin K supplement to food. *Endocrinology: News, Opinions, Training*, 11(4(41)), pp. 132–135. EDN: ZDNLJM. (In Russ.)
- Kharitonova, I. B. 2024. Investigation of chemical composition and determination of biologically active substances in some vegetable crops. Proceedings of the 88th Scientific and Technical Conf. *Technology of Organic Substances*, Minsk, January 29, 2024. Minsk, pp. 411–414. EDN: YFXKDC. (In Russ.)
- Yurin, A. A., Zolotko, E. V. 2022. Green culture of arugula (indau) – biological characteristics, chemical composition of plants, significance and application. Coll. of articles *Contribution of young scientists to the development of agriculture*, Ekaterinburg, 15 March, 2022. In 2 vols. Vol. 2. Ekaterinburg, pp. 36–38. EDN: RBVYVU. (In Russ.)
- Dabb, C., Dryer, R., Brunton, R. J., Yap, K. et al. 2023. Paternal pregnancy-related anxiety: Systematic review of men's concerns and experiences during their partners' pregnancies. *Journal of Affective Disorders*, 323, pp. 640–658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jad.2022.11.092>.
- Han, T., Dong, J., Zhang, J., Zhang, C. et al. 2022. Nutrient supplementation among pregnant women in China: An observational study. *Public Health Nutrition*, 25(6), pp. 1537–1542. DOI: <https://doi.org/10.1017/s1368980021001269>.
- Marshall, N. E., Abrams, B., Barbour, L. A., Catalano, P. et al. 2022. The importance of nutrition in pregnancy and lactation: Lifelong consequences. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 226(5), pp. 607–632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2021.12.035>.
- Rojhani, A., Ouyang, P., Gullon-Rivera, A., Dale, T. M. 2021. Dietary quality of pregnant women participating in the special supplemental nutrition program for women, infants, and children. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16). Article number: 8370. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18168370>.
- Zhang, Y., Xiao, Z., Ager, E., Kong, L. et al. 2021. Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture. *Journal of Future Foods*, 1(1), pp. 58–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.07.001>.

Сведения об авторах

Иванова Наталья Геннадьевна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), канд. техн. наук, доцент;
e-mail: n.ivanova@mgutm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3878-6355>

Natalia G. Ivanova – 73 Zemlyanoi Val, Moscow, Russia, 109004; K. G. Razumovsky Moscow State
University of Technologies and Management (The First Cossack University),
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: n.ivanova@mgutm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3878-6355>

Волконская Алина Алексеевна – ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, Россия, 109004;
Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), студент;
e-mail: volkonskya2013@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3663-6939>

Alina A. Volkonskaya – 73 Zemlyanoi Val, Moscow, Russia, 109004;
K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (The First Cossack University),
Student; e-mail: volkonskya2013@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3663-6939>

Нормативные документы, использованные в статье

ГОСТ 26574-2017	Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия. Введен 01.01.2019. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200157423
ГОСТ Р 54731-2011	Дрожжи хлебопекарные прессованные. Технические условия. Введен 01.01.2013. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200089988
ГОСТ 33222-2015	Сахар белый. Технические условия. Введен 07.01.2016. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200123909
ГОСТ Р 51574-2018	Соль пищевая. Общие технические условия. Введен 09.01.2018. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200159300
ГОСТ 1129-2013	Масло подсолнечное. Технические условия. Введен 07.01.2014. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200105924
ГОСТ 34301-2017	Щавель и шпинат свежие. Технические условия. Введен 07.01.2018. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200157848
ГОСТ Р 53512-2009	Продукты сырные. Общие технические условия. Введен 01.01.2011. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200077687
ГОСТ 30363-2013	Продукты яичные жидкие и сухие пищевые. Технические условия. Введен 07.01.2014. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200103770
МР 2.3.1.0253-21	Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации" (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 22 июля 2021 г.). Москва, 2021. 72 с.
ГОСТ 8494-96	Сухари сдобные пшеничные. Технические условия. Введен 08.01.1997. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200019237
ГОСТ 32124-2013	Изделия хлебобулочные бараночные. Общие технические условия. Дата введения 07.01.2014. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200103321
ГОСТ 5667-2022	Изделия хлебобулочные. Правила приемки, методы отбора образцов, методы определения органолептических показателей и массы изделий. Введен 07.01.2023. URL: https://docs.cntd.ru/document/350939603

УДК 552.163

Обоснование возможности сохранения гречневой закваски методом криоконсервирования

Е. Д. Иголина*, А. В. Чернова, О. В. Казимирченко

*Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;

e-mail: elizaveta.igonina@klgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9951-4848>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
28.03.2025;

получена
после доработки
24.04.2025;

принята
к публикации
30.04.2025

Ключевые слова:
мука из зеленой
гречки, закваска,
безглютеновые
изделия,
криоконсервирование,
сроки хранения

Реферат

Высокая биодоступность пищевых веществ (микро- и макронутриентов), улучшенные вкус и аромат выпечки, длительные сроки хранения продукции – преимущества использования заквасочных культур на производстве. В ходе исследования представлено обоснование сроков криоконсервирования закваски на гречневой муке, определены фазы разводочного и производственного цикла разработанной закваски. Рекомендованная температура брожения составляет 27 ± 1 °C, время выдержки 5 ч, подъемная сила 30 мин, кислотность 10 ± 1 град. Состав микрофлоры закваски представлен штаммами бактерий *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus brevis* в сочетании со штаммами дрожжей *Candida milleri* и *Saccharomyces cerevisiae*. Данный микробиоценоз сохранен при переводе рисовой закваски на гречневую муку. Анализ изменения состава микрофлоры и физико-химических показателей закваски в процессе хранения при температуре -18 °C свидетельствует о том, что до конца четвертой недели хранения все показатели находятся в границах нормируемых значений. Начиная с шестой недели снижается количество молочнокислой микрофлоры, наблюдается рост дрожжевых клеток; подъемная сила закваски достигает 40 мин, кислотность уменьшается до 7 град. Таким образом, подвергнутую шоковой заморозке гречневую закваску рекомендуется хранить при температуре -18 °C в течение 4 недель, что подтверждается результатами исследований.

Для цитирования

Иголина Е. Д. и др. Обоснование возможности сохранения гречневой закваски методом криоконсервирования. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 210–218. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-210-218>.

Justification of the possibility of preserving buckwheat starter by cryopreservation method

Elizaveta D. Igonina*, Anastasia V. Chernova, Oksana V. Kazimirchenko

*Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia;

e-mail: elizaveta.igonina@klgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9951-4848>

Article info

Received
28.03.2025;

received
in revised
24.04.2025;

accepted
30.04.2025

Key words:
green buckwheat flour,
starter,
gluten-free products,
cryopreservation,
storage time

Abstract

High bioavailability of nutrients (micro- and macronutrients), improved taste and aroma of baked goods, long shelf life of products are the advantages of using starter cultures in production. The study provides a rationale for the cryopreservation periods for buckwheat flour starter, and defines the phases of the propagation and production cycle of the developed starter. The recommended fermentation temperature is 27 ± 1 °C, holding time is 5 hours, lifting force is 30 minutes, acidity is 10 ± 1 degrees. The composition of the starter microflora is represented by strains of *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus brevis* bacteria in combination with strains of *Candida milleri* and *Saccharomyces cerevisiae* yeast. This microbiocenosis is preserved when transferring rice starter to buckwheat flour. Analysis of changes in the microflora composition and physicochemical parameters of the starter during storage at a temperature of -18 °C indicates that all parameters are within the normalized values by the end of the fourth week of storage. Starting from the sixth week, the amount of lactic acid microflora decreases, yeast cells grow; the lifting power of the starter reaches 40 minutes, the acidity decreases to 7 degrees. Thus, shock-frozen buckwheat starter is recommended to be stored at a temperature of -18 °C for 4 weeks, which is confirmed by the research results.

For citation

Igonina, E. D. et al. 2025. Justification of the possibility of preserving buckwheat starter by cryopreservation method. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 210–218. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-210-218>.

Введение

В России развивается рынок безглютеновых продуктов, мучных и хлебобулочных изделий. Люди, страдающие генетически обусловленными и аллергическими заболеваниями, к которым относится непереносимость глютена, в недостаточной мере обеспечены рациональными продуктами питания (*Капустина, 2020; Попов и др., 2021*). Тренд на здоровое питание обуславливает широкое распространение безглютеновых продуктов не только среди покупателей с непереносимостью глютена, но и среди обычных потребителей, которые следят за своим питанием и здоровьем. Рынок сбыта не ограничен строгими рамками и противопоказаниями (*Заворохина и др., 2016, Орлова и др., 2020*); производство безглютеновых продуктов имеет положительную динамику. Популярностью пользуются изделия на закваске, и поэтому наблюдается рост применения этой технологии при производстве хлебобулочных изделий (*Gobbetti et al., 2019*).

Закваска – полуфабрикат хлебопекарного производства, полученный сбраживанием питательной смеси молочнокислыми бактериями и хлебопекарными дрожжами. Закваска обеспечивает необходимую кислотность тесту, интенсификацию процесса приготовления теста и, как следствие, получение развитой пористости безглютенового хлеба, улучшение его вкуса и запаха, а также обогащает продукт аминокислотами и витаминами (*Бочкарева и др., 2022*). Хлеб на заквасках легче переваривается, чему способствует большая биодоступность пищевых веществ (*Хатко и др., 2020, Якупова и др., 2021*).

Спрос на производство хлеба на закваске в настоящий момент остается недостаточным, поэтому фабрикам-пекарням невыгодно поддерживать закваску в активном бродильном состоянии. Покупка для каждого нового цикла чистых культур микроорганизмов в сухом виде экономически не оправдана; возникает необходимость сохранения закваски методами криоконсервирования (*Герасимова и др., 2019, Ермош и др., 2012*).

Цель работы – научное обоснование сроков и режимов хранения закваски на гречневой муке.

Для реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи исследования:

- описать фазы разводочного и производственного цикла закваски на гречневой муке;
- выявить состав микрофлоры исследуемой закваски;
- определить изменение состава микрофлоры и физико-химических показателей закваски в ходе хранения при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- разработать рекомендации по срокам хранения закваски, гарантирующим сохранение ее бродильной активности.

Материалы и методы

Объектом исследования является безглютеновая закваска из муки зеленой гречки.

Мука из зеленой гречки – продукт переработки зерен гречихи определенной степени зрелости, не подвергнутых термической обработке, благодаря чему сохраняются все полезные свойства гречки. Мука из зеленой гречки ценна белками, пищевыми волокнами, витаминами группы В, РР, цинком, магнием; 100 г муки из зеленой гречки обеспечивают до 15 % суточной потребности человека в этих элементах. Биофлавоноиды, входящие в состав зеленой гречки, способны останавливать биологическое аэробное окисление органических веществ. Анализ отличий, касающихся структурно-механических свойств, свидетельствует о том, что водопоглотительная способность муки из зеленой гречки выше, чем у муки из пропаренного зерна.

Таким образом, использование муки из зеленой гречки в качестве питательной смеси при заквашивании выбрано с учетом низкого содержания глютена, а также ее биологической ценности как источника незаменимых аминокислот, витаминов, макроэлементов.

Для приготовления закваски из муки зеленой гречки использован биоконцентрат смеси штаммов молочнокислых бактерий (*Lactobacillus plantarum*-63, *Lac. brevis*-5, *Lac. brevis*-78) и дрожжей (*Candida milleri*, *Saccharomyces cerevisiae*-69) на рисовой муке и воде, предназначенный для активации рисовой безглютеновой закваски. Биоконцентрат заквасочных микроорганизмов выведен в Научно-исследовательском институте хлебопекарной промышленности.

Определение микробного состава исследуемой гречневой закваски проводили методом предельных серийных разведений в стерильном физиологическом растворе с последующим высевом суспензии на селективные питательные среды: капустный агар – по ГОСТ 10444.1-84¹, плотную среду Бликфельда – по ГОСТ 10444.11-2013². Микробиологические посевы термостатировали при температуре 25 °С в течение 48 ч.

¹ ГОСТ 10444.1-84. Консервы. Приготовление растворов реактивов, красок, индикаторов и питательных сред, применяемых в микробиологическом анализе. Введен 01.07.1985. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200021065>.

² ГОСТ 10444.11-2013. Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета количества мезофильных молочнокислых микроорганизмов. Введен 01.01.2015. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200106915>.

Идентификацию штаммов микроорганизмов, изолированных из закваски, осуществляли с учетом культуральных, морфологических и физиолого-биохимических признаков по ГОСТ 10444.1-84 и ГОСТ 26670-91³.

Микробиологическую безопасность закваски определяли согласно ТР ТС 033/2013⁴.

Кислотность и подъемную силу закваски устанавливали, используя работу (Корякина и др., 2010). Закваску исследовали в процессе хранения в течение 7 недель при –18 °С.

Результаты и обсуждение

Определены фазы разводочного и производственного цикла разработанной закваски, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. Фазы разводочного и производственного цикла гречневой закваски
Table 1. Phases of the breeding and production cycle of buckwheat sourdough

Наименование сырья и показателей процесса	Фазы разводочного цикла					Фазы производственного цикла
	1	2	3	4	5	1
Смесь штаммов молочнокислых бактерий <i>L. plantarum</i> -63, <i>L. brevis</i> -5, <i>L. brevis</i> -78, мл	20	–	–	–	–	–
Штаммы дрожжей <i>Candida milleri</i> и <i>S. cerevisiae</i> -69 на солодовом сусле, мл	10	–	–	–	–	–
Закваска предыдущей фазы, г	–	50	50	50	50	50
Рисовая мука, г	130	100	100	–	–	–
Мука из зеленой гречки, г	–	–	–	100	100	100
Вода, г	140	100	100	100	100	100
Температура, °С	28	28	28	28	28	28
Кислотность, град	9	9	10	11	11	11
Подъемная сила, мин	35	30	30	25	25	25
Продолжительность брожения, ч	10	5	5	5	5	5

Исходное количество (доля) каждого штамма микроорганизма не определялось; при приготовлении закваски был внесен консорциум заквасочных микроорганизмов с неизвестным соотношением видов.

В первой фазе закваску выдерживали до кислотности 9 град и подъемной силы 35 мин согласно инструкции по выведению рисовой закваски.

При изготовлении закваски второй фазы к выброженной закваске первой фазы (16,6 % от закваски первой фазы) добавляли питательную смесь, приготовленную из рисовой муки и воды (соотношение закваски, муки и воды 1 : 2 : 2), далее закваску выдерживали до конечной кислотности 9 град и подъемной силы 30 мин.

Для получения закваски третьей фазы разводочного цикла закваску второй фазы (20 % от закваски второй фазы) смешивали с питательной смесью из рисовой муки и воды (соотношение закваски, муки и воды 1 : 2 : 2) и выдерживали до конечной кислотности 10 град и подъемной силы 30 мин.

Закваску четвертой фазы (20 % от закваски третьей фазы) готовили при освежении питательной смесью из муки из зеленой гречки и воды (соотношение закваски, муки и воды 1 : 2 : 2) с последующим брожением до кислотности 11 град и подъемной силы 25 мин.

Для получения закваски последней пятой фазы смешивали закваску четвертой фазы (20 % от закваски четвертой фазы), муку из зеленой гречки и воду в соотношении 1 : 2 : 2, выдерживали до конечной кислотности 11 град, подъемной силы 25–30 мин.

К началу производственной фазы общая масса закваски после 5 фаз разводочного цикла составила 250 г. К 20 % закваски (50 г) добавили 40 % (100 г) муки из зеленой гречки и 40 % (100 мл) воды. Получившуюся закваску в количестве 250 г поместили на хранение при температуре 1–5 °С с последующим освежением раз в три дня. Температура выдерживания закваски составляла на всем периоде 28 °С, что является оптимальным значением как для молочнокислых бактерий, так и для дрожжевых клеток (Жаркова и др., 2023).

Опыты показали, что при данном соотношении компонентов подъемная сила не превышает 30 мин, а кислотность – 11 град. Органолептические показатели гречневой закваски представлены в табл. 2.

³ ГОСТ 26670-91. Продукты пищевые. Методы культивирования микроорганизмов. Введен 01.01.2015. URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200106915>.

⁴ ТР ТС 033/2013. О безопасности молока и молочной продукции. Введен 09.10. 2013. URL : <https://docs.cntd.ru/document/499050562>.

Таблица 2. Органолептические показатели качества закваски из гречневой муки
Table 2. Organoleptic quality indicators of buckwheat flour sourdough

Характеристика	Описание
Консистенция	Пористая, густая, вязкая, однородная
Запах	Свойственный гречке; с приятной молочной кислинкой
Вкус	Кислый; с оттенком, свойственным муке из гречки
Цвет	Светло-коричневый с серым оттенком

Следующим этапом исследований гречневой закваски являлось установление видового состава микрофлоры. В данной закваске выделены следующие микроорганизмы:

1) *Lactobacillus plantarum* – вид грамположительных анаэробных неспорообразующих молочнокислых бактерий (рис. 1, б). На селективных средах колонии были круглыми и выпуклыми, белого и кремового цвета, блестящими, среднего и большого размера. При осмотре под микроскопом бактерии представляли собой прямые стержни с закругленными концами шириной 0,9–1,2 мкм и длиной 3–8 мкм. Клетки этих молочнокислых бактерий встречались поодиночке, парами или короткими цепочками (Дудикова и др., 2016);

2) *Lactobacillus brevis* – род грамположительных анаэробных неспорообразующих молочнокислых бактерий (рис. 1, а). На селективных средах колонии были круглыми и палочковидными, преимущественно кремового цвета, иногда желтоватыми, среднего и маленького размера. При осмотре под микроскопом бактерии представляли собой палочки небольшого размера шириной 0,5–1,0 мкм и длиной 1,5–5 мкм. Клетки чаще всего располагались поодиночке или парами (Умиралиева и др., 2023);

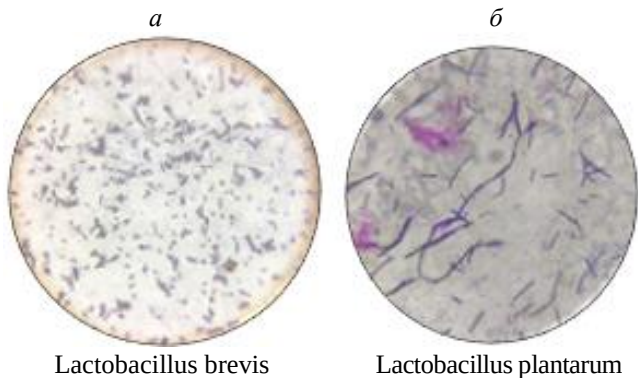


Рис. 1. Микробиоценоз закваски (*Lactobacillus brevis* и *Lactobacillus plantarum*) (Умиралиева и др., 2023)
Fig. 1. Microbiocenosis of starter (*Lactobacillus brevis* and *Lactobacillus plantarum*)

3) *Candida milleri* – одни из наиболее распространенных видов дрожжей в экосистемах заквасок (рис. 2, б); на селективных средах представляют собой шарообразные колонии бежевого цвета, чаще среднего размера. При микроскопировании обнаружены слегка овальные клетки шириной 5–6 мкм и длиной 4–6 мкм, располагавшиеся как поодиночке, так и в цепочках (*Меледина и др., 2018*);

4) *Saccharomyces cerevisiae* – вид одноклеточных микроскопических грибов из класса сахаромикетов (рис. 2, а). На селективных средах представляют собой немного вытянутые колонии белого и кремового цветов (поодиночке и в цепочках). При микроскопии наблюдали клетки овальной или круглой формы размером 5–10 мкм в диаметре (*Lahue et al.*, 2020).

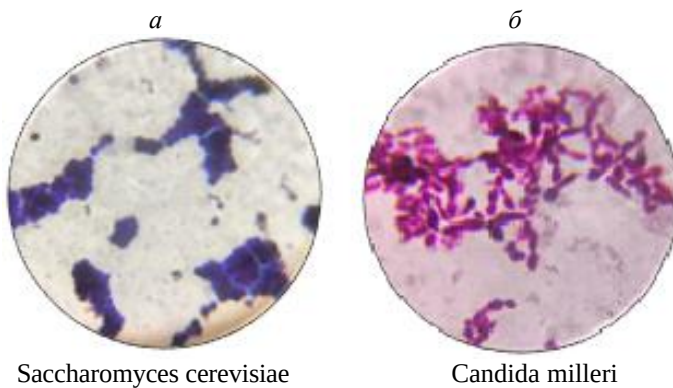


Рис. 2. Микробиоценоз закваски (*Saccharomyces cerevisiae* и *Candida milleri*) (*Lahue et al., 2020*)
Fig. 2. Microbiocenosis of starter (*Saccharomyces cerevisiae* and *Candida milleri*)

Выделенные микроорганизмы соответствовали видам молочнокислых бактерий и дрожжевых грибов, характерным для состава рисовой закваски. Таким образом, при переводе рисовой закваски на гречневую муку была сохранена основная микрофлора, благодаря чему закваска не утратила своих свойств.

Вследствие того что исходное соотношение видов вносимых заквасочных микроорганизмов не было известно, при микробиологических исследованиях анализируемой гречневой закваски устанавливали доли каждого вида микробов (табл. 3).

Таблица 3. Количественное соотношение выделенных групп микроорганизмов гречневой закваски

Table 3. Quantitative ratio of isolated groups of microorganisms of buckwheat starter culture

Наименование микроорганизмов	Количественное соотношение микроорганизмов, %
<i>L. plantarum</i>	35
<i>L. brevis</i>	45
<i>Candida milleri</i>	10
<i>S. cerevisiae</i>	10

Из табл. 3 видно, что количественное соотношение молочнокислых бактерий и дрожжевых грибов в закваске составляет примерно 4:1. Данное соотношение является благоприятным симбиозом для закваски, так как происходит активный обмен питательными веществами (Локачук и др., 2019). Обычно молочнокислые бактерии имеют более высокую скорость роста по сравнению с дрожжами, что заметно по мере развития микрофлоры закваски, при этом известна способность дрожжей образовывать значительную часть CO_2 в процессе развития закваски, несмотря на то они были использованы в меньшем количестве (Galli et al., 2020).

Исследуемый образец закваски был подвергнут шоковой заморозке при -18°C для установления сроков хранения. В процессе хранения закваски отслеживалось изменение состава микрофлоры и физико-химических показателей.

Изначально установленное соотношение молочнокислых бактерий и дрожжевых грибов сохранялось на протяжении первых 4 недель. Начиная с 6-й недели происходит резкое снижение молочнокислых бактерий (рис. 3), в частности *Lactobacillus brevis*, что, вероятно, указывает об их уязвимости к воздействию низких температур в течение длительного времени. Следовательно, со снижением молочнокислой микрофлоры происходит перевес в сторону дрожжевых грибов, так как не возникает активного подавления дрожжевой микрофлоры со стороны молочнокислых бактерий.

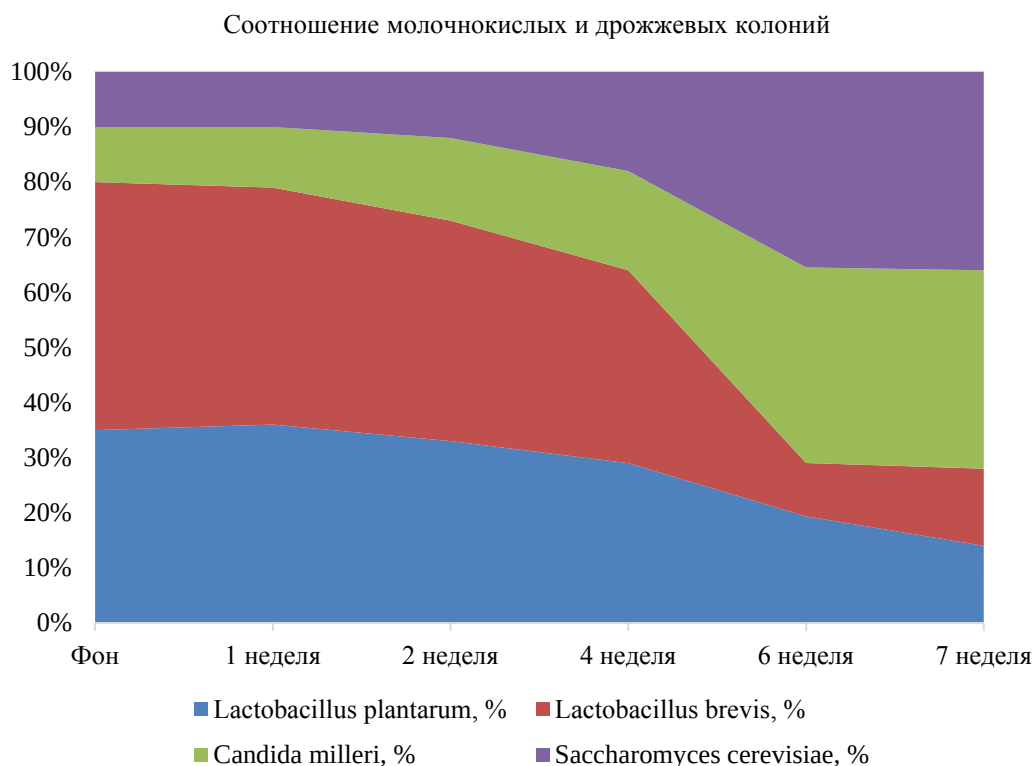


Рис. 3. Изменение количественного соотношения молочнокислых бактерий и дрожжей

Fig. 3. Changes in the quantitative ratio of lactic acid bacteria and yeast

Число характерных колоний, обнаруживаемых на чашках Петри, становится меньше к 6-й неделе (рис. 4 и 5), что свидетельствует о снижении количества бактерий ввиду постепенного снижения их активности и возможного расщепления питательных веществ, входящих в состав сред, т. е. количество сухого вещества становится недостаточным для активного размножения бактерий.

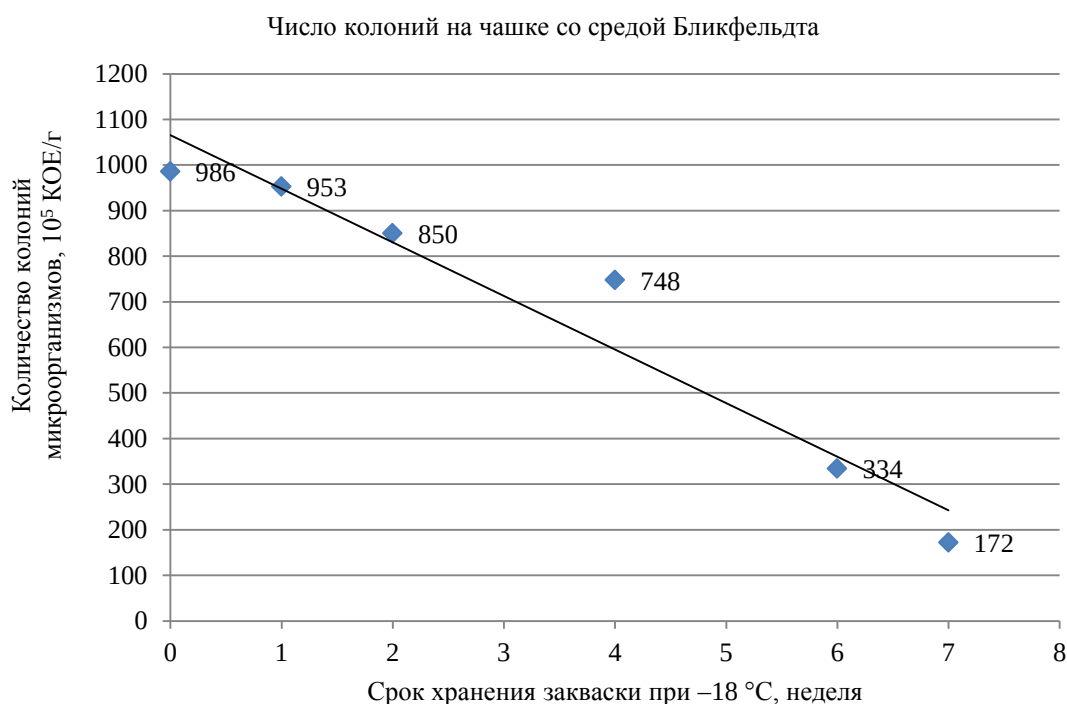


Рис. 4. Изменение количества микроорганизмов на среде Бликфельда в процессе хранения
Fig. 4. Changes in the number of microorganisms on the Blickfeldt medium during storage

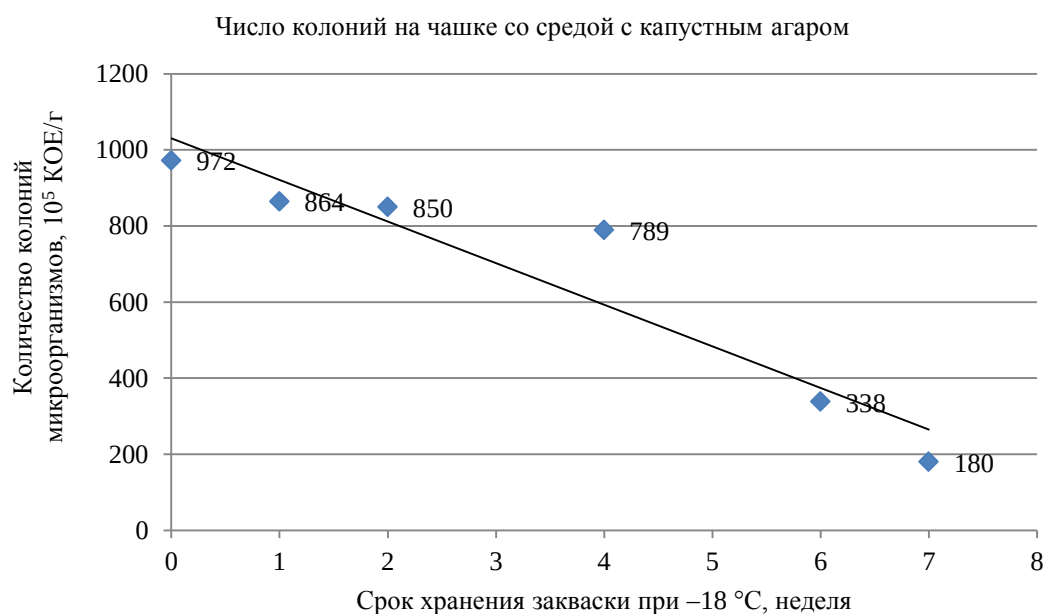


Рис. 5. Изменение количества микроорганизмов на капустном агаре в процессе хранения
Fig. 5. Changes in the number of microorganisms on cabbage agar during storage

Результаты оценки микробиологической безопасности гречневой закваски на фоновой точке и на 7-й неделе представлены в табл. 4. Патогенных и условно-патогенных микроорганизмов на протяжении всего срока хранения обнаружено не было; показатель КМАФАнМ не превышал нормируемых значений.

Таблица 4. Результаты оценки микробиологической безопасности гречневой закваски
Table 4. The results of the assessment of the microbiological safety of buckwheat starter culture

Наименование показателя	Допустимый уровень	Фон	7-я неделя
КМАФАнМ, КОЕ/г	$1 \cdot 10^8$	$0,7 \cdot 10^8$	$0,9 \cdot 10^8$
БГКП (колиформы)	Не допускаются в массе продукта 10 г	Не обнаружено	Не обнаружено
Патогенные, в том числе сальмонеллы	Не допускаются в массе продукта 100 г	Не обнаружено	Не обнаружено
Стафилококки <i>S. aureus</i>	Не допускаются в массе продукта 10 г	Не обнаружено	Не обнаружено
Дрожжи, плесени, КОЕ/г	5 в сумме	Менее 5	Менее 5

Микробиологические исследования подтверждаются результатами анализа кислотности и подъемной силы закваски, представленными в табл. 5 (Корякина и др., 2010). До конца месяца кислотность находилась в пределах 9–11 град, а подъемная сила – 25–30 мин, что является установленными качественными показателями исследуемой закваски. Начиная с 6-й недели кислотность закваски постепенно снижается, так как молочнокислых бактерий, вырабатывающих молочную и уксусную кислоты, становится меньше. Несмотря на то что дрожжей становится пропорционально больше, их активности недостаточно для поддержания подъемной силы закваски на необходимом уровне. Поэтому наблюдается изменение подъемной силы с 25 до 40 мин к 6-й неделе хранения.

Таблица 5. Физико-химические исследования гречневой закваски в процессе хранения при -18°C
Table 5. Physical and chemical studies of buckwheat starter culture during storage at minus 18°C

Характеристика	Фон	1-я неделя	2-я неделя	4-я неделя	6-я неделя	7-я неделя
Кислотность, град	$11,0 \pm 0,5$	$10,5 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,5$	$9,0 \pm 0,5$	$7,5 \pm 0,5$	$7,0 \pm 0,5$
Подъемная сила, мин	25 ± 1	25 ± 1	27 ± 1	30 ± 1	40 ± 1	42 ± 1

Заключение

В результате исследований разработаны фазы разводочного и производственного цикла гречневой закваски. Рекомендуемая температура ведения закваски составляет $28 \pm 0,5^\circ\text{C}$, время брожения закваски 5 ч, кислотность $11 \pm 0,5$ град, подъемная сила 25 ± 1 мин. Закваска пористая, однородная, с гречневым вкусом, имеет светло-коричневый оттенок.

При переводе рисовой закваски на гречневую муку сохранен видовой состав микрофлоры, включающий штаммы бактерий *L. plantarum*, *L. brevis*, *Candida milleri* и *S. cerevisiae*. Соотношение молочнокислых бактерий и дрожжей составляет 4 : 1.

В течение хранения гречневой закваски при -18°C наблюдается изменение микробиоценоза; на протяжении 4 недель колебания незначительные, соотношение молочнокислых бактерий и дрожжей сохраняется в пределах допустимого, кислотность и подъемная сила закваски также не превышают допустимых значений.

Начиная с 6-й недели соотношение молочнокислых бактерий и дрожжей изменяется в сторону дрожжевых клеток (1 : 2,5), что свидетельствует о снижении активности подавляющей способности молочнокислых бактерий, увеличении подъемной силы закваски и уменьшении ее кислотности.

Таким образом, подвергнутый шоковой заморозке образец гречневой закваски рекомендуется хранить при температуре -18°C в течение 4 недель, что подтверждается результатами исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Бочкарева З. А., Пчелинцева О. Н., Белякова К. Н., Сагандыкова С. К. Сравнительная оценка показателей ржаного хлеба на заквасках спонтанного брожения // Ползуновский вестник. 2022. № 1. С. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.003>. EDN: FDAXBJ.
- Герасимова Э. О., Лабутина Н. В. Криогенные технологии в хлебопечении // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2019. № 1(367). С. 6–9. DOI: <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2019.1.1>. EDN: YZILKH.
- Дудикова Г. Н., Чижаева А. В. Консорциум молочнокислых бактерий и дрожжей для ржаной закваски с повышенными антагонистическими свойствами // Техника и технология пищевых производств. 2016. № 2(41). С. 34–39. EDN: WCLBNZ.
- Ермош Л. Г., Березовикова И. П. Технология хлебобулочных изделий из замороженных полуфабрикатов с использованием муки из топинамбура // Техника и технология пищевых производств. 2012. № 4(27). С. 11–17. EDN: PILQBX.

- Жаркова И. М., Росляков Ю. Ф., Иванчиков Д. С. Закваски спонтанного (естественного) брожения: особенности технологии и роль в современном хлебопекарном производстве // *Техника и технология пищевых производств*. 2023. Т. 53, № 3. С. 525–544. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2455>. EDN: LQEJER.
- Заворохина Н. В., Чугунова О. В. Проблема целиакии в Российской Федерации и моделирование рецептур безглютеновых видов хлеба // *Потребительская кооперация*. 2016. № 1(52). С. 47–53.
- Капустина К. Ф. Разработка технологии безглютеновых хлебобулочных изделий с использованием пищевкусовой добавки из мяты перечной // *Молодой ученый*. 2020. № 24(314). С. 99–105. EDN: DSSCDW.
- Корячкина С. Я., Березина Н. А., Хмелева Е. В. Методы исследования качества хлебобулочных изделий. Орел : ОрелГТУ, 2010. 166 с.
- Локачук М. Н., Павловская Е. Н., Савкина О. А., Хлесткин В. К. Исследование микрофлоры спонтанных заквасок для хлебопекарного производства из географически отдаленных мест северо-западного региона России // *Хлебопечение России*. 2019. № 3. С. 32–35. EDN: XZNHRH.
- Меледина Т. В., Давыденко С. Г., Головинская О. В., Шестопалова И. А. [и др.]. Использование нового штамма дрожжей в хлебопечении // *Техника и технология пищевых производств*. 2018. Т. 48, № 4. С. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-59-65>.
- Орлова Т. В., Кудинов П. И. Разработка рецептуры и технологии производства хлеба на основе безглютеновых мучных смесей // *Ползуновский вестник*. 2020. № 2. С. 50–57. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.010. EDN: PRESHG.
- Попов В. Г., Хайруллина Н. Г., Садыкова Х. Н. Тенденции использования безглютеновых видов муки в производстве продукции функционального назначения // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2021. Т. 83, № 1(87). С. 121–128. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-121-128>. EDN: AWOYEE.
- Умиралиева Л. Б., Абуова А. Б., Кандроков Р. Х., Исабекова М. С. [и др.]. Технология производства хлебобулочных изделий из муки тритикале с использованием закваски на основе молочнокислых бактерий // *Микробиология және вирусология*. 2023. № 2(41). С. 192–207. DOI: <https://doi.org/10.53729/MV-AS.2023.02.13>. EDN: ZBJDYG.
- Хатко З. Н., Наумова Е. В. Влияние пектиновых веществ на активацию заквасок для ржано-пшеничного мини-хлеба // *Новые технологии*. 2020. № 1. С. 75–86. DOI: 10.24411/2072-0920-2020-10108. EDN: QFLCDI.
- Якупова И. И., Кощина Е. И., Гареева И. Т. Разработка рецептуры хлебцев на закваске спонтанного брожения // *Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции : II Междунар. науч.-практ. конф., г. Саратов, 24–25 марта 2021 г.* ; [междунар. науч.-практ. конф. в рамках Междунар. науч.-практ. форума, посвященного Дню хлеба и соли] : сборник статей / под общей ред. О. М. Поповой, Н. В. Неповинных, В. А. Буховец. Саратов : Центр социальных агроинноваций СГАУ, 2021. С. 480–486. EDN: RKNUFY.
- Galli V., Venturi M., Guerrini S., Blandino M. [et al.]. Antioxidant properties of sourdoughs made with whole grain flours of hull-less barley or conventional and pigmented wheat and by selected lactobacilli strains // *Foods*. 2020. Vol. 9, Iss. 5. Article number: 640. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9050640>.
- Gobbetti M., De Angelis M., Di Cagno R., Calasso M. [et al.]. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation // *International Journal of Food Microbiology*. 2019. Vol. 302. P. 103–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018>.
- Lahue C., Madden A. A., Dunn R. R., Smukowski H. C. History and domestication of *Saccharomyces cerevisiae* in bread baking // *Frontiers in Genetics*. 2020. Vol. 11. Article number: 584718. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.584718>.

References

- Bochkareva, Z. A., Pchelintseva, O. N., Belyakova, K. N., Sagandykova, S. K. 2022. Comparative assessment of the performance of rye bread with spontaneous fermentation sourdough. *Polzunovskiy vestnik*, 1, pp. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.003>. EDN: FDAXBJ. (In Russ.)
- Gerasimova, E. O., Labutina, N. V. 2019. Cryogenic technologies in bakery. *News of Universities. Food Technology*, 1(367), pp. 6–9. DOI: <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2019.1.1>. EDN: YZILKH. (In Russ.)
- Dudikova, G. N., Chizhaeva, A. V. 2016. Consortium of lactic acid bacteria and yeast for rye sourdough with increased antagonistic properties. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2(41), pp. 34–39. EDN: WCLBNZ. (In Russ.)
- Ermosh, L. G., Berezovikova, I. P. 2012. Technology of bakery products from frozen semi-finished products using Jerusalem artichoke flour. *Food Processing: Techniques and Technology*, 4(27), pp. 11–17. EDN: PILQBX. (In Russ.)
- Zharkova, I. M., Roslyakov, Yu. F., Ivanchikov, D. S. 2023. Starters of spontaneous (natural) fermentation: Features of technology and role in modern bakery production. *Food Processing: Techniques and Technology*, 53(3), pp. 525–544. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2455>. EDN: LQEJER. (In Russ.)
- Zavorokhina, N. V., Chugunova, O. V. 2016. The problem of celiac disease in the Russian Federation and modeling of recipes for gluten-free types of bread. *Potrebitel'skaya Kooperatsiya*, 1(52), pp. 47–53. (In Russ.)

- Kapustina, K. F. 2020. Development of technology for gluten-free bakery products using a food additive from peppermint. *Molodoi Uchonyy*, 24(314), pp. 99–105. EDN: DSSCDW. (In Russ.)
- Koryachkina, S. Ya., Berezina, N. A., Khmeleva, E. V. 2010. Methods of studying the quality of bakery products. *Oryol*. (In Russ.)
- Lokachuk, M. N., Pavlovskaya, E. N., Savkina, O. A., Khlestkin, V. K. 2019. Study of microflora of spontaneous sourdoughs for bakery production from geographically remote places of the northwestern region of Russia. *Bakery of Russia*, 3, pp. 32–35. EDN: XZNHRH. (In Russ.)
- Meledina, T. V., Davydenko, S. G., Golovinskaia, O. V., Shestopalova, I. A. et al. 2018. New yeast strain in baking industry. *Food Processing: Techniques and Technology*, 48(4), pp. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-59-65>. (In Russ.)
- Orlova, T. V., Kudinov, P. I. 2020. Development of a recipe and technology for the production of bread based on gluten-free flour mixtures. *Polzunovskiy Vestnik*, 2, pp. 50–57. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.010. EDN: PRESHG. (In Russ.)
- Popov, V. G., Khairullina, N. G., Sadykova, H. N. 2021. Trends in the use of gluten-free types of flour in the production of functional products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 83(1(87)), pp. 121–128. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-121-128>. EDN: AWOYEE. (In Russ.)
- Umiralieva, L., Abuova, A., Kandrokov, R., Isabekova, M. et al. 2023. Technology of production of bakery products from triticale flour using sourdough based on lactic acid bacteria. *Microbiology and Virology*, 2(41), pp. 192–207. DOI: <https://doi.org/10.53729/MV-AS.2023.02.13>. EDN: ZBJIDG. (In Russ.)
- Khatko, Z. N., Naumova, E. V. 2020. The influence of pectin substances on the activation of starter cultures for rye-wheat mini-bread. *New Technologies*, 1, pp. 75–86. DOI: 10.24411/2072-0920-2020-10108. EDN: QFLCDI. (In Russ.)
- Yakubova, I. I., Koshchina, E. I., Gareeva, I. T. 2021. Development of a recipe for bread with spontaneous fermentation sourdough. Coll. of articles *Food technologies of the future: Innovations in the production and processing of agricultural products*, Saratov, pp. 480–486. EDN: RKNIFY. (In Russ.)
- Galli, V., Venturi, M., Guerrini, S., Blandino, M. et al. 2020. Antioxidant properties of sourdoughs made with whole grain flours of hull-less barley or conventional and pigmented wheat and by selected lactobacilli strains. *Foods*, 9(5). Article number: 640. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9050640>.
- Gobbetti, M., De Angelis, M., Di Cagno, R., Calasso, M. et al. 2019. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 302, pp. 103–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018>.
- Lahue, C., Madden, A. A., Dunn, R. R., Smukowski, H. C. 2020. History and domestication of *Saccharomyces cerevisiae* in bread baking. *Frontiers in Genetics*, 11. Article number: 584718. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.584718>.

Сведения об авторах

Иголина Елизавета Дмитриевна – пр. Советский, 1, г. Калининград, Россия, 236022;
Калининградский государственный технический университет, аспирант;
e-mail: elizaveta.igonina@klgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9951-4848>

Elizaveta D. Igonina – 1 Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022;
Kaliningrad State Technical University, PhD Student;
e-mail: elizaveta.igonina@klgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9951-4848>

Чернова Анастасия Валерьевна – пр. Советский, 1, г. Калининград, Россия, 236022;
Калининградский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: anastasia.chernova@klgtu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0530-9616>

Anastasia V. Chernova – 1 Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022;
Kaliningrad State Technical University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: anastasia.chernova@klgtu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0530-9616>

Казимирченко Оксана Владимировна – пр. Советский, 1, г. Калининград, Россия, 236022;
Калининградский государственный технический университет, канд. биол. наук, доцент;
e-mail: oksana.kazimirchenko@klgtu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-7197-0287>

Oksana V. Kazimirchenko – 1 Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022;
Kaliningrad State Technical University, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor;
e-mail: oksana.kazimirchenko@klgtu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-7197-0287>

УДК 663.41

Оценка возможности использования отечественного вкусоароматического сырья в производстве пивных напитков

Д. В. Карпенко*, М. Б. Мойсейак, М. С. Лялина,
М. К. Панеш, М. Аннакулиева, А. С. Воропаева

*Российский биотехнологический университет, г. Москва, Россия;
e-mail: karpenkov@mgupp.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7885-1150>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
27.03.2025;

получена
после доработки
14.04.2025;

принята
к публикации
21.04.2025

Ключевые слова:
вкусоароматическое
сырье, пивные напитки,
способ затирания,
ферментативная
обработка малины,
органолептическая
оценка пивного напитка

Реферат

В технологии пивных напитков возможно применение вкусоароматического сырья, вносимого перед началом главного брожения. В ходе исследования показана целесообразность приготовления сусла для получения пивных напитков с кофейным концентратом "Эфиопия Сидамо" или малиновым соком с заменой 40 % светлого ячменного пивоваренного солода несоложенным ячменем, предварительным затиранием ячменя и применением ферментного препарата "Церемикс Плюс МГ". Реализация такого способа обеспечивает приемлемые характеристики пивного сусла. Применение ферментного препарата Pectinex Yieldmash Plus в дозировке 120 см³/т ягод и продолжительность обработки 60 мин способствуют интенсификации экстракции целевых компонентов из ягод малины: объем сока увеличился на 21,5 %, концентрация редуцирующих веществ – на 65, сухих веществ – на 4, интенсивность окраски – на 14, выход сухих веществ – на 26 %. Экспериментально установлено содержание этилового спирта и действительного экстракта в образцах сброженных нефилтрованных пивных напитков: без добавления вкусоароматических ингредиентов – 4,95 и 3,85 мас.%, с малиновым соком – 5,32 и 3,84, кофейным экстрактом – 3,54 и 4,89 мас.%. Согласно органолептической оценке опытные образцы обладали интенсивным цветом, свойственным использованному сырью; кофейный экстракт обеспечил аромат кофе, однако вкус напитка, так же как вкус и аромат пивного напитка с малиновым соком, были маловыраженными. В ходе дальнейших исследований необходимо определить рациональный момент введения вкусоароматических компонентов в технологический процесс: до начала главного брожения или по окончании дображивания и созревания.

Для цитирования

Карпенко Д. В. и др. Оценка возможности использования отечественного вкусоароматического сырья в производстве пивных напитков. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 219–230. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-219-230>.

Evaluation of the possibility of using domestic flavoring and aromatic compounds in the production of beer drinks

*Dmitry V. Karpenko, Marina B. Moiseyak, Marina S. Lyalina,
Murat K. Panesh, Menli Annagulyyeva, Arina S. Voropaeva

*Russian Biotechnological University, Moscow, Russia;
e-mail: karpenkov@mgupp.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7885-1150>

Article info

Received
27.03.2025;

received
in revised
14.04.2025;

accepted
21.04.2025

Key words:
flavoring raw materials,
beer drinks,
mashing method,
enzymatic processing
of raspberries,
organoleptic evaluation
of beer drink

Abstract

In the technology of beer drinks it is possible to use flavoring raw materials introduced before the start of the main fermentation. The study has shown the feasibility of preparing wort for obtaining beer drinks with the coffee concentrate "Ethiopia Sidamo" or raspberry juice with the replacement of 40 % of light barley brewing malt with unmalted barley, preliminary mashing of barley and the use of the enzyme preparation "Ceremix Plus MG". The implementation of this method provides acceptable characteristics of beer wort. The use of the enzyme preparation Pectinex Yieldmash Plus in a dosage of 120 cm³/t of berries and processing time of 60 minutes contribute to the intensification of the extraction of target components from raspberries: the volume of juice increased by 21.5 %, the concentration of reducing substances – by 65, dry substances – by 4, color intensity – by 14, the yield of dry substances – by 26 %. The content of ethyl alcohol and actual extract in the samples of fermented unfiltered beer drinks has been experimentally established: without the addition of flavoring ingredients – 4.95 and 3.85 wt.%, with raspberry juice – 5.32 and 3.84, coffee extract – 3.54 and 4.89 wt.%. According to the organoleptic assessment, the experimental samples have had an intense color characteristic of the raw materials used; the coffee extract has provided the aroma of coffee, but the taste of the drink as well as the taste and aroma of the beer drink with raspberry juice, have been poorly expressed. In the course of further research, it is necessary to determine the rational moment for introducing flavoring components into the technological process: before the start of the main fermentation or after the end of secondary fermentation and maturation.

For citation

Karpenko, D. V. et al. 2025. Evaluation of the possibility of using domestic flavoring and aromatic compounds in the production of beer drinks. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 219–230. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-219-230>.

Введение

На современном этапе пивоваренные предприятия заинтересованы в расширении ассортимента продукции без существенных изменений технологии и совершенствования производственного оборудования. Одним из применяемых на практике в Российской Федерации¹ подходов является выпуск пивных напитков (Bamforth, 2014; Fermented Foods..., 2010).

В соответствии с действующей в России нормативной документацией² в дополнение к ресурсам, разрешенным для производства пива, в качестве сырья для выработки пивных напитков рекомендуются разнообразные компоненты (пищевые добавки и ароматизаторы), позволяющие придавать готовым напиткам оригинальные оттенки вкуса и аромата. При производстве пивных напитков часто применяются ароматизаторы, идентичные натуральным, что вызывает у значительной части потребителей негативное и настороженное отношение. Вследствие этого целесообразно рассмотреть возможность использования натурального (включая плодвое) сырья для формирования желаемых сортовых органолептических характеристик, удовлетворяющих спрос широкого круга потребителей, и учитывать технологические и экономические аспекты производства.

На протяжении ряда лет в Российском биотехнологическом университете (РОСБИОТЕХ) проводятся исследования по обсуждаемой проблематике. В частности, разработан способ получения пивного напитка с соком мангустина и проведено определение его потребительских характеристик (Гордюшин и др., 2022). При положительной в целом оценке выявлено, что напиток обладает излишне сладким вкусом, который нетипичен для большинства разновидностей пивоваренной продукции, а также имеет выраженную опалесценцию, что негативно воспринимается рядом потребителей. Мангустин не культивируется в России, и его импорт даже из дружественных стран неизбежно увеличивает себестоимость готового пивного напитка. Добавление сахаристого фруктового сока снижает микробиологическую стойкость напитка, сокращая срок его хранения.

В силу изложенного было решено апробировать в технологии пивных напитков другие виды пряно-ароматического сырья: кофейные концентраты (экстракты) "Эфиопия Сидамо" и "Бразилия Госто До", производимые в России, и сок из ягод свежей малины. Малина произрастает (Берзегова, 2008) и интенсивно культивируется в южных регионах нашей страны, в том числе в Республике Адыгея³ (Берзегова, 2009).

На первом этапе проведен предварительный анализ пригодности указанных видов сырья для производства пивных напитков, включающий: 1) подготовку купажей коммерческого пива ("Жигули-1968") и разных объемов экстракта или свежесжатого малинового сока; 2) органолептическую оценку с использованием ряда предложенных нами дескрипторов. В ходе анализа сделан вывод, что наилучшие результаты обеспечило применение малинового сока в количестве 12–15 см³ на 100 см³ пива и экстракта "Эфиопия Сидамо" в количестве 15 см³ на 100 см³ пива.

На втором этапе решаются задачи определения:

– рациональных состава зернового сырья и режимов получения сусла для сбраживания в технологии пивного напитка;

– способа повышения выхода сока из малины;

– момента внесения вкусоароматических ингредиентов (до начала главного брожения или по окончании дображивания и созревания), что существенно влияет как на технологические параметры, так и на потребительские характеристики готового напитка (Гернет и др., 2019).

Проблема определения состава сырья решается с использованием ранее полученных экспериментальных данных (Карпенко и др., 2022), в соответствии с которыми сусло с приемлемой питательной ценностью (сбраживаемостью) может быть получено при переработке засыпи из 60 % светлого пивоваренного ячменного солода и 40 % несоложенного ячменя по способу с предварительным затирированием. Используемые режимы стадии приготовления затора приведены в разделе "Материалы и методы".

Разработка способа повышения выхода сока базируется на применении ферментных препаратов (ФП), которые показали высокую эффективность, по мнению многих исследователей, применявших различное плодвое сырье (Алексеев, 2008; Алексеев и др., 2011; 2015; 2023; Гугучкина и др., 2011; Еремеева и др., 2018; Каримова и др., 2023; Рыжова и др., 2006; Sharma et al., 2017).

На обсуждаемом этапе исследований установлена целесообразность внесения вкусоароматического сырья до начала главного брожения, хотя в дальнейшем необходимо будет рассмотреть и альтернативные варианты.

¹ Балтика. Наши бренды. URL: <https://corporate.baltika.ru/nashi-brendy/brands/?p=3>.

² ГОСТ 34796-2021. Напитки пивные. Общие технические условия. М. : Российский институт стандартизации, 2022. 12 с.

³ Малина. Республика Адыгея. Лучшие и районированные сорта. URL: <https://rastisad.ru/regivar/305/66>.

Материалы и методы

Сусло получали по разработанной ранее (Карпенко и др., 2022) схеме с предварительным затиранием (рис. 1) из смеси 60 % светлого пивоваренного ячменного солода и 40 % несоложенного ячменя. В предварительный затор вносили комплексный ферментный препарат "Церемикс Плюс МГ", содержащий активные термостабильную альфа-амилазу, бета-глюканазу, нейтральную протеазу, пентозаназу, ксиланазу и целлюлазу⁴, в дозировке 1 кг/т зерна.

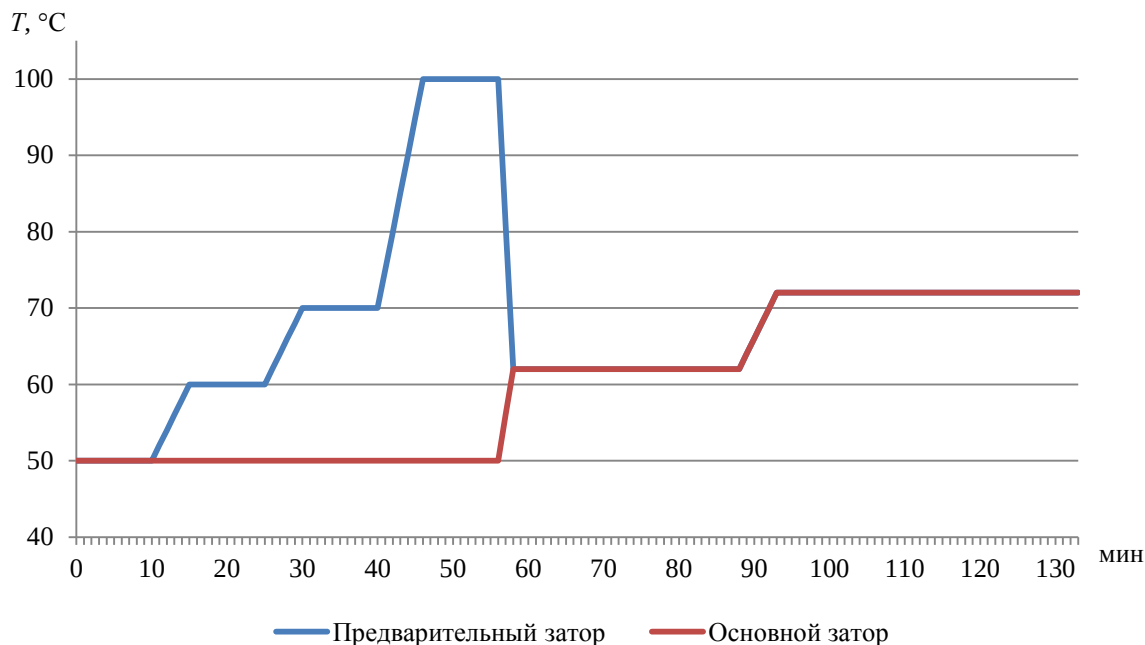


Рис. 1. Температурная схема получения сусла с предварительным затиранием (Карпенко и др., 2022)
Fig. 1. Temperature scheme for obtaining wort with preliminary mashing (Karpenko et al., 2022)

Гидромуль равнялся 1:4. Предварительный затор формировали из всего перерабатываемого несоложенного ячменя, без ячменного солода, с добавлением ферментного препарата.

В качестве варианта сравнения использовали затор для получения светлого пива, состоявший из 100 % дробленого светлого ячменного солода. Затирание вели по настольному способу с тремя паузами продолжительностью 30 мин каждая при 50–52, 60–63 и 70–72 °C; общая продолжительность затирания в данном варианте ставила 110 мин.

В неохмеленном сусле определяли содержание сухих веществ (СВ) рефрактометрическим методом, аминного азота – по числу карбоксильных групп в водно-спиртовом растворе (Химико-технологический контроль..., 1976) и редуцирующих веществ (РВ) – по методу с использованием динитросалициловой кислоты (ДНСК) (Чернявская и др., 2019).

Фильтрацию первого сусла и промывных вод (объемом 30 % от объема налива) вели через слой пивной дробины до получения визуально прозрачного фильтрата; температура промывной воды при ее добавлении к пивной дробине равнялась 80 °C.

Охмеление сусла осуществляли в течение 90 мин, молотый гранулированный хмель (18 г/дал) вносили в два приема: 80 % – через 15 мин после начала кипячения; 20 % – за 15 мин до конца кипячения.

Охлажденное осветленное сусло засеивали регидратированными пивными дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* (торговая марка Fermentis Saflager S-189⁵, Бельгия) в дозировке 100 г/Гл.

Главное брожение вели в течение 5 сут при температуре 15–17 °C, дображивание – в течение 60 сут при температуре 5–7 °C.

В образцах нефiltrованных пивных напитков определяли содержание этилового спирта и действительного экстракта (ДЭ) дистилляционным способом⁶.

⁴ Пищепромпродукт. Высотехнологичные пищевые добавки "Церемикс Плюс МГ" (Ceremix Plus MG). URL: https://beerbakeprod.ru/catalog/dlya_piva_i_napitkov/fermenty/kompleksnye/695/?oid=1262.

⁵ Fermentis by Lesaffre Saflager™ S-189. URL: <https://fermentis.com/en/product/saflager-s-189/>.

⁶ ГОСТ 12787-2021. Продукция пивоваренная. Методы определения объемной доли этилового спирта, массовой доли действительного экстракта и расчет экстрактивности начального сусла. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 27 с.

До использования в экспериментах ягоды малины хранили в замороженном виде; разморозку осуществляли непосредственно перед применением.

Для повышения выхода сока из ягод малины использовали Pectinex Yieldmash Plus⁷ (Novozymes) – пектолитический комплексный ферментный препарат (продуцент *Aspergillus oryzae*), содержащий целевой фермент пектинметилэстеразу; рекомендуемая производителем дозировка составляет 100–300 см³/т плодов. В эксперименте использовали различные объемы препарата в 10-кратном разбавлении (0,6 или 1,2 см³), добавляя их к 500 г размороженных ягод. Таким образом, дозировка ФП равнялась 60 или 120 см³/т ягод. Обработку в опытных вариантах проводили при температуре 23–26 °С в течение 60 или 120 мин. Контрольный вариант (без добавления ФП) выдерживали при той же температуре в течение 120 мин.

Для оценки эффективности применения данного ферментного препарата был реализован полнофакторный эксперимент ПФЭ2², матрица плана которого представлена в табл. 1.

Таблица 1. Матрица плана эксперимента ПФЭ2²
Table 1. Experimental design matrix FFE2²

Вариант	Объем раствора X_1 разбавленного ФП, см ³ /500 г малины	Продолжительность обработки X_2 , мин	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	0,6	60				
2	1,2	60				
3	0,6	120				
4	1,2	120				
Контроль	0	120				

В качестве выходов функции оценивали следующие показатели: Y_1 – объем сока, см³; Y_2 – содержание сухих веществ в соке, %, определенное рефрактометрическим методом; Y_3 – интенсивность окраски сока, установленную фотометрическим методом при длине волны 670 нм и толщине рабочего слоя кюветы 1 см; Y_4 – содержание редуцирующих веществ в соке, рассчитанное методом с использованием ДНСК (Чернявская и др., 2019).

Результаты и обсуждение

При определении технологически важных характеристик образцов неохмеленного сусла, произведенных различными способами (с настойным затиранием – для варианта сравнения со светлым пивом; с предварительным затиранием – для приготовления пивных напитков с добавлением вкусоароматического компонента или без него), получены результаты, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Показатели образцов неохмеленного сусла, полученных разными способами затирания
Table 2. Indicators of unhopped wort samples obtained by different mashing methods

Показатель	Неохмеленное сусло для приготовления	
	светлого пива	пивного напитка
Сухие вещества, %	13,4	13,2
Редуцирующие вещества, %	61,6	53,0
Аминный азот, мг/100 см ³	431	371

Видно, что замена значительной доли светлого ячменного солода, несмотря на более интенсивное температурное воздействие на несоложеное сырье и применение комплексного ферментного препарата, привела к значительному снижению контролируемых показателей, особенно выраженному для редуцирующих веществ. Это сделало целесообразным дальнейший поиск рациональных режимов получения сусла из засыпей с высоким содержанием несоложенного ячменя. Однако приведенные характеристики в табл. 2 были приемлемыми в обоих вариантах, поэтому на обсуждаемом этапе наших исследований решено было использовать указанные образцы для получения готовых слабоалкогольных напитков.

В ходе исследования рассмотрена возможность повышения выхода сока и целевых компонентов малины за счет применения ферментного препарата Pectinex Yieldmash Plus. Для этого был реализован эксперимент, матрица плана которого приведена в табл. 1.

Полученные экспериментальные данные обработаны с помощью программы Microsoft Excel (рис. 2–5). Кроме того, решено было привести значения расчетных величин – общих извлеченных количеств РВ, г, полученных умножением объема сока в определенном варианте на концентрацию в нем РВ (рис. 6).

⁷ Novozymes. Multi-enzyme blend. Liquid Pectinex® Yieldmash Plus. URL: <https://www.novozymes.com/en/products/juice-fruit-vegetables/apples-pears/pectinex-yieldmash-plus>.

Необходимо отметить, что использованная для построения поверхностей отклика программа не позволяет указать на графике показатели контрольного образца: объем сока составляет 465 см³, содержание СВ в соке 8,1 %, цветность сока 0,241 ед., концентрация в нем РВ 21 мг/см³, общее количество извлеченных из ягод РВ 9,77 г.

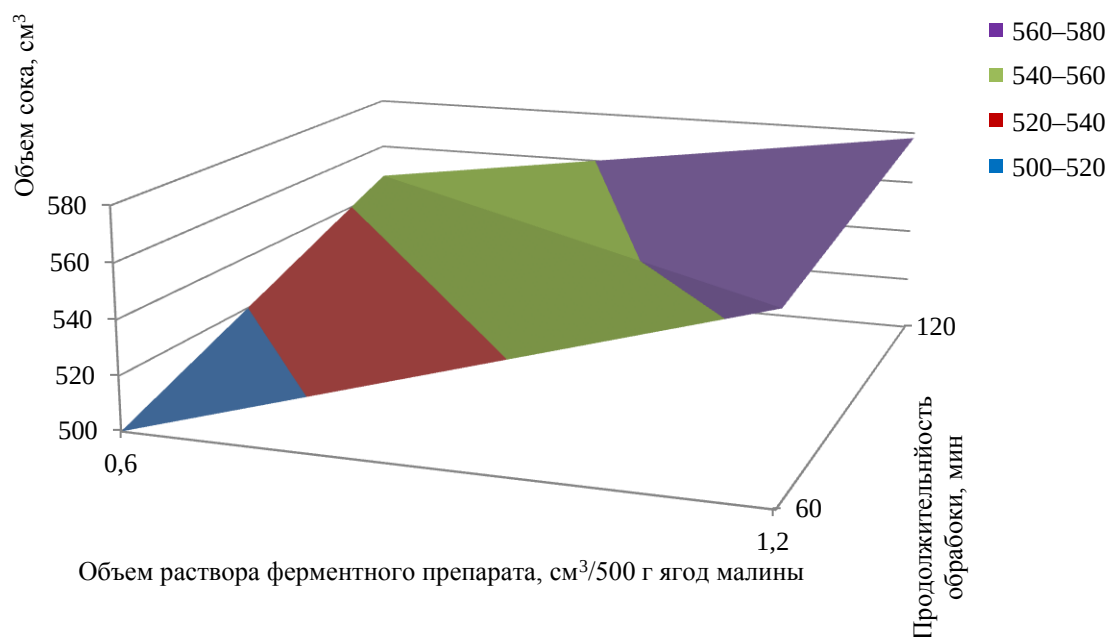


Рис. 2. Влияние обработки ягод малины ферментным препаратом Pectinex Yieldmash Plus на выход (объем) сока

Fig. 2. Effect of treatment by Pectinex Yieldmash Plus on raspberry juice yield

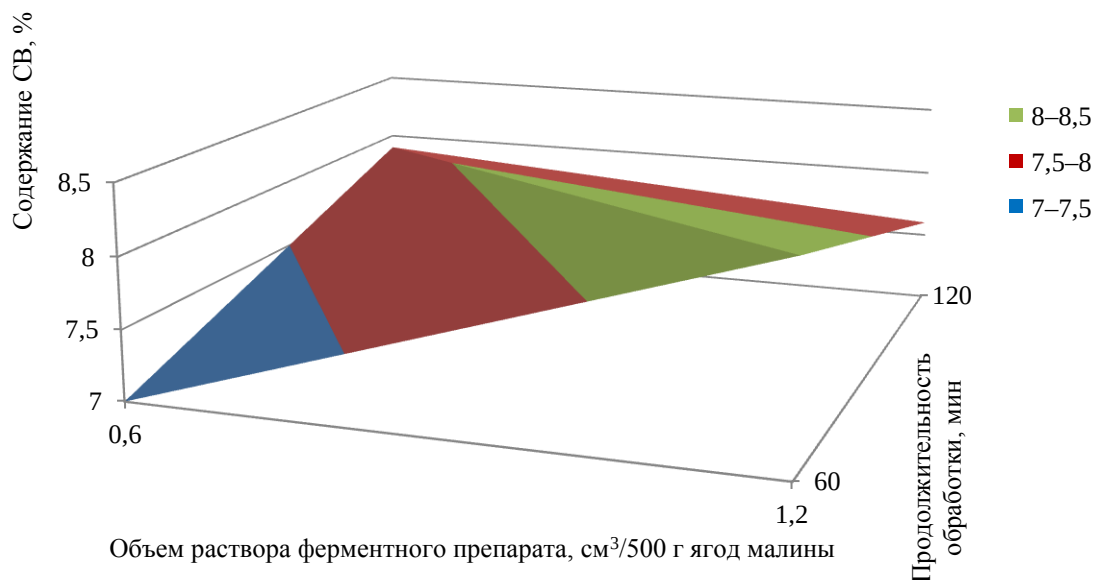


Рис. 3. Влияние обработки ягод малины ферментным препаратом Pectinex Yieldmash Plus на содержание сухих веществ в соке

Fig. 3. Effect of treatment by Pectinex Yieldmash Plus on raspberry juice dry matter content

Установлено, что применение ферментного препарата существенно интенсифицирует процесс извлечения целевых групп веществ из ягод малины, за исключением содержания в соке СВ, что представляется довольно неожиданным. Только в варианте 2 (120 см³ ФП на т ягод) этот показатель увеличился на 4 %. По нашему

мнению, данное снижение компенсируется во всех опытных вариантах, кроме варианта 1, существенным увеличением объема извлеченного сока, в результате чего в большинстве случаев применение ФП обеспечивает увеличение выхода СВ на 15–26 % от веса ягод.

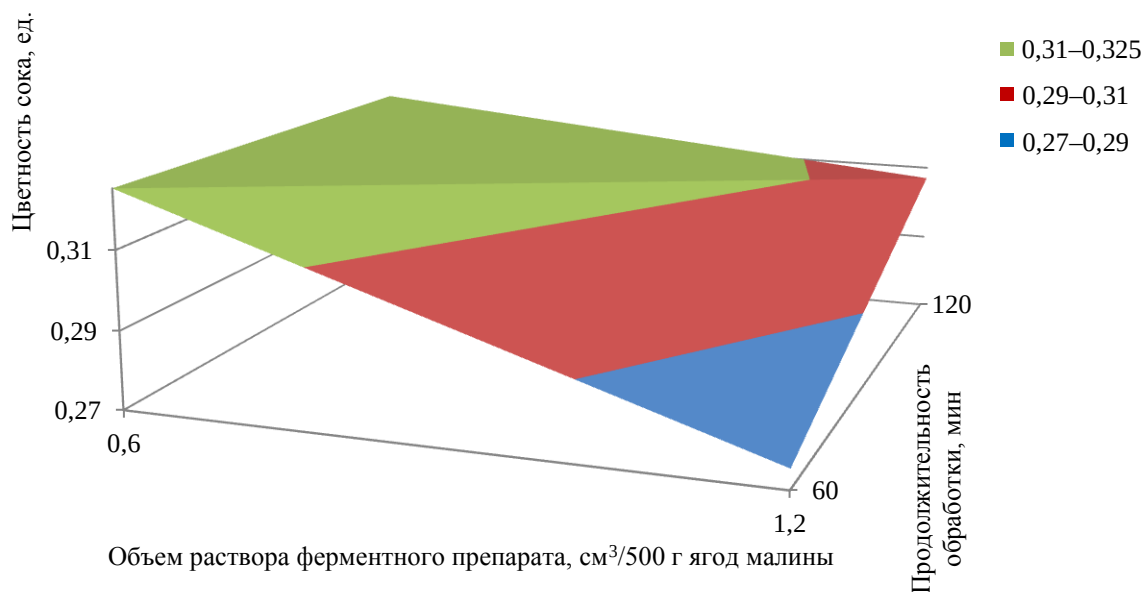


Рис. 4. Влияние обработки ягод малины ферментным препаратом Pectinex Yieldmash Plus на интенсивность окраски сока

Fig. 4. Effect of treatment by Pectinex Yieldmash Plus on raspberry juice color intensity

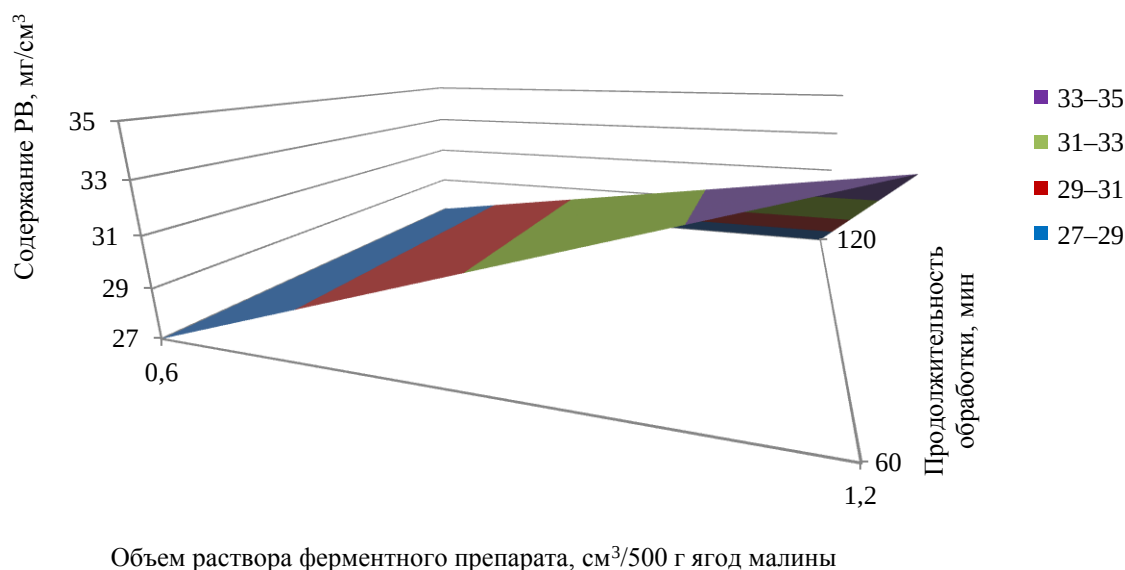


Рис. 5. Влияние обработки ягод малины ферментным препаратом Pectinex Yieldmash Plus на содержание в соке редуцирующих веществ

Fig. 5. Effect of treatment by Pectinex Yieldmash Plus on dry matter content in raspberry juice

Значения всех остальных контролируемых показателей в опытных вариантах возросли по сравнению с контрольными вариантами: объем сока – на 7–24 %; интенсивность окраски сока – на 14–33 %; концентрация РВ в соке – на 3–65 %; общее количество извлеченных из мезги РВ – на 11–100 %.

Вид поверхностей отклика на рис. 2–6 свидетельствует, что ни для одного из контролируемых показателей (выходов функции) не выявлены значения, обеспечивающие точку экстремума; следовательно,

дальнейшая отработка параметров проведения ферментативной обработки малины может обеспечить еще более выраженный положительный эффект.

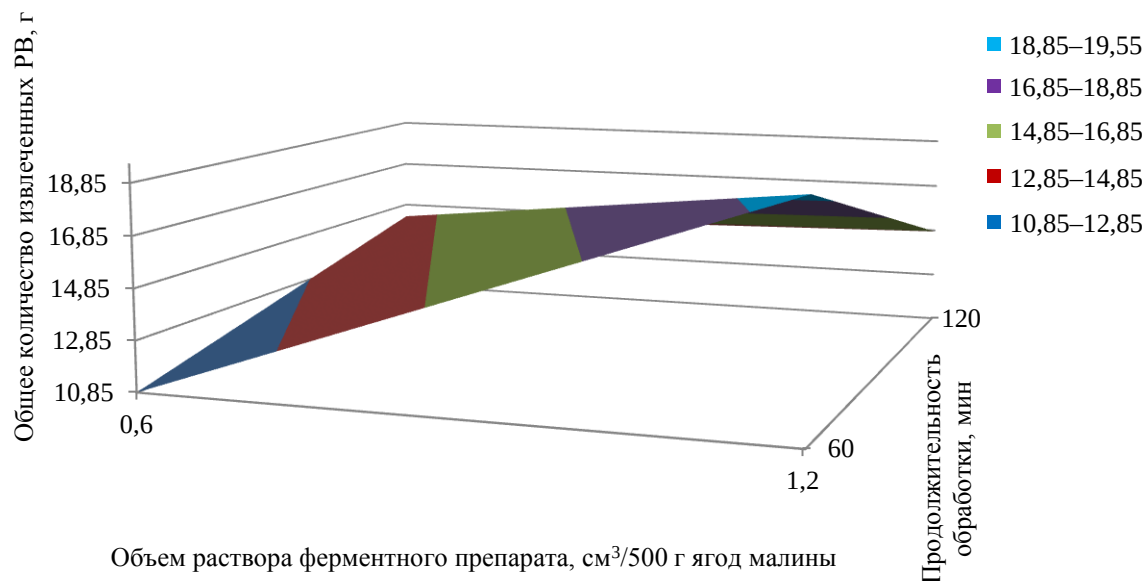


Рис. 6. Влияние обработки малины ферментным препаратом Pectinex Yieldmash Plus на общее количество сухих веществ, извлеченных из 500 г ягод

Fig. 6. Effect of treatment by Pectinex Yieldmash Plus on total dry matter extracted from 500 g of raspberries

Тем не менее на обсуждаемом этапе работы было решено признать наиболее рациональными дозировку ферментного препарата Pectinex Yieldmash Plus, равную 120 см³/г ягод, и продолжительность обработки 60 мин, а оптимизацию режимов ферментативного катализа провести в ходе дальнейших исследований.

Для решения основной задачи в лабораторном масштабе были реализованы стадии получения пивных напитков с использованием вкусоароматических компонентов и определены показатели полупродуктов и готовых нефилтрованных напитков.

В процессе экспериментов получены четыре варианта напитка:

- светлое пиво из 100 % светлого ячменного пивоваренного солода; затирание вели по настойному варианту; его на всех этапах использовали как вариант сравнения;
- пивной напиток без добавления вкусоароматического компонента; сусло в этом и следующих двух вариантах получали из 60 % светлого ячменного солода и 40 % ячменя по способу с предварительным затиранием всего несоложенного зерна и его обработкой ФП "Церемикс Плюс МГ";
- пивной напиток с добавлением к начальному суслу сока малины в дозировке 15 см³ на 100 см³;
- пивной напиток с добавлением к начальному суслу кофейного экстракта "Эфиопия Сидамо" в дозировке 15 см³ на 100 см³.

Характеристики неохмеленного сусла для получения образца сравнения и опытных вариантов приведены в табл. 1. Далее технологические стадии проводили в условиях, описанных в разделе "Материалы и методы". В образцах готовых нефилтрованных слабоалкогольных напитков определяли содержание этанола и действительного экстракта (табл. 3).

По нашему мнению, данные определения в целом хорошо согласуются с показателями неохмеленного сусла в каждом варианте: при примерно равной концентрации СВ меньшее содержание РВ и аминного азота (в сусле для пивных напитков) привело к меньшему выходу этилового спирта и большему несброженному экстракту.

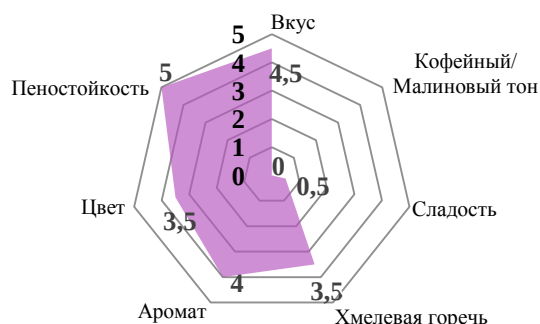
Кроме того, в двух последних вариантах могло сыграть роль некоторое "разбавление" сусла за счет добавления растворов, содержащих органолептически значимые компоненты малины и кофе. Интересно также отметить, что в варианте с добавлением экстракта кофе, который содержит немного СВ и почти не включает РВ, брожение прошло менее интенсивно, чем в образце того же сусла без добавления вкусоароматического компонента. Возможно, экстракт содержит какие-то химические соединения, негативно сказывающиеся на приросте биомассы пивных дрожжей и/или их бродильной активности. Результаты определения показателей в пивном напитке с соком малины существенно отличаются от результатов расчета по формуле Баллинга (при расчете по этой формуле СВ начального сусла равняются 14,12), что

можно объяснить содержанием дополнительного количества сахаров в составе малинового сока, усваиваемых пивными дрожжами. Если высказанное предположение верно, можно заключить, что в малиновом соке нет компонентов, угнетающих метаболизм пивных дрожжей.

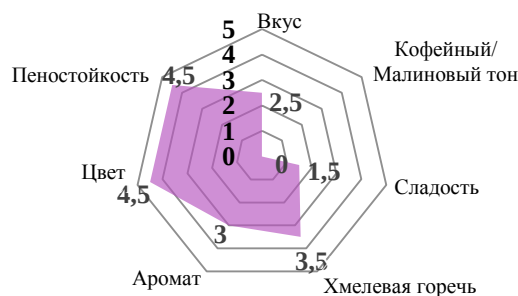
Таблица 3. Показатели пива и пивных напитков, полученных разработанным способом
Table 3. Indicators of beer and beer drinks obtained by the developed method

Тип напитка	Показатель	
	Массовая доля ДЭ, %	Массовая доля спирта, %
Пиво светлое	0,62	6,60
Пивной напиток	3,85	4,95
Пивной напиток с малиновым соком	3,84	5,32
Пивной напиток с экстрактом кофе	4,89	3,54

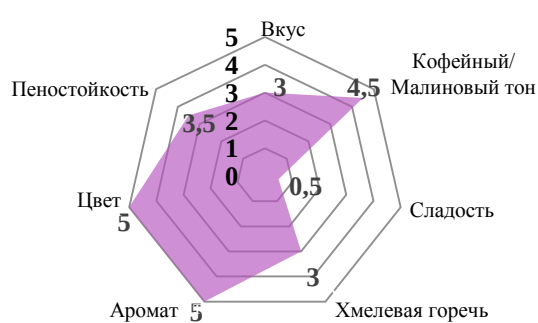
Контролируемые аналитические параметры полученных пивных напитков были удовлетворительными и соответствовали требованиям нормативной документации. Важной потребительской характеристикой любого пищевого продукта, в том числе напитка брожения, являются органолептические показатели. Для их установления была проведена открытая непрофессиональная дегустационная оценка, результаты которой представлены на рис. 7.



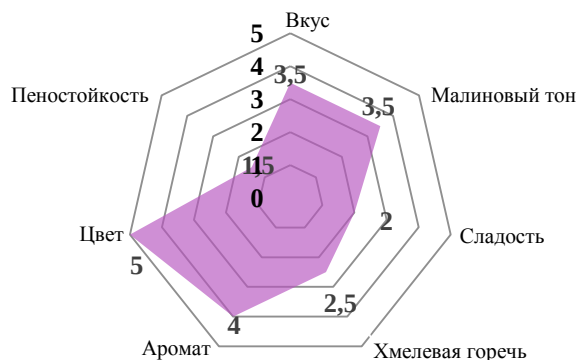
a



б



в



г

Рис. 7. Органолептические характеристики слабоалкогольных напитков: *a* – светлое пиво; *б* – пивной напиток; *в* – пивной напиток с экстрактом кофе; *г* – пивной напиток с малиновым соком
Fig. 7. Organoleptic characteristics of low-alcohol drinks: *a* – light beer; *б* – beer drink; *в* – beer drink with coffee extract; *г* – beer drink with raspberry juice

Светлое нефilterованное пиво обладало достаточно высокими органолептическими характеристиками, за исключением цвета. Что может быть объяснено опалесценцией, вызванной значительным количеством

дрожжевых клеток, суспендированных в объеме образца после вскрытия бутылки и бурного выделения диоксида углерода.

Невысокую оценку оно получило за хмелевую горечь, что связано с низкой, по современным нормам, дозировкой хмеля. Такой выбор обусловлен желанием облегчить сопоставление вкуса и аромата пива и пивных напитков с добавлением вкусоароматических компонентов; в последних выраженная хмелевая горечь плохо сочетается со вкусом кофе или малины. Предположительно, хмелевой вкус в этом образце ощущался более резко и менее сбалансированно из-за низкого содержания несброженного экстракта. Кроме того, по очевидным причинам пиво не обладало сладостью и кофейным/малиновым тоном.

Те же оценки относятся к пивному напитку без добавления экстракта или сока. По другим типичным для пива дескрипторам (кроме цвета и пеностойкости) он получил средние оценки, что может быть объяснено высокой дозировкой несоложенного ячменя в засыпи. Заметный сладковатый оттенок во вкусе этого образца может быть связан с меньшей, чем возможно для 13%-го сусла, степенью сбраживания и заметным содержанием несброженных веществ, обладающих сладким вкусом.

Пивные напитками с добавлением вкусоароматического сырья по-разному были оценены дегустаторами.

Введение экстракта кофе обеспечило вкус и аромат использованного сырья, а также привлекательный, насыщенный цвет напитка. Однако вкус пивного напитка был маловыраженным, возможно, из-за того, что он "маскировался" экстрактом. Пеностойкость данного образца также была лишь на среднем уровне.

Использование малинового сока также привело к получению напитка с привлекательным, ярким цветом, однако выраженность вкуса и особенно аромата малины была не очень интенсивной. По нашему мнению, это связано с существенными изменениями/потерями вкусоароматических компонентов малины в процессе брожения и дображивания.

В целом вкус напитка получил оценку выше средней; зафиксирован выраженный сладковатый оттенок во вкусе, однако данный оттенок сужает круг потенциальных потребителей пивного напитка. Очень низкая пеностойкость данного образца не находит адекватного объяснения и требует проведения дополнительных исследований. Хмелевая горечь была ощутимой, но не выраженной и в достаточной степени гармонизировала с остальными оттенками вкуса.

Заключение

Разработанная нами схема затирания позволила получить сусло с приемлемыми технологическими характеристиками, которые могут быть улучшены за счет установления режимов предзатирания несоложенного сырья, в частности незначительного увеличения продолжительности пауз на этом этапе и/или дозировки ферментного препарата "Цермикс Плюс МГ".

Ферментный препарат Pectinex Yieldmash Plus показал высокую эффективность при его применении с целью интенсификации процесса извлечения технологически ценных компонентов из ягод малины. Соотношение дозировки ферментного препарата и продолжительность обработки обуславливают выход определенной группы соединений: сухих веществ в целом, редуцирующих или красящих веществ. В рамках поставленной задачи рациональными были признаны дозировка 120 см³/т ягод и продолжительность обработки 60 мин, обеспечивающие существенное повышение выхода сухих и редуцирующих веществ.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности использования апробированного вкусоароматического сырья в технологии напитков брожения. Пивные напитки с применением кофейного концентрата "Эфиопия Сидамо" или малинового сока имеют более высокие, чем пивные напитки без их добавления, органолептические характеристики. При этом открытым остается вопрос о рациональном моменте введения указанного сырья в технологический процесс: до начала главного брожения, как это было сделано в обсуждаемом исследовании, или по окончании дображивания, до фильтрования напитка. Попытка дать обоснованный ответ на данный вопрос будет предпринята на следующих этапах нашего исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Алексеев Е. В. Биокаталитические методы обработки плодово-ягодного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 2008. № 5. С. 62–65. EDN: JKAHAX.
- Алексеев Е. В., Быстрова Е. А. Мониторинг эффективности применения ферментных препаратов для обработки ягод брусники при получении сока // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 3(65). С. 177–181. EDN: VDKUFP.

- Алексеев Е. В., Дикарева Ю. М., Траубенберг С. Е., Осташенкова Н. В. Применение ферментных препаратов при переработке плодов облепихи // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. Food Technology. 2011. № 2–3(320–321). С. 48–50. EDN: MLWKHB.
- Алексеев Е. В., Каримова Н. Ю., Цветкова А. А. Современное состояние и перспективы развития способов переработки ягод черники: обзор предметного поля // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 1. С. 22–44. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.353>. EDN: VLMBNR.
- Берзегова А. А. Дикоплодовые леса Адыгеи, перспективность их использования // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2008. № 1. С. 29–33. EDN: JXZZTX.
- Берзегова А. А. Биологические аспекты создания сырьевых насаждений плодовых и ягодных культур в предгорной зоне северо-западного Кавказа : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 06.01.07. Краснодар, 2009. 41 с.
- Гернет М. В., Грибкова И. Н., Кобелев К. В., Нурмуханбетова Д. Е. и др. Биотехнологические аспекты производства напитков брожения с применением растительного сырья // ҚР ҰҒА Хабарлары. Геология мен техникалық ғылымдар сериясы. 2019. Vol. 1(№ 433). P. 223–230. DOI: <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.27>. EDN: ZDRDMD.
- Гордюшин М. Г., Наседкин А. С., Серочкина А. А., Чан Д. Т. [и др.]. Органолептическая оценка слабоалкогольного напитка на зерновой основе // Совершенствование рациона питания населения, обеспечение качества и безопасности кулинарной продукции : сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвященной памяти почетного работника высшей школы Российской Федерации, д-ра техн. наук, проф. Г. Г. Дубцова, г. Москва, 7 декабря 2021 г. В 2 ч. Ч. 1. М. : Русайнс, 2022. С. 73–84. EDN: UESLAR
- Гутучкина, Т. И., Кушнерева Е. В., Паутов Р. Ю. Сравнительная оценка режимов переработки мезги клюквы для производства вин с высокой биологической ценностью // Плодоводство и виноградарство юга России. 2011. № 8(2). С. 126–133. EDN: NDPIWP.
- Еремеева Н. Б., Макарова Н. В. Изучение влияния предварительной обработки плодов и ягод ферментными препаратами на выход и антиоксидантную активность экстрактов // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2018. № 43. С. 55–59. DOI: <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2018-43-55-59>. EDN: YVHSBB.
- Каримова Н. Ю., Алексеев Е. В., Горьковая Ю. З. Применение методов математического моделирования для определения условий ферментативной обработки ягод черники при получении сока // Актуальная биотехнология. 2023. № 1. С. 30–32. DOI: <https://doi.org/10.20914/2304-4691-2023-1-30-32>. EDN: QHLZSI.
- Карпенко Д. В., Чан Д. Т., Гордюшин М. Г., Серочкина А. А. Оценка эффективности применения ферментного препарата "Цермикс плюс МГ" при переработке заторов с высоким содержанием несоложенного зернового сырья // Пиво и напитки. 2022. № 3. С. 6–10. DOI: <https://doi.org/10.52653/PIN.2022.03.03.001>. EDN: VTOZJI.
- Рыжова Н. В., Иванова Л. А., Мураенко Е. Н. Совершенствование способов экстракции красящих веществ из растительного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 2006. № 5. С. 17–18. EDN: HTGREB.
- Химико-технологический контроль производства солода и пива / под ред. П. М. Мальцева. М. : Пищевая промышленность, 1976. 447 с.
- Чернявская Л. И., Моканюк Ю. А., Кухар В. Н., Чернявский А. П. Экспресс-метод определения содержания редуцирующих веществ в сахарной свекле и продуктах ее переработки // Сахар. 2019. № 10. С. 16–21. EDN: WRIMHM.
- Bamforth C. W. Fermented beverages // Encyclopedia of Agriculture and Food Systems. 2014. P. 124–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00154-6>.
- Fermented foods and beverages of the world / eds.: J. Prakash Tamang, K. Kailasapathy. CRC Press Taylor & Francis Group, 2010.
- Sharma H. P., Patel H., Sugandha S. Enzymatic added extraction and clarification of fruit juices – A review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. Vol. 57, Iss. 6. P. 1215–1227. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.977434>.

References

- Alekseenko, E. V. 2008. Biocatalytic methods of processing fruit and berry raw materials. *Storage and Processing of Farm Products*, 5, pp. 62–65. EDN: JKAHAX. (In Russ.)
- Alekseenko, E. V., Bystrova, E. A. 2015. Monitoring of efficiency of application of fermental preparations for processing of berries of cowberry when receiving juice. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 3(65), pp. 177–181. EDN: VDKUFP. (In Russ.)
- Alekseenko, E. V., Dikareva, Yu. M., Trautenberg, S. E., Ostachenkova, N. V. 2011. An application of enzyme preparations at sea-buckthorn processing. *Izvestiya VUZOV. Food Technology*, 2–3(320–321), pp. 48–50. EDN: MLWKHB. (In Russ.)

- Alekseenko, E. V., Karimova, N. Yu., Tsvetkova, A. A. 2023. The current state and prospects for the development of methods for processing bilberries: Scoping review. *Storage and Processing of Farm Products*, 1, pp. 22–44. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.353>. EDN: VLMBNR. (In Russ.)
- Berzegova, A. A. 2008. Wild fruit forests of Adygea, prospects of their use. *Bulletin of the Mari State Technical University. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*, 1, pp. 29–33. EDN: JXZZTX. (In Russ.)
- Berzegova, A. A. 2009. Biological aspects of creation of raw material plantations of fruit and berry crops in the foothill zone of the north-western Caucasus. Abstract of Ph.D. dissertation. Krasnodar. (In Russ.)
- Gernet, M. V., Gribkova, I. N., Kobelev, K. V., Nurmukhanbetova, D. E. et al. 2019. Biotechnological aspects of fermented drinks production on vegetable raw materials. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Ser. of Geology and Technical Sciences*, 1(433), pp. 223–230. DOI: <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.27>. EDN: ZDRDMD. (In Russ.)
- Gordjushin, M. G., Nasedkin, A. S., Serochkina, A. A., Chan, Din' Toan et al. 2022. Organoleptic evaluation of a low-alcohol grain-based beverage. In coll. articles *Improving the population's diet, ensuring the quality and safety of culinary products*. Moscow, 7 December, 2021. In 2 parts. Part 1, pp. 73–84. EDN: UESLAR. (In Russ.)
- Guguchkina, T. I., Kushnereva, E. V., Pautov, R. 2011. The comparative evaluation of the regimes of cranberry pulp processing for wine production with high biological value. *Fruit growing and viticulture of South Russia*, 8(2), pp. 126–133. EDN: NDIIWP. (In Russ.)
- Eremeeva, N. B., Makarova, N. V. 2018. Effect of pretreatment of fruit and berries with enzyme preparations on yield and antioxidant activity of the extracts. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*, 43, pp. 55–59. DOI: <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2018-43-55-59>. EDN: YVHSBB. (In Russ.)
- Karimova, N. Yu., Alekseenko, E. V., Gor'kovaja, Yu. Z. 2023. Application of mathematical modeling methods to determine the conditions of enzymatic processing of blueberries during juice production. *Aktual'naya Biotekhnologiya*, 1, pp. 30–32. DOI: <https://doi.org/10.20914/2304-4691-2023-1-30-32>. EDN: QHLZSI. (In Russ.)
- Karpenko, D. V., Chan, Din' Toan, Gordjushin, M. G., Serochkina, A. A. 2022. Evaluation of the effectiveness of the use of the enzyme preparation "Ceremix® Plus MG" in the processing of mashes with a high content of unmalted grain raw materials. *Beer and Beverages*, 3, pp. 6–10. DOI: <https://doi.org/10.52653/PIN.2022.03.03.001>. EDN: VTOZJI. (In Russ.)
- Ryzhova, N. V., Ivanova, L. A., Muraenko, E. N. 2006. Improving methods for extracting dyes from plant materials. *Storage and Processing of Farm Products*, 5, pp. 17–18. EDN: HTGREB. (In Russ.)
- Chemical and technological control of malt and beer production. 1976. Ed. P. M. Mal'tsev. Moscow. (In Russ.)
- Chernjavskaja, L. I., Mokanjuk, Yu. A., Kuhar, V. N., Chernjavskij, A. P. 2019. Rapid method for determining the content of reducing substances in sugar beet and its processed products. *Sugar*, 10, pp. 16–21. EDN: WRIMHM. (In Russ.)
- Bamforth, C. W. 2014. Fermented beverages. In: *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, pp. 124–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00154-6>.
- Fermented foods and beverages of the world. 2010. Eds.: J. Prakash Tamang, K. Kailasapathy. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Sharma, H. P., Patel, H., Sugandha, S. 2017. Enzymatic added extraction and clarification of fruit juices – A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), pp. 1215–1227. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.977434>.

Сведения об авторах

Карпенко Дмитрий Валерьевич – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: karpenkovd@mgupp.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7885-1150>

Dmitry V. Karpenko – 11 Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: karpenkovd@mgupp.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7885-1150>

Мойсеяк Марина Борисовна – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет, канд. техн. наук, доцент, профессор;
e-mail: marina-mgupp@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4938-5293>

Marina B. Moiseyak – 11 Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor;
e-mail: marina-mgupp@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4938-5293>

Лялина Марина Сергеевна – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет, аспирант; e-mail: Mderkach777@yandex.ru

Marina S. Lyalina – 11 Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University, PhD Student; e-mail: Mderkach777@yandex.ru

Панеш Мурат Капланович – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет, аспирант; e-mail: mp0727@mail.ru

Murat K. Panesh – 11 Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University, PhD Student; e-mail: mp0727@mail.ru

Аннакулиева Менли – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет, студент; e-mail: annakuliyeva2003@gmail.com

Menli Annagulyyeva – 11 Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University, Student; e-mail: annakuliyeva2003@gmail.com

Воропаева Арина Сергеевна – Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет, студент;
e-mail: arina.voropaeva23@mail.ru

Arina S. Voropaeva – 11 Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnological University, Student; e-mail: arina.voropaeva23@mail.ru

УДК 664

Разработка технологии нового мучного кулинарного рыбного изделия, обогащенного йодом ламинарии беломорской

К. Н. Савкина, В. В. Щетинский, П. А. Тихонова, Ю. В. Шокина*

*Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия;
e-mail: shokinayu@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6513-1912>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
02.12.2024;

получена
после доработки
29.04.2025;

принята
к публикации
05.05.2025

Ключевые слова:
рыбные кулинарные
изделия, обогащенные
продукты,
йододефицит, ламинария,
калитки

Реферат

Выбор ассортимента рыбных кулинарных изделий проведен на основании анализа мотивации потребителей г. Мурманска и актуальных трендов развития регионального рынка рыбокулинарных продуктов. В ходе исследования предложена технология нового изделия "Калитки по-мурмански" с начинкой из красной рыбы и моркови, обеспечивающая наилучшие органолептические свойства. Для снижения избыточной оводненности комбинированной начинки использована комплексная пищевая добавка H-Serval80 в качестве водосвязывающего и структурообразующего агента. Оптимизация рецептуры осуществлена с помощью метода нечеткой логики и программного пакета MatLab; в процессе экспериментов оценивались органолептические свойства опытных образцов изделий, различающихся составом начинки (варьируемыми ингредиентами являлись морковь и добавка H-Serval80). В состав ржаного теста для обогащения йодом включен порошок сушеной ламинарии производства Архангельского водорослевого комбината, количество которого рассчитывалось с учетом содержания йода не менее 15 % от физиологической нормы потребления (150 мкг), а также соблюдения токсического порога для йода (600 мкг). Предложенная рецептура предусматривает возможность использования пищевых отходов от переработки гидробионтов (фарша кулинарного из срезов мяса лососевых рыб, получаемого при разделке рыб на филе). Данное технологическое решение позволяет снизить себестоимость готовых изделий за счет уменьшения стоимости основного сырья при сохранении качества и пищевой ценности изделий, а также обеспечить комплексную переработку ценного биологического ресурса, добываемого в арктических морях.

Для цитирования

Савкина К. Н. и др. Разработка технологии нового мучного кулинарного рыбного изделия, обогащенного йодом ламинарии беломорской. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 231–243. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-231-243>.

Development of the technology of a new flour culinary fish product enriched with iodine of the White Sea kelp

Kseniya N. Savkina, Vsevolod V. Cshetinsky, Pavlina A. Tihonova, Yulia V. Shokina*

*Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;
e-mail: shokinayu@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6513-1912>

Article info

Received
02.12.2024;

received
in revised
29.04.2025;

accepted
05.05.2025

Key words:
fish culinary products,
fortified products,
iodine deficiency,
kelp,
kalitki

Abstract

The range of fish culinary products has been selected based on the analysis of consumer motivation in Murmansk and current trends in the development of the regional fish culinary products market. The study has proposed a technology for a new product, "Kalitki po Murmanskii" with a filling of red fish and carrots providing the best organoleptic properties. To reduce the excess water content of the combined filling, the complex food additive H-Serval80 has been used as a water-binding and structure-forming agent. The recipe has been optimized using the fuzzy logic method and the MatLab software package; during the experiments, the organoleptic properties of prototypes of products with different filling compositions have been assessed (the variable ingredients are carrots and the additive H-Serval80). The rye dough fortified with iodine includes dried kelp powder produced by the Arkhangelsk algae plant, the amount of which has been calculated taking into account the iodine content of at least 15 % of the physiological intake rate (150 mcg), as well as compliance with the toxic threshold for iodine (600 mcg). The proposed recipe provides for the possibility of using food waste from the processing of aquatic organisms (minced culinary meat from salmon cuts obtained when cutting fish into fillets). This technological solution allows for reducing the cost of finished products by reducing the cost of the main raw materials while maintaining the quality and nutritional value of the products, as well as ensuring the comprehensive processing of a valuable biological resource extracted in the Arctic seas.

For citation

Savkina, K. N. et al. 2025. Development of the technology of a new flour culinary fish product enriched with iodine of the White Sea kelp. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 231–243. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-231-243>.

Введение

Проблема йододефицита является актуальной во всем мире¹; в качестве одного из эффективных решений этой проблемы Всемирная организация здравоохранения рассматривает расширение ассортимента продуктов питания повседневного спроса, обогащенных органическим йодом, который лучше усваивается организмом человека и не способен оказывать токсического действия в суточной дозе потребления 1 000–1 300 мкг при постепенном высвобождении (*Vatandoust et al.*, 2023). В настоящее время наиболее изученным и доступным для предприятий-производителей продуктов питания источником органического йода являются морские водоросли, в частности ламинария *Saccharina latissima*, произрастающая в Белом и Баренцевом морях и доступная для масштабного сбора и промышленной переработки (*Савкина и др.*, 2024a). В России широкая ассортиментная линейка продуктов переработки ламинарии беломорской представлена Архангельским водорослевым комбинатом. Для использования в пищевой промышленности наиболее пригодной является производимая предприятием ламинария сушеная пищевая в виде порошка с частицами размером до 200 мкм. Пищевой ингредиент характеризуется высоким содержанием йода, отличными функционально-технологическими свойствами, что позволяет рассматривать его в качестве функционального пищевого ингредиента при разработке инновационных продуктов питания, обогащенных йодом (*Савкина и др.*, 2023).

Для российского потребителя популярными продуктами питания повседневного спроса являются мучные кулинарные изделия с разнообразными начинками (пироги, пирожки, пельмени, вареники, манты, пиццы), характеризующиеся высоким содержанием углеводов, в том числе сахарозы (*Елисеева и др.*, 2023). Избыточное потребление мучных кондитерских изделий ведет к развитию опасных заболеваний, таких как ожирение, диабет, панкреатит, атеросклероз и т. д. (*Панкратов и др.*, 2022). При этом у мучных кулинарных изделий имеются очевидные достоинства как для потребителя, так и для производителя. Потребительскими достоинствами являются сбалансированный состав основных пищевых компонентов (углеводов, белков, жиров), высокие вкусовые качества, быстрота и простота приготовления или доготовки (для полуфабрикатов в замороженном виде), длительный срок хранения в замороженном виде, что дает возможность формировать продуктовые запасы (*Васюкова и др.*, 2023). Производители к важным преимуществам относят простоту технологического процесса, высокий потребительский спрос, гарантирующий стабильный сбыт продукции, возможность расширения ассортимента продукции на основе базовой технологии, что важно для закрепления на конкурентном рынке продовольствия. Другим продуктовым трендом у российского потребителя в последние пять лет стали изделия здорового питания, обогащенные ценными пищевыми веществами. В "Стратегии развития пищевой и перерабатывающей промышленности России до 2030 г."² особое внимание уделяется повышению в производстве доли пищевых продуктов специализированного назначения, обладающих обогащенным составом и функциональными свойствами.

Рынок продуктов, готовых к употреблению, активно развивается. Согласно результатам опроса компании NielsenIQ (США), в 2022 г. почти 70 % покупателей интересовались продуктами-новинками, а 29 % считали себя трендсеттерами и целенаправленно пробовали новое. Эти люди оказываются двигателями отрасли, поскольку формируют первичный спрос на новинки³. Рост потребления полуфабрикатов и готовых блюд обусловлен заметными изменениями в традиционных диетических привычках россиян и более глубоким пониманием влияния продуктов на здоровье и продолжительность жизни человека.

Согласно ТР ЕАЭС 040/2016⁴, готовое рыбное кулинарное изделие – пищевая рыбная продукция, изготовленная с добавлением или без добавления пищевых компонентов и (или) пищевых добавок, готовая к употреблению в пищу после тепловой обработки или без нее. В настоящее время в обиход потребителей и производителей продуктов питания вошло понятие "ready-to-eat" (RTE) – блюда, не требующие приготовления. Формально консервы и выпечка тоже входят в понятие RTE, но чаще этим термином обозначают кулинарные изделия, которые продаются в супермаркетах в индивидуальной упаковке. Продукты RTE дорогостоящие, что является серьезным препятствием для роста их потребления (*Лебедева и др.*, 2022). Однако возможно снижение стоимости продуктов за счет использования ценного вторичного пищевого сырья, а также новых и недоиспользуемых видов сырья. Рыбные кулинарные изделия входят в категорию продуктов глубокой переработки, что позволяет при правильно организованном технологическом процессе и сбыте сделать их производство высокорентабельным и получать наибольшую прибыль. По данным компании NielsenIQ,

¹ Global Scorecard of Iodine Nutrition in 2020. Iodine Global Network 2020. URL: https://www.ign.org/cm_data/Global-Scorecard-2020-3-June-2020.pdf.

² Об утверждении Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса РФ на период до 2030 г. (вместе с "Планом мероприятий по реализации стратегии развития рыбохозяйственного комплекса РФ на период до 2030 г.") : Распоряжение Правительства РФ № 2798-р от 26 ноября 2019 г. // Собрание законодательства РФ. 2019. № 48. С. 6905.

³ Как изменился FMCG-рынок в 2022 г. // NielsenIQ. URL: <https://nielseniq.com/global/ru/insights/analysis/2022/kak-izmenilsya-fmcg-rynok-v-2022/>.

⁴ Технический регламент Евразийского экономического союза. О безопасности рыбы и рыбной продукции : ТР ЕАЭС 040/2016. Изд. 18 октября 2016 г. // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума "Кодекс". URL: <https://docs.cntd.ru/document/420394425>.

подавляющее число россиян беспокоит растущая инфляция, ее замечают 98 % покупателей. Этот тренд прослеживается в течение 2022–2024 гг. и обусловлен последствиями пандемии, геополитической ситуацией и новым витком экономического кризиса. Ценовой фактор играет важную роль при выборе потребителями продуктов питания⁵ (Инатова, 2020).

Таким образом, актуальным направлением развития пищевой промышленности является разработка научно обоснованных технологических решений, направленных на расширение ассортимента мучных и кондитерских изделий с разнообразными начинками, отличающихся сбалансированным составом и обогащенных функциональными пищевыми ингредиентами.

Цель настоящего исследования заключается в разработке технологии и оптимальной рецептуры рыбного мучного кулинарного изделия повседневного спроса, обогащенного йодом ламинарии беломорской и предназначенного для профилактики йододефицитных состояний населения Арктической зоны России. Достижение поставленной цели обеспечивается обоснованием выбора: 1) источника органического йода – функционального пищевого ингредиента для обогащения нового рыбного мучного кулинарного изделия; 2) ассортимента нового рыбного кулинарного изделия по результатам выборочного маркетингового исследования (опроса потребителей и анализа розничного рынка в г. Мурманске); 3) базовой технологии нового рыбного мучного кулинарного изделия, обогащенного йодом, и на ее основе усовершенствованной технологии изготовления; 4) рецептуры нового рыбного мучного кулинарного изделия, обогащенного йодом, по выбранному критерию автоматизированным способом с использованием современных математических методов.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали опытные образцы рыбного мучного кулинарного изделия "Калитки по-мурмански" с начинкой из красной рыбы и моркови.

В ходе исследования определялись органолептические свойства рыбных мучных кулинарных изделий (опытных образцов, изготовленных по разработанным технологиям) и их зависимость от соотношения выбранных ключевых компонентов рецептуры изделий.

В работе применяли маркетинговые, органолептические и математические методы исследования. Пробы для органолептических исследований отбирали в соответствии с требованиями ГОСТ 31339-2006 "Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Правила приемки и методы отбора проб"⁶. Разработку рецептур осуществляли с использованием системы автоматизированного проектирования и оптимизации, нечетких множеств и программного обеспечения MatLab (модуль Fuzzy Logic Toolbox)⁷. Статистическую обработку результатов экспериментальных исследований проводили с помощью пакета стандартных программ Microsoft Office Excel 2016.

Результаты и обсуждение

Водоросли, благодаря своим исключительным питательным свойствам, стали популярным ингредиентом при производстве широкого спектра пищевых продуктов (Подкорытова и др., 2021). Это привело к росту коммерческого интереса к крупномасштабному выращиванию водорослей. В рамках решения проблемы обогащения продуктов питания йодом наиболее эффективным методом является использование природных источников йода, таких как морские бурые водоросли. Среди них наибольшее применение в пищевой промышленности нашла морская капуста, или ламинария. Эти водоросли являются отличными компонентами для создания новых функциональных и готовых к употреблению продуктов, так как они представляют собой ценный источник не только йода, но и других физиологически активных пищевых ингредиентов (Freitas et al., 2015). Морские водоросли представляют собой растительноподобные эукариотические организмы и делятся на три основные группы: красные водоросли *Rhodophyta*, бурые водоросли *Phaeophyceae* и зеленые водоросли *Chlorophyta* (Wang et al., 2017).

В странах Азиатско-Тихоокеанского региона потребление морских водорослей стало неотъемлемой частью повседневного рациона (Wells et al., 2017). Эпидемиологические исследования показывают, что высокое потребление морских водорослей играет важную роль в снижении хронических заболеваний (диабет, атеросклероз, ишемическая болезнь сердца, ожирение, инфаркты и инсульты, зоб и гипотиреоз), которые широко распространены в западных странах (Délérís et al., 2016). В Японии в 2007 г. среднее суточное потребление морских водорослей на одного взрослого человека составляло примерно 14,3 г, что значительно способствовало росту потребления пищевых волокон среди населения страны (Nova et al.,

⁵ См.: Итог выборочного наблюдения рациона питания населения. 2018 г. // Сайт Федеральной службы государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Racion.pdf> ; Как меняется покупательский спрос в новой ценовой реальности // NielsenIQ. URL: <https://nielseniq.com/global/ru/insights/analysis/2022/kak-menyayetsya-pokupatel'skij-spros-v-novoj-cenovoj-realnosti/>.

⁶ ГОСТ 31339-2006. Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Правила приемки и методы отбора проб. Введен 07.01.2008. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200049977>.

⁷ Луковкин С. Б. Элементы нечеткой логики в компьютерном моделировании. Мурманск, 2011. 38 с.

2020б). По данным Global Market Insights Inc., в Японии морские водоросли составляют более 8 % от общего рациона, при этом потребление за последнее десятилетие выросло примерно на 20 %, достигнув в среднем 3,3 кг на семью. По прогнозам, к 2027 г. коммерческий рынок морских водорослей из пищевой промышленности превысит годовой спрос более чем на 20,5 кг. Сегмент включает в себя прямые продукты питания и пищевые добавки, которые потребляются в качестве основного продукта питания в таких странах, как Япония, Корея и Китай⁸. Преимущества японской диеты для снижения риска сердечно-сосудистых заболеваний и рака были исследованы на выборке из 58 767 японцев в возрасте от 40 до 79 лет. Установлена связь между уменьшением риска сердечно-сосудистых заболеваний и общей смертностью, особенно у женщин. Кроме того, в исследовании, охватывающем 86 113 японских участников в возрасте от 40 до 69 лет, было выявлено, что потребление морских водорослей имеет обратную зависимость от риска ишемической болезни сердца (Nova et al., 2020б).

В настоящее время свойства водорослей стали предметом изучения ученых и в западных странах. Водоросли могут применяться в различных областях, не только в пищевой, но и фармацевтической и нутрицевтической отраслях, учитывая их значительный потенциал для медицинских, промышленных и биотехнологических применений (Nova et al., 2020а). В этом контексте морские водоросли могут сыграть важную роль в разработке новых функциональных и обогащенных пищевых продуктов, способствующих профилактике различных заболеваний (Кароматов и др., 2017).

В России, по данным исследования российского маркетингового агентства ГидМаркет, в 2023 г. было объявлено около 150 тендеров, в которых были указаны морские водоросли. Количество закупок относительно 2021 г. увеличилось на 63,7 %, относительно 2022 г. – на 13,7 %. В январе – сентябре 2024 г. были опубликованы 85 тендеров на закупку данного товара; большое количество тендеров на закупку морских водорослей являются государственными – 57,7 % от общего числа закупок (данные агентства ГидМаркет за 2024 г.). В России ламинария востребована, но объемы потребления незначительны, так как для основной части населения этот продукт не стал повседневным, что подтверждается данными статистики. Россия добывает примерно 37 тыс. т ламинарии (в Китае, например, добыча составляет 23 млн т, где основную долю составляет аквакультура⁹).

Мурманская область является перспективным туристическим регионом Российской Федерации, в котором сформировалось несколько устойчивых направлений развития туризма: горный кластер, экотуризм; рыболовство и охота; промышленный туризм; морские путешествия на ледоколах к Северному полюсу; "охота за северным сиянием".

Специалистами региона в сфере общественного питания удалось создать бренд "арктическая кухня" с опорой на традиции поморской и национальной саамской кухни, в который удачно интегрированы оригинальные рецепты широкого ассортимента блюд из рыбы и морепродуктов (в том числе камчатского краба), добываемых в арктических морях (Баренцевом и Белом), а также в Северной Атлантике. Арктическая кухня широко представлена традиционными блюдами из мяса дичи и домашнего оленя, дикоросов Кольского полуострова (северных ягод брусники, вороники, черники, морошки), а также красной рыбы (семги и форели радужной, выращиваемых на аквафермах Мурманской области), добываемых на побережье Мурманского полуострова (исландского гребешка и кукумари), а также ракообразных (северной креветки и крабов камчатского и стригуна (опилио)). Арктическая кухня представлена также популярными у туристов продуктами питания так называемой сувенирной линейки – широким ассортиментом шоколада с добавлением ягеля и баренцевоморских и беломорских водорослей (ламинарии и фукуса), соусами, джемами и вареньем на основе морошки, брусники и черники, сосновых шишек. Однако в сегменте популярных у туристов и населения области мучных изделий арктическая кухня представлена только имбирными пряниками, которые изготавливают по традиционному рецепту и украшают росписью по глазури с сюжетами на арктическую тему. Расширить ассортимент мучных изделий в сегменте продуктов арктической кухни, предназначенных для туристов и повседневного потребления населением Мурманской области и направленных на профилактику заболеваний, обусловленных вредными природно-климатическими факторами Заполярья, возможно за счет традиционного мучного изделия поморской кухни – калиток.

Для обоснования целесообразности расширения ассортимента мучных рыбных кулинарных изделий, обогащенных йодом, были проведены исследования по изучению и анализу мнения и мотиваций потребителей г. Мурманска в отношении изучаемой группы продуктов питания, а также полевое исследование розничного рынка г. Мурманска на материале предприятий федеральных и региональных торговых сетей.

⁸ Commercial Seaweed Market Size – By Product (Brown, Red, Green), By Form (Dry, Wet), By End User (Animal Feed, Food, Biofuels, Pharma & Personal Care) & Forecast, 2024–2032 // Global Market Insights Inc. URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/commercial-seaweed-market>.

⁹ Сектору водорослей в России намечают путь развития. 2024 г. // Fishnews. Online. URL: <https://fishnews.ru/news/50848?ysclid=ma2ez7cxmo184183508pdf>.

Результаты исследования розничного рынка рыбных кулинарных изделий в г. Мурманске представлены на рис. 1 в виде диаграммы; на основе этих результатов можно сделать вывод о тенденциях развития розничного рынка Мурманской области.

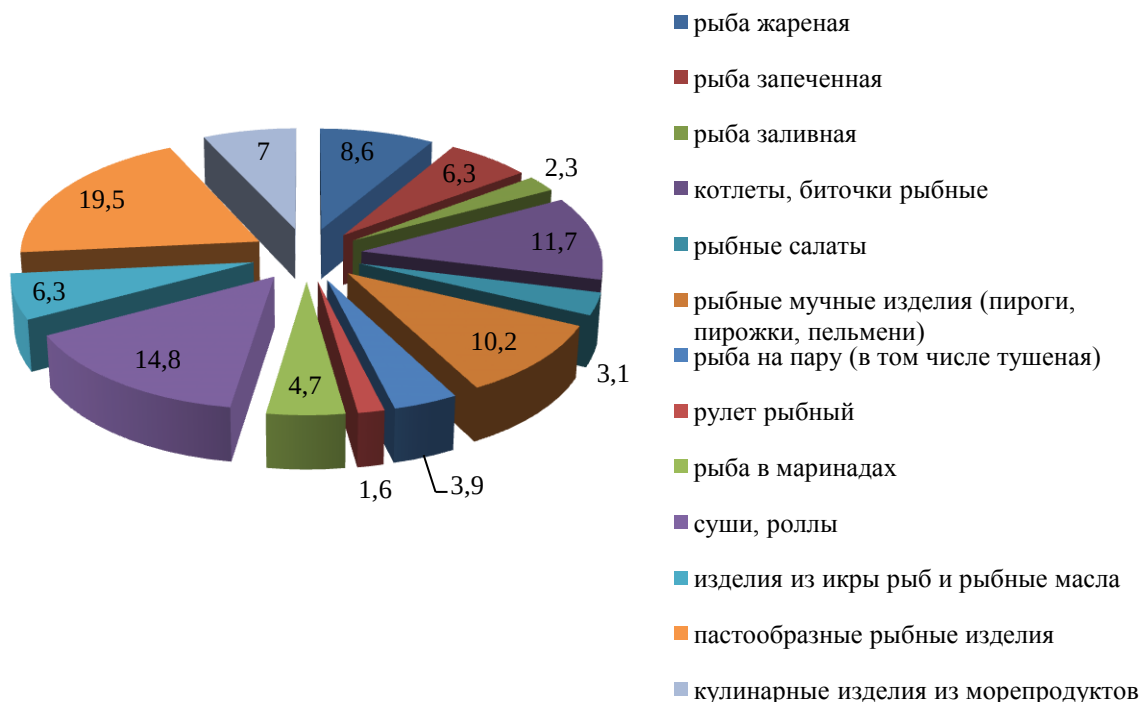


Рис. 1. Сегментация рынка рыбных кулинарных изделий в г. Мурманске
Fig. 1. Segmentation of the market of fish culinary products in Murmansk

Коэффициент широты ассортимента рыбных кулинарных изделий составляет 88,9 % от принятой базы (в доступных для анализа нормативно-технических документах), что свидетельствует о достаточной насыщенности изучаемого сегмента рынка. Около 27 % всех наименований рыбных кулинарных изделий, представленных на потребительском рынке г. Мурманска, приходится на долю холодных рыбных блюд (салаты, суши и роллы, рыба заливная, рыба в маринаде, рулеты рыбные). Наибольшую долю в изучаемом ассортименте рыбных кулинарных изделий занимают пастообразные рыбные изделия (риеты, паштеты, крем-фиши и т. п.) – 19,5 %. При этом суммарная доля горячих рыбных блюд и закусок (рыба жареная, запеченная, на пару) составила чуть меньше – 18,8 %. На долю рыбных мучных изделий (пироги, пирожки и рыбные пельмени) приходится в настоящее время всего около 10 % от общего ассортиментного перечня. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о несоответствии структуры предложения регионального рынка рыбных кулинарных изделий потребительским предпочтениям, выявленным в ходе исследования. В особенности этот спрос не удовлетворен в сегменте рыбных мучных кулинарных изделий, актуальное предложение которых на розничном рынке ограничено рыбными пирогами с треской, палтусом и печеной сельдью, а также традиционными пирожками с рыбной начинкой (рыбниками с палтусом) и рыбными пельменями в ассортименте.

Потребительские предпочтения изучали методом анонимного письменного анкетирования¹⁰ (*Рациональное питание...*, 2022). В опросе участвовало свыше 60 респондентов, из которых 92 % ответили положительно на фильтр-вопрос (регулярное употребление/приобретение рыбных кулинарных изделий). Таким образом, процентное распределение вариантов ответов приведено к показателю 46, принятому за 100 % (респондентская база опроса). В опросе участвовали женщины (52 %), мужчины (48 %); почти половина опрошиваемых – в возрасте 40–55 лет, около 40 % – 25–39 лет, 8 % респондентов были в возрасте до 24 лет и почти 5 % – старше 56 лет. По результатам анкетирования выявлено, что больше 95 % опрошиваемых имеют работу, у 80 % уровень заработной платы составляет 40–50 тыс. рублей.

В ходе анкетирования установлен достаточно стабильный и умеренно высокий спрос на рыбные кулинарные изделия. Суммарно свыше 56 % респондентов ответили, что приобретают (готовы приобрести)

¹⁰ Шокина Ю. В. Практикум по разработке новых продуктов питания и проектной деятельности на предприятиях пищевой и перерабатывающей промышленности. Мурманск, 2016. 140 с.

рыбную кулинарию от одной-двух покупок в месяц до еженедельной одной покупки. При этом довольно большое количество респондентов (свыше 40 %) являются потенциальными потребителями рыбной кулинарии, поскольку приобретают данную продукцию "редко, по случаю". Соответствующая рекламная работа и промоакции способны привлечь часть этой аудитории к активным покупкам рыбных кулинарных изделий. Результаты обработки анкет по вопросу частоты приобретения рыбных кулинарных изделий респондентами, участвующими в опросе, представлены на рис. 2.

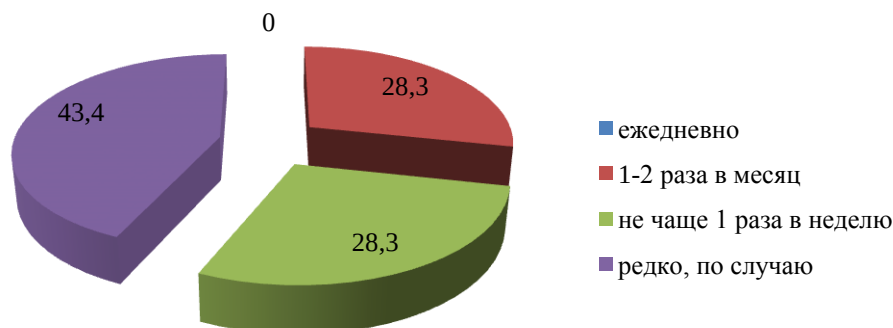


Рис. 2. Диаграмма частоты покупок рыбных кулинарных изделий,
% от общего числа участников опросам

Fig. 2. The frequency of purchase of fish culinary products by respondents participating in the survey, in % of the total number of survey participants

Интересен вывод, который сделан по результатам анализа мотивации приобретения рыбных кулинарных изделий в сравнении с приобретением кулинарных изделий общей укрупненной категории "кулинарные изделия", включая мясные и овощные (рис. 3).

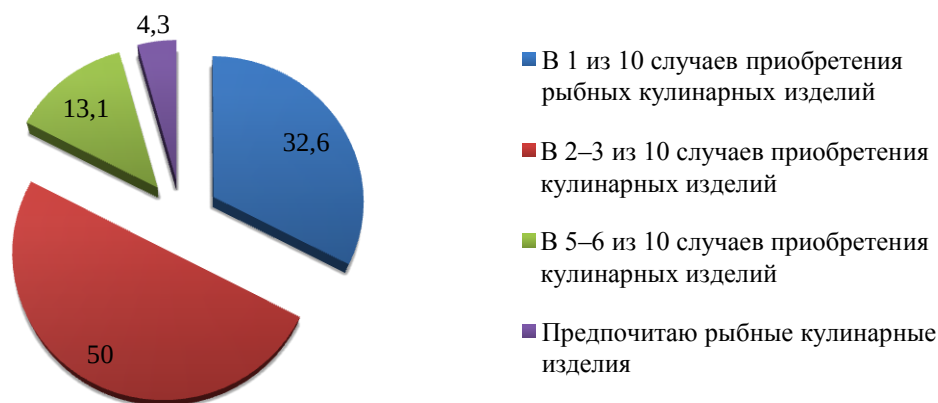


Рис. 3. Диаграмма желательности приобретения рыбных кулинарных изделий,
% от общего числа участников опроса

Fig. 3. Desirability of purchasing fish culinary products within the general enlarged category "culinary products", in % of the total number of survey participants

Из рис. 3 следует, что на долю рыбных кулинарных изделий приходится половина всех приобретаемых кулинарных изделий среди опрошенных респондентов, что формирует оптимистичный прогноз в отношении расширения ассортимента рыбных кулинарных изделий для населения Мурманской области и жителей областного центра. При этом важно, что суммарно 84,8 % респондентов готовы увеличить долю кулинарных изделий из рыбы в своем рационе при условии появления на прилавках изделий, обогащенных ценными пищевыми компонентами: витаминами, микро- и макроэлементами, биологически-активными веществами, пробиотиками и т. п. (рис. 4).

Установлено, что потребители проявляют высокую заинтересованность в расширении ассортимента рыбных кулинарных изделий, в том числе мучных, за счет изделий, обогащенных ценными пищевыми

веществами (витаминами, микро- и макроэлементами, биологически-активными веществами, иммунопротекторами и иммуномодуляторами, пробиотиками и т. п.) и направленных на профилактику заболеваний, обусловленных вредными природно-климатическими факторами проживания в условиях Арктической зоны РФ¹¹.

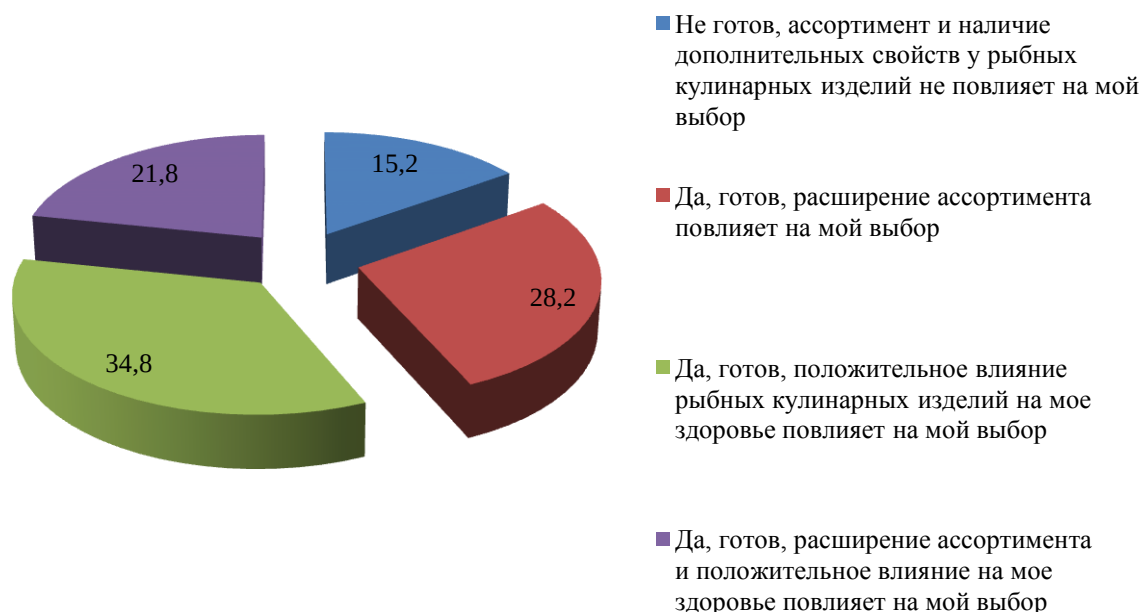


Рис. 4. Диаграмма готовности респондентов увеличить долю приобретаемых рыбных кулинарных изделий для личного потребления, % от общего числа участников опроса
Fig. 4. Willingness to increase the share of purchased fish culinary products for personal consumption among respondents, in % of the total number of survey participants

Поморская калитка представляет собой комбинированное мучное изделие, состоящее из основы – фигурной калитки (корзинки) из ржаного бездрожжевого теста, в которую помещена начинка из картофельного пюре или пшенной каши¹². Таким образом, базовое мучное изделие позволяет легко формировать производственную ассортиментную линейку за счет расширения рецептур начинок. Традиционная (базовая) технология изготовления калиток предусматривает замес теста на основе ржаной муки, соли, разрыхлителя и сметаны низкой жирности, с последующей непродолжительной (до 40 мин) выдержкой при температуре 6–8 °С. Готовое тесто формуют в колбаску, которую порционируют на заготовки массой 40 ± 5 г и раскатывают тонко в округлые лепешки толщиной не более 2–3 мм. Подготовленную начинку калиток (картофельное пюре или пшенную кашу) помещают порциями 70 ± 5 г в середину лепешки, разравнивают и формуют калитку, защипывая ржаную лепешку по краям и формируя тем самым бортик калитки. Выпекают калитки при температуре 180 °С до готовности около 15 мин, не допуская пригара начинки.

Базовую технологию поморской калитки предлагается усовершенствовать с учетом выявленных на этапе маркетингового исследования потребительских предпочтений и передовых тенденций производства обогащенных продуктов питания под брендом "арктическая кухня" следующим образом. В состав традиционного рецепта ржаного теста следует ввести ламинарию пищевую сушеную в виде порошка с частицами размером не более 200 мкм (производства Архангельского водорослевого комбината) в количестве, обеспечивающем в готовом изделии содержание йода на уровне не менее 50 % суточной нормы потребления и статус изделия "обогащенное йодом". Ламинария пищевая сушеная в виде порошка рассматривается

¹¹ См.: Методические рекомендации 2.3.1.0253-21. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 22 июля 2021 г.). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/>; Обзор ВЭД: готовая продукция из рыбы и морепродуктов, 2021 // Федеральный центр развития экспорта продукции АПК Минсельхоза России. URL: <https://aemcx.ru/reviews/obzor-ved-gotovaya-produkcziya-iz-ryby-i-m/>.

¹² Сборник технологических нормативов. Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий для предприятий общественного питания : в 2 ч. / под ред. Н. А. Лупея. Ч. 2. Москва, 1997. С. 514. (Рецептура 840).

в предлагаемой усовершенствованной технологии в качестве функционального пищевого ингредиента – источника органического легко усваиваемого организмом человека йода (Шокина и др., 2023). Количество добавляемой в виде порошка сушеной ламинарии определено расчетным путем исходя из установленной экспериментально массовой доли йода в сушеной ламинарии. Массовую долю йода в порошке ламинарии беломорской определяли экспериментально фотоколориметрическим методом по ГОСТ 26185-84 "Водоросли морские, травы морские и продукты их переработки. Методы анализа"¹³. Количество введенной в муку ламинарии было таким же, как и для разработанного ранее мучного изделия "Хлебцы с прованскими травами, обогащенные йодом" (Савкина и др., 2024б).

Начинку для калиток разрабатывали на основе использования вторичного пищевого сырья [фарша пищевого кулинарного из отходов от разделки лососевых рыб (форели радужной и семги) на филе высшей категории] и включения растительного ингредиента (моркови) с целью сбалансировать состав новых начинок по основным пищевым нутриентам: белкам, жирам и углеводам. Для снижения избыточной оводненности начинки мучного изделия из ржаного теста, возникающей вследствие теплового денатурационного воздействия на рыбные белки, использовали в оптимальной дозировке комплексную пищевую добавку, обладающую функциональными свойствами водосвязывающего и структурообразующего агента. Данное технологическое решение позволяет существенно снизить себестоимость готовых изделий за счет уменьшения стоимости основного сырья при сохранении качества и пищевой ценности изделий, а также обеспечивает комплексную переработку ценного биологического ресурса, добываемого и выращиваемого в арктическом водном бассейне. В качестве водосвязывающего и структурообразующего агента предложено, по результатам обзора научной и технической литературы, использовать комплексную пищевую добавку H-Serval80, производимую компанией "Ваш технолог" (Россия, Санкт-Петербург) и обладающую необходимыми функциональными свойствами. На рис. 5 представлена технологическая схема изготовления начинки для рыбного мучного кулинарного изделия "Калитки по-мурмански" с красной рыбой и морковью.

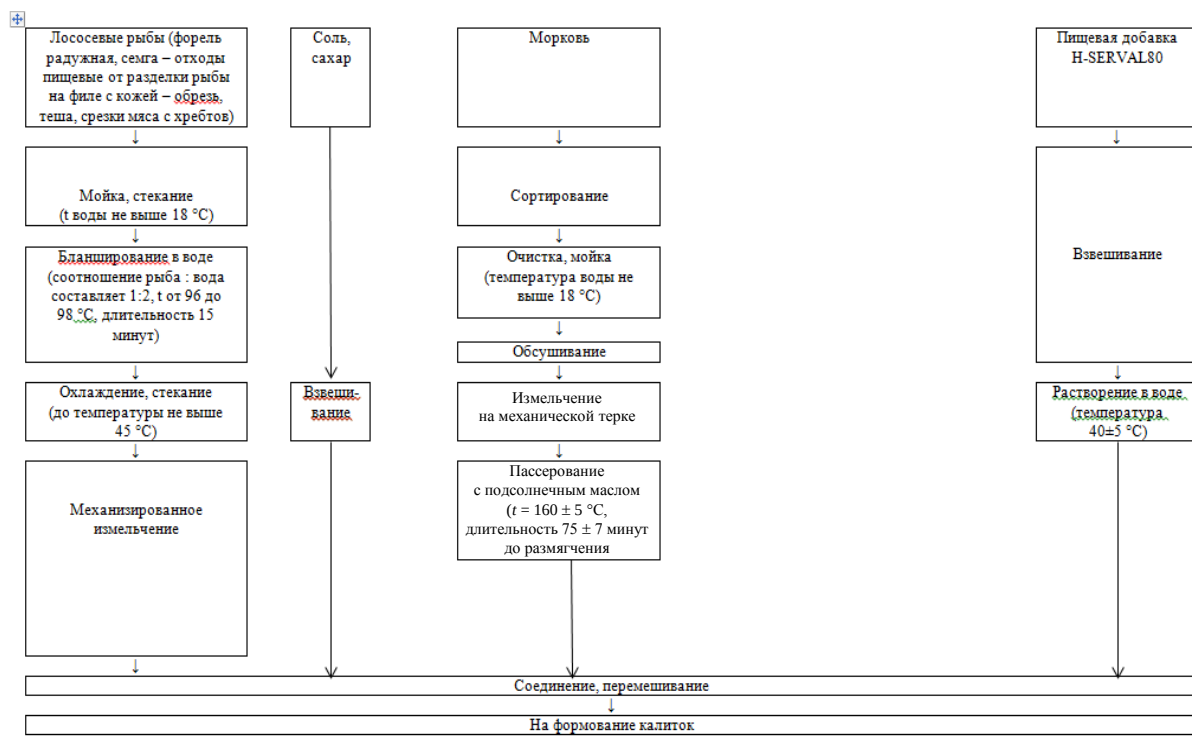


Рис. 5. Технологическая схема изготовления начинки для рыбного мучного кулинарного изделия "Калитки по-мурмански" с красной рыбой и морковью, обогащенного йодом

Fig. 5. Technological scheme of making fillings for fish flour culinary product "Kalitky po murmansky" with red fish and carrots, enriched with iodine

Рецептура ржаного теста для изготовления калиток, учитывающая внесение обогащающего готовое изделие йодом функционального пищевого ингредиента, приведена в табл. 1, где указаны рекомендуемые нормы закладки теста и начинки при изготовлении изделий "Калитки по-мурмански" с красной рыбой и морковью, обогащенных йодом.

¹³ ГОСТ 26185-84. Водоросли морские, травы морские и продукты их переработки. Методы анализа. Введен 01.01.1985. С изменением № 1 (ИУС 1-2018). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200022234>.

Таблица 1. Рецепт ржаного теста для рыбного мучного кулинарного изделия "Калитки по-мурмански" с красной рыбой и морковью, обогащенного йодом
Table 1. Recipe of rye dough for fish flour culinary product "Kalitky po murmanskyy" with red fish and carrots, enriched with iodine

Сырье	Масса, кг на 100 кг теста	
	Брутто	Нетто
Мука ржаная хлебопекарная	52,0	51,4
Соль	1,3	1,3
Разрыхлитель	1,3	1,3
Ламинария пищевая сушеная (порошок с частицами размером менее 200 мкм)*	3,0	3,0
Сметана (жирность 10 %)	43,4	43,0
Выход теста	–	100,0

Примечание. *Масса ламинарии рассчитана с учетом имеющихся в литературе данных о ее химическом составе, содержании йода (110 мг/кг) и потерях йода при тепловой обработке запеканием (Савкина и др., 2023).

Разработку рецептуры начинки новых рыбных мучных кулинарных изделий, обогащенных йодом, проводили с помощью метода автоматизированного проектирования рецептур многокомпонентных пищевых продуктов, основанного на современном математическом методе планирования эксперимента (методе нечетких множеств) и реализованного в программной среде MatLab (модуль нечеткой логики Fuzzy Logic).

В соответствии с алгоритмом метода была разработана матрица эксперимента и выбраны параметр оптимизации и влияющие факторы, ограничена область исследуемого факторного пространства. Параметром оптимизации выбрана органолептическая оценка (суммарный балл) калиток с использованием разработанной пятибалльной шкалы. Влияющими факторами определены компоненты рецептуры, в наибольшей степени формирующие органолептические свойства изделия:

- массовая доля моркови пассерованной измельченной, % от массы нетто двухкомпонентной смеси "рыба – морковь" в составе начинки изделия (X_1);
- массовая доля пищевой добавки H-Serval80, % от массы нетто начинки изделия в сырьевом наборе (X_2).

Критерий оптимальности – достижение максимально возможной органолептической оценки калиток в выбранном диапазоне значений влияющих факторов. Массовую долю моркови пассерованной измельченной варьировали от 20 до 50 % от массы нетто двухкомпонентной смеси "рыба – морковь" в составе начинки изделия. Варьирование доли пассерованной измельченной моркови в ходе экспериментов осуществляли за счет пропорционального изменения доли измельченного мяса бланшированной красной рыбы (форели радужной или семги) в составе двухкомпонентной смеси "рыба – морковь" (100 %) при сохранении постоянства массы нетто двухкомпонентной смеси "рыба – морковь" в составе начинки изделия до финальной тепловой обработки изделия (запекания). Массовую долю пищевой добавки H-Serval80 варьировали от 3 до 5 % от массы нетто начинки изделия.

На рис. 6 представлены результаты органолептической оценки опытных образцов изделий, изготовленных по пяти вариантам рецептур начинки.

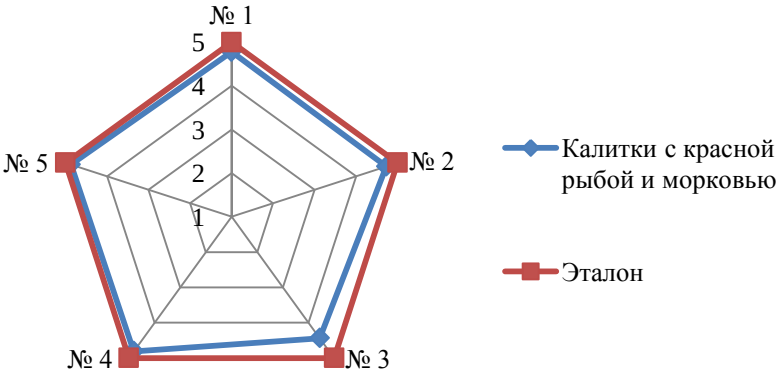


Рис. 6. Профилограмма органолептической оценки опытных образцов изделий "Калитки по-мурмански" с красной рыбой и морковью, обогащенных йодом
Fig. 6. A profilogram of the organoleptic evaluation of prototypes of products "Kalitky po murmanskyy" with red fish and carrots, enriched with iodine, all variants of formulations

После обработки экспериментальных данных в программе MatLab получены результаты в виде поверхности отклика (рис. 7).

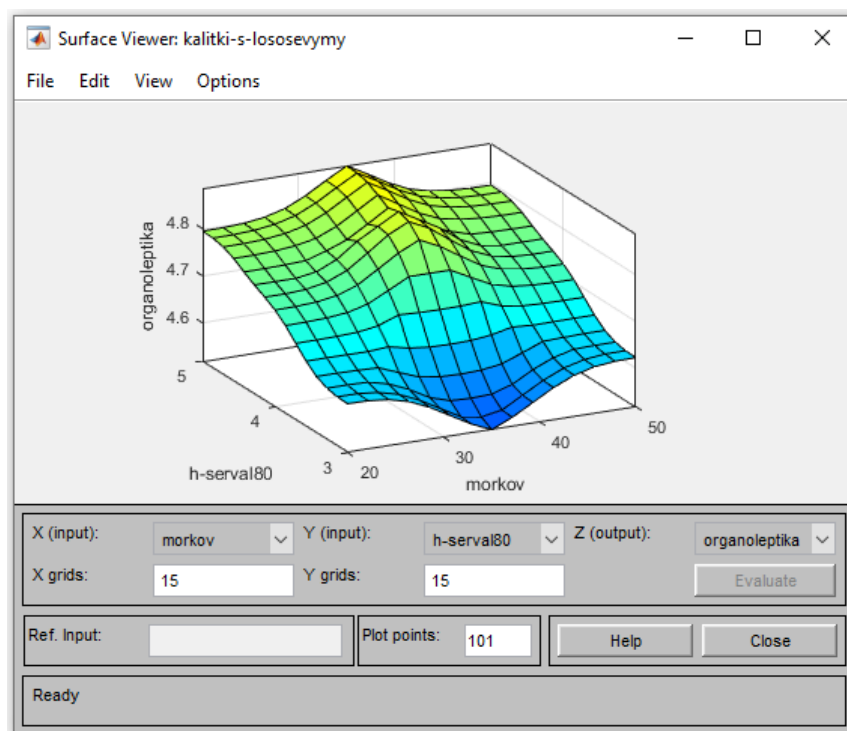


Рис. 7. Поверхность отклика (скриншот пользовательского экрана)

Fig. 7. Response surface, screenshot of the user screen

Разработанная оптимальная рецептура начинки изделия приведена в табл. 2.

Таблица 2. Оптимальная рецептура начинки рыбного мучного кулинарного изделия "Калитки по-мурмански" с красной рыбой и морковью, обогащенного йодом
Table 2. The optimal recipe for the filling of the fish flour culinary product "Kalitky po murmanskyy" with red fish and carrots, enriched with iodine

Компонент	Масса, кг на 100 кг начинки	
	Брутто	Нетто
Красная рыба мороженая* (фарш пищевой кулинарный, полученный из форели радужной и семги – срезков мяса с хребтов, теши, рыбы с механическими повреждениями)	232,0	39,51
Выход полуфабриката после предварительной тепловой обработки	–	39,3
Морковь свежая столовая**	73,0	39,2
Соль	1,5	1,5
Сахар	1,0	1,0
Пищевая добавка H-Serval80	4,0	4,0
Вода (для растворения пищевой добавки)	15,0	15,0
Выход полуфабриката	–	100,0

Примечание. *Масса красной рыбы рассчитана с учетом потерь при размораживании (2 %), бланшировании пищевых отходов от разделки красной рыбы на филе (20 %), отделении мяса от костей, кожи, чешуи, мойке (78 %), измельчении (1 %). **Масса моркови определена с учетом потерь при очистке (20 %), пассеровании и измельчении (32 %).

Заключение

Таким образом, в результате исследования:

1) осуществлен обоснованный выбор:

- источника органического йода – функционального пищевого ингредиента для последующего использования в технологии рыбных мучных кулинарных изделий – ламинарии пищевой сушеной в виде порошка с частицами размером не более 200 мкм (производства Архангельского водорослевого комбината);
- базовой технологии изготовления новых рыбных мучных кулинарных изделий, обогащенных йодом;

2) предложено технологическое решение по усовершенствованию базовой технологии изготовления рыбных изделий;

3) спроектирована автоматизированным способом с использованием современного математического метода оптимальная рецептура нового рыбного мучного кулинарного изделия "Калитки по-мурмански" с морковью и красной рыбой, обогащенного йодом.

Подводя итоги на начальном этапе исследований, можно сделать вывод о том, что включение в состав базовых рецептов мучных рыбных кулинарных изделий повседневного спроса обогащающего ингредиента позволяет существенно расширить ассортимент высоко востребованных на современном российском рынке продуктов питания, направленных на коррекцию проблем с рационом и профилактику социально значимых неинфекционных заболеваний.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Научно-образовательного центра мирового уровня "Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования" в 2024 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Васюкова А. Т., Кусова И. У., Бондаренко Ю. В. Повышение качества мучных кулинарных изделий // Аграрная наука в обеспечении продовольственной безопасности и развитии сельских территорий : сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф., г. Луганск, 17 января – 08 февраля 2023 г. / под общ. ред. В. П. Матвеева. Луганск : ГОУ ВО ЛНР ЛГАУ, 2023. С. 89–91. EDN: VVFYVI.
- Елисеева С. А., Фахретдинова А. Д., Гусева А. И., Киреева М. С. Обогащение мучных кулинарных изделий альгинатом магно // Эффективный менеджмент здравоохранения: стратегии инноваций : IV Междунар. науч.-практ. конф., Саратов, 5–6 октября 2023 г. : сб. материалов / ред. коллегия : А. С. Федонников, И. Г. Новокрещенова, М. В. Еругина [и др.]. Саратов : Сарат. гос. мед. ун-т, 2023. EDN: HEWLQD.
- Ипатова А. А. Обзор российского рынка рыбы. 2017–2019 // Российский продовольственный рынок. 2020. № 3. URL: <https://foodmarket.spb.ru/archive/2020/991/3647/>.
- Кароматов И. Д., Ашурова Н. Г., Амонов К. У. Ламинария, морская капуста // Биология и интегративная медицина. 2017. № 2. С. 194–213. EDN: YJMBRL.
- Лебедева Е. Ю., Касьянов Г. И. Инновационные технологии переработки комбинированного рыбного и растительного сырья // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2022. № 2(74). С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.21443/1812-9498-2022-2-24-30>. EDN: NJCJUR.
- Панкратов Г. Н., Мелешкина Е. П., Витол И. С., Коломиец С. Н. [и др.]. Комплексный подход к обогащению мучных изделий // Пищевая промышленность. 2022. № 10. С. 22–26. DOI: <https://doi.org/10.52653/rri.2022.10.10.005>. EDN: BZAQKN.
- Подкорытова А. В., Рощина А. Н. Морские бурые водоросли – перспективный источник БАВ для медицинского, фармацевтического и пищевого применения // Труды ВНИРО. 2021. Т. 186. № 4. С. 156–172. DOI: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-186-156-172>. EDN: OSXXMZ.
- Рациональное питание. Теория и практика / сост. Ю. В. Шокина. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 140 с.
- Савкина К. Н., Антонов П. В., Шокина Ю. В. Разработка рецептуры мучных изделий, обогащенных йодом ламинарии беломорской // Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации : материалы VI Нац. науч.-техн. конф., Владивосток, 22 декабря 2022 г. Владивосток : Дальрыбвтуз, 2023. С. 302–308. EDN: IJYXYP.
- Савкина К. Н., Новожилова Е. А., Симутина Н. Н., Шокина Ю. В. Обоснование и разработка технологии продукции, обогащенной йодом ламинарии беломорской // Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации : материалы VII Нац. науч.-техн. конф., г. Владивосток, 22 декабря 2023 г. Владивосток : Дальрыбвтуз, 2024а. С. 126–133. DOI: [10.48612/dalrybvtuz/NNTK2023-11](https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/NNTK2023-11). EDN: NOBLEO.
- Савкина К. Н., Шокина Ю. В. Разработка технологии производства обогащенного йодом мучного изделия // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., г. Феодосия, 19–22 мая 2024 г. Керчь : КГМУ, 2024б. С. 283–288. EDN: GICJYN.
- Шокина Ю. В., Савкина К. Н., Симутина Н. Н., Василевич В. В. [и др.]. Ламинария производства Архангельского водорослевого комбината в технологиях продуктов питания, обогащенных йодом: опыт разработки и перспективы коммерциализации // Рыбное хозяйство. 2023. № 1. С. 102–108. DOI: <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2023-1-102-108>. EDN: JKJXRU.

- Délérís P., Nazih H., Bard J.-M. Seaweeds in Human Health. In *Seaweed in health and disease prevention*. Monograph. Eds.: J. Fleurence, I. Levine. Academic Press, 2016. P. 319–367. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802772-1.00010-5>. (Chapter 10).
- Freitas A. C., Pereira L., Rodrigues D., Carvalho A. P. [et al.]. *Marine Functional Foods // Springer Handbook of Marine Biotechnology* / eds.: S. K. Kim. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. P. 969–994. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-53971-8_42.
- Nova P., Martins A. P., Teixeira C., Abreu H. [et al.]. Foods with microalgae and seaweeds fostering consumers health: A review on scientific and market innovations // *Journal of Applied Phycology*. 2020. Vol. 32. P. 1789–1802. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02129-w>.
- Nova P., Pimenta-Martins A., Laranjeira Silva J., Silva A. M. [et al.]. Health benefits and bioavailability of marine resources components that contribute to health – *what's new?* // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020a. Vol. 60, Iss. 21. P. 680–3692. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1704681>.
- Vatandoust A., Krishnaswamy K., Li Y. O., Diosady L. Triple fortification of salt with iron, iodine and zinc oxide using extrusion // *Journal of Food Engineering*. 2023. Vol. 339. Article number: 111258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111258>.
- Wang H.-M. D., Li X.-C., Lee D.-J., Chang J.-S. Potential biomedical applications of marine algae // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 244, Part 2. P. 1407–1415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.198>.
- Wells M. L., Potin P., Craigie J. S., Raven J. A. [et al.]. Algae as nutritional and functional food sources: Revisiting our understanding // *Journal of Applied Phycology*. 2017. Vol. 29. P. 949–982. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0974-5>.

References

- Vasyukova, A. T., Kusova, I. U., Bondarenko, Yu. V. 2023. Improving the quality of flour culinary products. Proceedings of the IV Intern. scientific and practical conf. *Agrarian Science in Ensuring Food Security and Rural Development*, Lugansk, 17 January – 8 February, 2023. Lugansk, pp. 89–91. EDN: VVFYVI. (In Russ.)
- Eliseeva, S. A., Fahretdinova, A. D., Guseva, A. I., Kireeva, M. S. 2023. Enrichment of flour culinary products with magnesium alginate. Proceedings of the IV Intern. scientific and practical conf. *Effective healthcare management: Innovation strategies*, Saratov, 5–6 October, 2023. Saratov. EDN: HEWLQD. (In Russ.)
- Ipatova, A. A. 2020. Review of the Russian fish market. 2017–2019. *Russian Food & Drinks Market Magazine*, 3. URL: <https://foodmarket.spb.ru/archive/2020/991/3647/>. (In Russ.)
- Karomatov, I. D., Ashurova, N. G., Amonov, K. U. 2017. Kelp, sea cabbage. *Biology and Integrative Medicine*, 2, pp. 194–213. EDN: YJMBRL. (In Russ.)
- Lebedeva, E. Y., Kasyanov, G. I. 2022. Innovative technologies for processing combined fish and vegetable raw materials. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2(74), pp. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2022-2-24-30>. EDN: NJCJUR. (In Russ.)
- Pankratov, G. N., Meleshkina, E. P., Vitol, I. S., Kolomiets, S. N. 2022. An integrated approach to the enrichment of flour products. *Food Industry*, 10, pp. 22–26. DOI: <https://doi.org/10.52653/ppi.2022.10.10.005>. EDN: BZAQKN. (In Russ.)
- Podkorytova, A. V., Roshchina, A. N. 2021. Sea storms – a pioneering source for medical, pharmaceutical and written applications. *Trudy VNIRO*, 186(4), pp. 156–172. DOI: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2021-186-156-172>. EDN: OSXXMZ. (In Russ.)
- Rational nutrition. Theory and practice. 2022. Comp. by Yu. V. Shokina. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Savkina, K. N., Antonov, P. V., Shokina, Yu. V. 2023. Development of the formulation of flour products enriched with iodine of kelp of the White Sea. Proceedings of the VI Scientific and Technical National Conf. *Innovative development of the fishing industry in the context of ensuring food security of the Russian Federation*, Vladivostok, 22 December, 2022. Vladivostok, pp. 302–308. EDN: IJYXYP. (In Russ.)
- Savkina, K. N., Novozhilova, E. A., Simutina, N. N., Shokina, Yu. V. 2024a. Substantiation of technology and development of products enriched with iodine of White Sea kelp. Proceedings of the VII Scientific and Technical National Conf. *Innovative development of the fishing industry in the context of ensuring food security of the Russian Federation*, Vladivostok, 22 December, 2023. Vladivostok, pp. 126–133. DOI: [10.48612/dalrybvtuz/NNTK2023-11](https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/NNTK2023-11). EDN: NOBLEO. (In Russ.)
- Savkina, K. N., Shokina, Yu. V. 2024b. Development of technology for the production of iodine-enriched flour products. Proceedings of the V Scientific and Technical National Conf. *Innovative areas of integration of science, education and production*, Feodosiya, 19–22 May, 2024. Kerch, pp. 283–288. EDN: GICJYH. (In Russ.)
- Shokina, Yu. V., Savkina, K. N., Simutina, N. N., Vasilevich, V. V. 2023. Laminaria produced by the Arkhangelsk Algae Combine in iodine-enriched food technologies: Development experience and prospects for commercialization. *Fisheries*, 1, pp. 102–108. DOI: <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2023-1-102-108>. EDN: JKJXRU. (In Russ.)
- Délérís P., Nazih H., Bard J.-M. 2016. Seaweeds in Human Health. In *Seaweed in health and disease prevention*. Monograph. Eds.: J. Fleurence, I. Levine. Academic Press, pp. 319–367. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802772-1.00010-5>. (Chapter 10).

- Freitas, A. C., Pereira, L., Rodrigues, D., Carvalho, A. P. et al. 2015. Marine functional foods. Springer Handbook of Marine Biotechnology. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 969–994. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-53971-8_42.
- Nova, P., Martins, A. P., Teixeira, C., Abreu, H. et al. 20206. Foods with microalgae and seaweeds fostering consumers health: A review on scientific and market innovations. *Journal of Applied Phycology*, 32, pp. 1789–1802. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02129-w>.
- Nova, P., Pimenta-Martins, A., Laranjeira Silva, J., Silva, A. M. et al. 2020a. Health benefits and bioavailability of marine resources components that contribute to health – *what's new?* *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(21), pp. 680–3692. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1704681>.
- Vatandoust, A., Krishnaswamy, K., Li, Y. O., Diosady, L. 2023. Triple fortification of salt with iron, iodine and zinc oxide using extrusion. *Journal of Food Engineering*, 339. Article number: 111258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111258>.
- Wang, H.-M. D., Li, X.-C., Lee, D.-J., Chang, J.-S. 2017. Potential biomedical applications of marine algae. *Bioresource Technology*, 244, Part 2, pp. 1407–1415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.198>.
- Wells, M. L., Potin, P., Craigie, J. S., Raven, J. A. et al. 2017. Algae as nutritional and functional food sources: Revisiting our understanding. *Journal of Applied Phycology*, 29, pp. 949–982. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0974-5>.

Сведения об авторах

Савкина Ксения Николаевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, аспирант, мл. науч. сотрудник;
e-mail: savkinakn2@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4723-2522>

Kseniya N. Savkina – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, PhD Student, Junior Researcher;
e-mail: savkinakn2@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4723-2522>

Щегинский Всеволод Владимирович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, аспирант;
e-mail: seva-7149@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3286-6760>

Vsevolod V. Shchetinsky – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Researcher;
e-mail: seva-7149@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3286-6760>

Тихонова Полина Алексеевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, аспирант;
e-mail: norsun90@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0521-0212>

Pavlina A. Tihonova – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, PhD Student;
e-mail: norsun90@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0521-0212>

Шокина Юлия Валерьевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: shokinayu@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6513-1912>

Yulia V. Shokina – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: shokinayu@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6513-1912>

УДК 664.6:658.5:664.8

Анализ качественных и технико-экономических показателей технологии производства пакетированных мясокостных бульонов длительного хранения

О. С. Фоменко*, Ф. Я. Рудик

**Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова, г. Саратов, Россия;*

e-mail: fomenkoos@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2700-3119>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
12.03.2025;

получена
после доработки
21.04.2025;

принята
к публикации
12.05.2025

Ключевые слова:

пакетированные
бульоны,
экономическая
эффективность,
бактерицидная
обработка,
микробиологическая
безопасность,
рентабельность

Для цитирования

Статья содержит анализ технологических и экономических аспектов производства пакетированных мясокостных бульонов длительного хранения. Исследование фокусируется на сравнении традиционной технологии и новой методики, интегрирующей ультрафиолетовую обработку сырья и ультразвуковую обработку готового продукта. Оценка включает микробиологические показатели, себестоимость производства и его рентабельность. Исследование показало, что применение предварительной УФ амальгамной обработки мясокостного сырья в сочетании с ультразвуковой гомогенизацией и стерилизацией готового бульона обеспечивает значительное сокращение времени достижения микробиологической безопасности с 11 до 1 часа. Использование данной технологии позволило снизить себестоимость продукции на 33,7 %, при этом рентабельность производства увеличилась с 316,4 до 528,7 %. В исследовании также анализируются затраты на создание и эксплуатацию поточно-технологической линии, что позволяет оценить ее экономическую эффективность в целом. Результаты исследования подтверждают экономическую целесообразность внедрения новой технологии в пищевую промышленность, что делает ее перспективной для повышения конкурентоспособности продукции на рынке. Экономический эффект обусловлен уменьшением затрат на производство, повышением длительности сохранности готового продукта.

Фоменко О. С. и др. Анализ качественных и технико-экономических показателей технологии производства пакетированных мясокостных бульонов длительного хранения. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 244–251. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-244-251>.

Analysis of quality and technical and economic indicators of the technology for the production of packaged meat and bone broths with long shelf life

Olga S. Fomenko*, Felix Ya. Rudik

**Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering
named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia;*

e-mail: fomenkoos@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2700-3119>

Article info

Received
12.03.2025;

received
in revised form
21.04.2025;

accepted
12.05.2025

Key words:

packaged broths,
economic efficiency,
bactericidal treatment,
microbiological safety,
profitability

For citation

Abstract

The paper contains the analysis of technological and economic aspects of the production of packaged meat-and-bone broths with long shelf life. The study focuses on comparing traditional technology with a new method that integrates ultraviolet treatment of raw materials and ultrasonic treatment of the finished product. The assessment includes microbiological indicators, production costs, and profitability. The study has demonstrated that the application of preliminary UV-amalgam treatment of meat-and-bone raw materials, combined with ultrasonic homogenization and sterilization of the finished broth, significantly reduces the time required to achieve microbiological safety from 11 to 1 hour. Furthermore, the use of this technology reduced production costs by 33.7 %, while profitability increased from 316.4 to 528.7 %. The study also analyzes the costs associated with creating and operating the flow-technological line, allowing for an overall evaluation of its economic efficiency. The results confirm the economic feasibility of implementing the new technology in the food industry, making it a promising solution for enhancing the competitiveness of products in the market. The economic benefits are driven by reduced production costs and extended shelf life of the finished product.

Fomenko, O. S. et al. 2025. Analysis of quality and technical and economic indicators of the technology for the production of packaged meat and bone broths with long shelf life. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 244–251. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-244-251>.

Введение

Разработанная поточно-технологическая линия в своей производственной направленности предназначена для выработки из мясокостного сырья пакетированного бульона длительного хранения. На этом основании данная линия характеризуется как совокупность различных последовательно связанных технологических операций и технических средств, взаимосвязанных единым технологическим процессом. Каждая отдельно взятая технологическая операция несет определенную функциональную направленность и на старте ее выполнения считается законченной, за ней в технологической последовательности начинается выполнение следующей операции с совершенно другим процессовым воздействием (*Линия...*, 2024) (рис.).

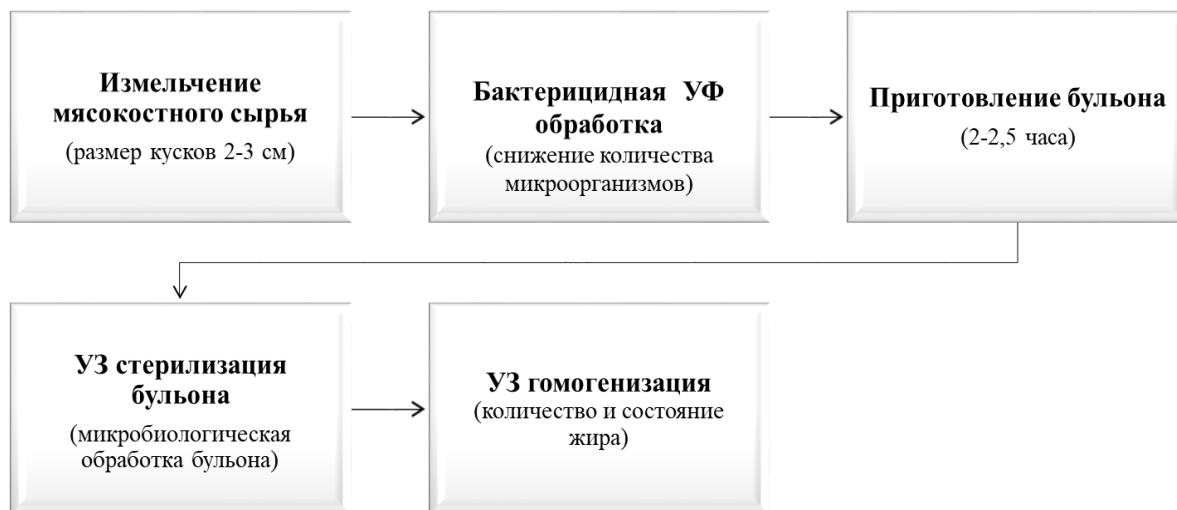


Рис. Операционная схема технологического процесса производства мясокостного бульона

Fig. Operational flow chart of the technological process of meat and bone broth production

Таким образом, оценка технологической эффективности должна быть осуществлена по следующим операциям:

- результаты бактерицидной обработки сырья (*Рудик и др., 2024a; Рудик и др., 2024б*);
- результаты времени выработки бульона на основе операций измельчения сырья и времени кипячения бульона (*Рудик и др., 2024в*);
- одновременное выполнение двух операций стерилизации и гомогенизации бульона ультразвуком.

Функциональная специфика технологических операций подтверждается в работах авторов (*Мауль и др., 2017; Моргунова и др., 2025; Narasym et al., 2020*).

Каждое из рассматриваемых операционных воздействий связано с получением промежуточных данных, обуславливающих достижение конечной цели (*Бурак и др., 2024*). В этой связи оптимальными признаны методы качественного анализа. В соответствии с ГОСТ 15467-79¹ качество продукции характеризуется в пищевой отрасли ее пригодностью удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением.

Операции технологического процесса по своей сути функционально отличаются и достаточно сложно их характеризовать общим показателем, а при качественном анализе допускается каждому потребителю формировать свои требования оценки качества продукции. Количественную характеристику одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, рекомендуется рассматривать применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления. При этом каждая из трех операций характеризуется параметром признака продукции, количественно характеризующего его свойство:

- бактерицидная обработка сырья, основным показателем является КМАФАнМ (КОЕ/см³);
- время, необходимое для выработки бульона, ч;
- стерилизация и гомогенизация, характеризуются показателем КМАФАнМ (КОЕ/см³).

В данном случае возможно использование дифференцированного показателя качества преобладающих показателей в отдельности с последующей, конечной, интеграцией суммарного положительного эффекта.

Цель работы – оценка технологической эффективности и экономической целесообразности новой поточно-технологической линии производства пакетированных мясокостных бульонов длительного хранения, интегрирующей ультрафиолетовую и ультразвуковую обработку, по сравнению с традиционной технологией

¹ ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. Дата актуализации 01.07.2023. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/31626?ysclid=maut4oi8uo519030913>.

на основе анализа микробиологических, технологических показателей, временных затрат, полной себестоимости и экономической эффективности производства.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись традиционная технология производства мясокостного бульона и разработанный авторами инновационный технологический процесс производства пакетированных мясокостных бульонов длительного хранения, а также бульоны, приготовленные по предлагаемым технологическим решениям. Основное внимание уделялось сравнительному анализу технологических параметров, микробиологической безопасности и экономической эффективности продукции. УФ-обработка мясокостного сырья осуществлялась с использованием бактерицидного ультрафиолетового излучателя "Светолит-50 (90)", оснащенного УФ амальгамной лампой типа АНЦ 170/70-ПЗ-3. Основные параметры и режимы обработки включали: длина волны 253,7 нм, интенсивность излучения 90 мкВт/см², расстояние до источника излучения 50 см. Для стерилизации и гомогенизации бульона использовался аппарат УЗАП-1/22-ОП. Режимы обработки включали частоту 22 кГц, интенсивность 1,2 Вт/см² и время экспозиции 15 мин. Температура поддерживалась в диапазоне 50–60 °С. Определение микробиологической безопасности бульона определяли КМАФАнМ (количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, включая дрожжи и плесени) в соответствии с ГОСТ Р 54354-2011² "Мясо и мясные продукты. Общие требования и методы микробиологического анализа". Расчет бактерицидной эффективности базировался на экспериментальных данных, нормативных требованиях ТР ТС 034/2013 "О безопасности мяса и мясной продукции" (приложение 1)³. Расчет экономической эффективности проводился на основании методических рекомендаций (Болохонов, 2015). В работе комплексно применены экспериментальные, экономические и математические методы, дополненные нормативными стандартами. Методика проведения исследований основывалась на требованиях нормативных документов: ГОСТ Р 51705.1-2024⁴ "Системы менеджмента качества. Управление качеством и безопасностью пищевых продуктов на основе принципов ХАССП. Общие требования", ГОСТ 15467-79⁵ "Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения".

Результаты и обсуждение

Интервалы времени, характеризующиеся длительностью сохранности бульона, оцениваются состоянием остаточной микробиологической зараженности после бактерицидной обработки различными средствами. Они обуславливаются экспоненциальным законом распределения вероятности между независимыми событиями, протекающими при заражении и развитии микроорганизмов и, соответственно, при использовании различных по своей конечной результативности способов обработки. При этом плотность распределения вероятности при средней интенсивности процессов обеззараживания описывается выражением

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ при } t \geq 0, \quad (1)$$

где λ – параметр закона распределения; t – случайная величина.

Данное обстоятельство свидетельствует о возможности исследования результатов бактерицидной обработки путем дифференциальной оценки качества обеззараживания с помощью оценки единичных показателей, получаемых различными способами обработки, с показателем базового аналогового в условных единицах

$$q_i = \frac{P_{i \text{ оп}}}{P_{i \text{ ан}}} \text{ при } i = 1, 2, \quad (2)$$

где $P_{i \text{ оп}}$ – показатель микробиологической обсемененности, КОЕ/см³; i – итоговые показатели по результатам исследований; $P_{\text{ан}}$ – бульон, приготовленный традиционным способом без применения обработок обеззараживания; P_i – бульон, приготовленный по технологии, предусматривающей совмещенную ультразвуковую и ультрафиолетовую обработку (Линия..., 2024; Рудик и др., 2024в; Илюхина и др., 2021; Awad et al., 2012).

² ГОСТ Р 54354-2011. Мясо и мясные продукты. Общие требования и методы микробиологического анализа. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/52016/?ysclid=maut75do9o824468869>.

³ Технический регламент Таможенного союза "О безопасности мяса и мясной продукции" (ТР ТС 034/2013) (с изменениями на 27 сентября 2023 года) / принят решением Совета Евразийской экономической комиссии от 9 октября 2013 года № 68 (редакция, действующая с 10 июля 2024 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/499050564?ysclid=mautpirc1698161910>.

⁴ ГОСТ Р 51705.1-2024. Системы менеджмента качества. Управление качеством и безопасностью пищевых продуктов на основе принципов ХАССП. Общие требования. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/82746/?ysclid=maut8fq8q966937858>.

⁵ ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. Дата актуализации 01.07.2023. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/31626?ysclid=maut4oi8uo519030913>.

Предельный уровень бактерицидной обработки установлен нормативной документацией и должен составлять не более $0,5 \times 10^2$ КОЕ/см³, на этом основании оценка эффективности осуществлялась согласно выражению

$$q_i = P_{i\text{оп}} - P_{i\text{пр}} / P_{i\text{ан}} - P_{i\text{пр}}, \quad (3)$$

где P_i – предельный нормированный показатель обсемененности микроорганизмами.

Расчетные показатели по бактерицидной обработке представлены в табл. 1.

Таблица 1. Дифференциальная оценка качества обеззараживания микроорганизмов и длительности достижения предельного состояния

Table 1. Differential assessment of the quality of microorganism disinfection and the duration of reaching the limit state

№ п/п	Наименование способа бактерицидной обработки	Условное обозначение	Дифференциальный показатель качества достижения предельного состояния, усл. ед.		Срок достижения предельного состояния, ч
			1	2	
1	Традиционная технология	$P_{\text{ан}}$	1,0		1
2	Совмещенная с ультразвуковой и ультрафиолетовой обработкой	P_1		6,0	11

Показатели качества, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о высокой эффективности совмещенной ультразвуковой и ультрафиолетовой обработки мясокостного сырья. На первой стадии производства бульона предусматривается ультрафиолетовое облучение мясокостного сырья перед закладкой в пищеварочный котел. На второй стадии бульон до укупорки подвергается высокоэффективной стерилизации ультразвуком, что, несомненно, повышает стабильность низкого состояния микробиологической зараженности (*Илюхина и др., 2021; Awad et al., 2012; Кондратенко и др., 2023; Федосенко и др., 2022; Рязанцева и др., 2022; Зилов, 2024*).

Дополнительная стабильность релаксации микроорганизмов обеспечивается за счет обеспечения высокого качества очистки бульона от вторичных продуктов окисления. Удаление грубых тканевых частиц в ситочном фильтре, устанавливаемом на выходе бульона из пароварочного котла, и фильтрация в песочном фильтре коллоидно-дисперсных частиц стабилизируют качество с позиции органолептических показателей и замедления окислительных процессов. Немаловажным положительным фактором является и состояние остаточной массовой доли жира, она уменьшается при фильтрации, а гомогенизацией достигается высокая степень разрушения жировых шариков, и, как следствие, присутствие в бульоне в свободном равновесном состоянии, препятствующем их объединению, приводящем к порче продукта. Эффективность ультразвуковой и ультрафиолетовой обработки подтверждается исследованиями (*Yeh et al., 2013*).

Единичный дифференциальный показатель качества, установленный по преобладающему показателю микробиологической обсемененности, являющегося основным гарантом пролонгации срока хранения, не позволяет оценить эффективность поточно-технологической линии (ПТЛ). Она должна будет зависеть от всех дифференциальных составляющих и определяться в зависимости от интегрального суммарного показателя, включающего в себя и затратные средства на создание ПТЛ, и ее эксплуатацию. В таком случае эффективность технологического процесса и поточно-технологической линии определяется выражением

$$I = P_{\Sigma} / Z_{\text{с.ПТЛ}} + Z_{\text{экс}}, \quad (4)$$

где P_{Σ} – суммарная эффективность ПТЛ, руб.; $Z_{\text{с.ПТЛ}}$ – затраты на создание ПТЛ, руб.; $Z_{\text{экс}}$ – эксплуатационные затраты ПТЛ, руб.

Определение эффективности ПТЛ в ценностном варианте, как представлено в выражении 4, не может быть достоверной информацией по причине отсутствия главной преследуемой цели – повышения длительности пищевой сохранности продукта, полученного и представленного в табл. 1. В этой связи наиболее рациональной принята методика, основанная на возможности анализировать себестоимость различных технологий с дифференциальным показателем качества

$$I = C_{\text{сб}} \times q_{ki}, \quad (5)$$

где $C_{\text{сб}}$ – себестоимость производства бульона, руб.; q_{ki} – дифференциальный показатель качества i -й технологии, у. е.

Себестоимость оборудования, обеспечивающего повышение микробиологического состояния бульона, представлена в табл. 2.

Таблица 2. Примерный перечень оборудования ПТЛ, обуславливающего длительность хранения бульона
Table 2. Approximate list of PTL equipment determining the shelf life of broth

№ п/п	Наименование технологической операции	Наименование оборудования	Тип, марка	Кол-во, шт.	Установленная мощность, кВт	Стоимость ед. оборудования, руб.
1	Ультрафиолетовая бактерицидная обработка сырья	Бактерицидный ультрафиолетовый излучатель	"Светолит-50 (90)" УФ амальгамная лампа АНЦ 170/70-ПЗ-3	1	0,5	91 080
2	Подогрев воды	Водонагреватель	Electrolux EWH 50 Major LZR 3	1	2,0	23 800
3	Варка бульона	Котел пищеварочный	КПЭМ-60-7	1	18,1	246 600
4	Стерилизация и гомогенизация бульона	Аппарат ультразвуковой проточный "Волна-П"	УЗАП-1/22-ОП (вариант исполнения № 1)	1	1,0	350 000
5	Упаковка	Ручной запайник стаканов	МЗ-4003М	1	0,4	25 000
Итого					22,0	736 480

В табл. 3 представлен примерный перечень технологического оборудования, применяемого по традиционной технологии производства мясокостного бульона из говядины.

Таблица 3. Технологическое оборудование, применяемое для приготовления бульона по традиционной технологии

Table 3. Technological equipment used for preparing broth using traditional technology

№ п/п	Наименование технологической операции	Наименование оборудования	Тип, марка	Кол-во, шт.	Установленная мощность, кВт	Стоимость ед. оборудования, руб.
1	Варка бульона	Котел пищеварочный	КПЭМ-60-7	1	18,1	246 600
2	Стерилизация	Автоклав	ИПКС-128-150Pr(H)	1	15,0	593 543
3	Упаковка	Ручной запайник стаканов	МЗ-4003М	1	0,40	25 000
Итого					33,5	865 143

Для комплексной оценки эффективности ПТЛ были проведены экономические расчеты (Магомедов и др., 2021), включавшие анализ полной себестоимости производства мясокостного бульона и себестоимости единицы продукции (300 мл) по стандартной и предлагаемой технологиям. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Полная себестоимость производства мясокостного бульона из говядины по стандартной и предлагаемой технологии

Table 4. Full cost of production of beef bone broth using standard and proposed technology

Наименование	Стандартная технология, руб.	Предлагаемая технология, руб.
Сырье и основные материалы	1 239	1 239
Транспортно-заготовительные расходы	62	62
Тара и упаковка	1 243,5	1 243,5
Топливо и энергия на технологические цели	427	160
Затраты на оплату труда	4 000	2 000
Социальный налог	1 208	604
Амортизация	576,8	491
Прочие производственные расходы	438	290
Внепроизводственные расходы	460	304
Полная себестоимость	9 654,2	6 393,4
Себестоимость единицы продукции (300 мл)	36,2	24

На основании данных о полной себестоимости производства мясокостного бульона, себестоимости единицы продукции (300 мл) и дифференциальных показателей качества (табл. 1), рассчитанных по формуле (5), проведена комплексная оценка эффективности поточно-технологической линии. Методология анализа основана на применении стоимостных и качественных параметров, что позволяет количественно определить суммарный экономический эффект от внедрения новой технологии:

$$I_{\text{ан}} = 1,0 \cdot 9654,2 = 9654,2 \text{ руб.};$$

$$I_1 = 6,0 \cdot 6393,4 = 38360,4 \text{ руб.}$$

Проведен расчет экономической эффективности производства и реализации мясокостного бульона. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5. Показатели экономической эффективности производства мясокостного бульона по стандартной и предлагаемой технологии, руб.

Table 5. Economic efficiency indicators for the production of meat and bone broth using standard and proposed technology, rub.

Наименование	Стандартная технология, руб.	Предлагаемая технология, руб.
Полная себестоимость	9 654,2	6 393,4
Себестоимость единицы продукции (300 мл)	36,2	24
Цена, руб./шт. за единицу продукции (300 мл)	150	150
Выручка в смену, руб.	40 200	40 200
Прибыль от реализации в смену, руб.	30 545,8	33 806,5
Рентабельность продукции, %	316,4	528,7
Рентабельность продаж, %	75,9	84,1

Результаты сопоставительного анализа экономической эффективности демонстрируют, что внедрение предлагаемой технологии производства мясокостного бульона обеспечивает прибыль от реализации в размере 33 806,5 руб. за смену, что превышает аналогичный показатель традиционной технологии на 3 260 руб. Количественная оценка рентабельности продукции, рассчитанная в соответствии с методологией (Магомедов и др., 2021), составила 528,7 % для новой технологии против 316,4 % для стандартной. Полученные значения рентабельности превышают среднеотраслевые нормативы пищевой промышленности, что подтверждает экономическую целесообразность модернизации производства. Таким образом, производственно-сбытовой цикл с использованием ультрафиолетовой и ультразвуковой обработки является экономически более эффективным решением, сочетающим высокую экономическую эффективность с улучшенными показателями микробиологической безопасности.

Заключение

Разработанная технология производства мясокостных бульонов с использованием ультразвуковой и ультрафиолетовой обработки демонстрирует значительные преимущества перед традиционным методом. Снижение себестоимости на 33,7 %, увеличение рентабельности до 528,7 % и ускорение процессов стерилизации подтверждают ее экономическую целесообразность. Улучшение микробиологической безопасности обеспечивает пролонгированный срок хранения и соответствие санитарным нормам. Однако внедрение требует инвестиций в оборудование (например, аппараты ультразвуковой стерилизации), что может быть обосновано за счет долгосрочных экономических выгод и повышения качества и длительности хранения продукции. Рекомендуется дальнейшее совершенствование процессов фильтрации и оптимизация энергопотребления для снижения эксплуатационных затрат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Болохонов М. А. Экономика предприятия (фирмы). Саратов : Саратовский источник, 2015. 123 с.
- Бурак Л. Ч., Завалей А. П. Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54, № 2. С. 342–357. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510>. EDN: HYJQCX.
- Зилов Е. А. Обеззараживание вод с помощью ультрафиолетового излучения и ультразвуковой обработки // XXI век. Техносферная безопасность. 2024. Т. 9, № 2(34). С. 142–151. DOI: <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2024-9-2-142-151>. EDN: XDNSRJ.
- Илюхина Н. В., Колоколова А. Ю., Тришканева М. В., Крюкова Е. В. [и др.]. Исследование динамики ингибирования микрофлоры растительного сырья в результате обработки ультрафиолетовым излучением // Хранение и переработка сельхозсырья. 2021. № 1. С. 117–126. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.194>. EDN: IDW1HY.

- Кондратенко Т. Ю., Кондратенко В. В., Курбанова М. Н., Пацюк Л. К. Ультразвуковая кавитация и ее потенциальное влияние на микрофлору: Систематический обзор предметного поля // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2023. № 4. С. 75–97. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.4.463>. EDN: QPOGIK.
- Линия производства расфасованного питьевого бульона, мясокостной пасты и вареного мяса для изготовления кулинарных изделий: пат. № 2812972 Рос. Федерация / Ф. Я. Рудик, С. А. Богатырев, И. С. Киселева, О. С. Фоменко [и др.]. № 2023117677; заявл. 05.07.2023 ; опубл. 06.02.2024 г. Бюл. № 4. EDN: KXLESP.
- Магомедов М. Д., Заздравных А. В., Афанасьева Г. А. Экономика пищевой промышленности. Москва : Дашков и К, 2021. 230 с.
- Мауль Д., Красникова Л. В., Громцев А. С. Исследование влияния ультразвуковой обработки в жидких средах различного состава на поверхностную микрофлору мясных полуфабрикатов // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2017. Т. 79, № 3(73). С. 19–25. DOI 10.20914/2310-1202-2017-3-19-25. EDN: ZTUKKZ.
- Моргунова Н. Л., Рудик Ф. Я., Жиздюк А. А., Буйлов В. Н. Исследование изменения качественных показателей зерна пшеницы при эксплуатационно-технологической обработке ультразвуком в водной среде // *Аграрный научный журнал*. 2025. № 4. С. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i4pp111-118>. EDN: VRWRFЕ.
- Рудик Ф. Я., Фоменко О. С., Куценкова В. С., Сагингалиева А. Г. Принципы, общая схема и обоснование эффективности теплопередачи при производстве мясных продуктов питания // *Вестник ВСГУТУ*. 2024в. № 2(93). С. 12–18. DOI: 10.53980/24131997_2024_2_12. EDN: CVSFYP.
- Рудик Ф. Я., Фоменко О. С., Сагингалиева А. Г. Проблема насыщения продуктового рынка питьевыми продуктами питания длительного срока хранения // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2024а. № 3. С. 28–32. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-3-28-32. EDN: ELXVBP.
- Рудик Ф. Я., Фоменко О. С., Сагингалиева А. Г., Пасько О. В. Анализ и обоснование способа и технических средств для бактерицидной обработки мяса при производстве пакетированных бульонов длительного хранения // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2024б. № 3. С. 89–95. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-3-89-95. EDN: MSQMUF.
- Рязанцева К. А., Шерстнева Н. Е. Традиционные и инновационные способы применения ультрафиолетового излучения в молочной промышленности // *Техника и технология пищевых производств*. 2022. Т. 52, № 2. С. 390–406. DOI: 10.21603/2074-9414-2022-2-2372. EDN: VTCVRL.
- Федосенко Т. В., Кондратенко Т. Ю., Кондратенко В. В. Особенности применения ультразвуковой кавитации для обработки жидкообразных сред // *Все о мясе*. 2022. № 5. С. 38–45. DOI: 10.21323/2071-2499-2022-5-38-45. EDN: FOYMPD.
- Awad T. S., Moharram H. A., Shaltout O. E., Asker D. [et al.]. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review // *Food Research International*. 2012. Vol. 48, Iss. 2. P. 410–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>.
- Harasym J., Satta E., Kaim U. Ultrasound treatment of buckwheat grains impacts important functional properties of resulting flour // *Molecules*. 2020. Vol. 25, Iss. 13. Article number: 3012. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25133012>.
- Yeo S.-K., Liong M.-T. Effects and applications of sub-lethal ultrasound, electroporation and UV radiations in bioprocessing // *Annals of Microbiology*. 2013. Vol. 63. P. 813–824. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0559-8>.

References

- Bolokhonov, M. A. 2015. Economics of an Enterprise (Firm). Saratov. (In Russ.)
- Burak, L. C., Zavaley, A. P. 2024. Combined ultrasonic and microwave processing of food: A review of efficiency. *Food Processing: Techniques and Technology*, 54(2), pp. 342–357. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510>. EDN: HYJQCX. (In Russ.)
- Zilov, E. A. 2024. Disinfection of water using ultraviolet radiation and ultrasonic treatment. *XXI Century. Technosphere Safety*, 9(2(34)), pp. 142–151. DOI: <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2024-9-2-142-151>. EDN: XDNSRJ. (In Russ.)
- Ilyukhina, N. V., Kolokolova, A. Yu., Trishkanova, M. V. et al. 2021. Study of the dynamics of microflora inhibition in plant raw materials as a result of ultraviolet radiation treatment. *Storage and Processing of Farm Products*, 1, pp. 117–126. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.194>. EDN: IDWIHY. (In Russ.)
- Kondratenko, T. Yu., Kondratenko, V. V., Kurbanova, M. N., Patyuk, L. K. 2023. Ultrasonic cavitation and its potential impact on microflora: A systematic review of the subject area. *Storage and Processing of Farm Products*, 4, pp. 75–97. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.4.463>. EDN: QPOGIK. (In Russ.)
- Rudik, F. Ya., Bogatyrev, S. A., Kiseleva, I. S. et al. 2024. Production line for packaged drinking broth, meat-and-bone paste, and boiled meat for culinary products, Russian Federation, Pat. 2812972 C1. EDN: KXLESP. (In Russ.)

- Magomedov, M. D., Zazdravnykh, A. V., Afanasyeva, G. A. 2021. Economics of the food industry. Moscow. (In Russ.)
- Maul, D., Krasnikova, L. V., Gromtsev, A. S. 2017. Study of the effect of ultrasonic treatment in liquid media of various compositions on the surface microflora of meat semi-finished products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 79(3(73)), pp. 19–25. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-3-19-25. EDN: ZTUKKZ. (In Russ.)
- Morgunova, N. L., Rudik, F. Ya., Zhizdyuk, A. A., Builov, V. N. 2025. Study of changes in quality indicators of wheat grain during operational-technological ultrasonic treatment in an aqueous medium. *The Agrarian Scientific Journal*, 4, pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i4pp111-118>. EDN: VRWRFE. (In Russ.)
- Rudik, F. Ya., Fomenko, O. S., Kutsenkova, V. S., Sagingalieva, A. G. 2024b. Principles, general scheme, and justification of heat transfer efficiency in the production of meat food products. *ESSUTM Bulletin*, 2(93), pp. 12–18. DOI: 10.53980/24131997_2024_2_12. EDN: CVSFYP. (In Russ.)
- Rudik, F. Ya., Fomenko, O. S., Sagingalieva, A. G. 2024a. The problem of saturating the food market with long-shelf-life drinking food products. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex-Healthy Food Products*, 3, pp. 28–32. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-3-28-32. EDN: ELXVBP. (In Russ.)
- Rudik, F. Ya., Fomenko, O. S., Sagingalieva, A. G., Pas'ko, O. V. 2024b. Analysis and justification of methods and technical means for bactericidal treatment of meat in the production of long-shelf-life packaged broths. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex-Healthy Food Products*, 3, pp. 89–95. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-3-89-95. EDN: MSQMUF. (In Russ.)
- Ryazantseva, K. A., Sherstneva, N. E. 2022. Traditional and innovative methods of using ultraviolet radiation in the dairy industry. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(2), pp. 390–406. DOI: 10.21603/2074-9414-2022-2-2372. EDN: VTCVRL. (In Russ.)
- Fedosenko, T. V., Kondratenko, T. Yu., Kondratenko, V. V. 2022. Features of the application of ultrasonic cavitation for the treatment of liquid media. *Vsyo o Myase*, 5, pp. 38–45. DOI: 10.21323/2071-2499-2022-5-38-45. EDN: FOYMPD. (In Russ.)
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker D. et al. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48(2), pp. 410–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>.
- Harasym, J., Satta, E., Kaim, U. 2020. Ultrasound treatment of buckwheat grains impacts important functional properties of resulting flour. *Molecules*, 25(13). Article number: 3012. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25133012>.
- Yeo, S.-K., Liong, M.-T. 2013. Effects and applications of sub-lethal ultrasound, electroporation and UV radiations in bioprocessing. *Annals of Microbiology*, 63, pp. 813–824. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0559-8>.

Сведения об авторах

Фоменко Ольга Сергеевна – ул. Соколова, 335, г. Саратов, Россия, 410005; Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова, канд. техн. наук, доцент; e-mail: fomenkoos@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2700-3119>

Olga S. Fomenko – 335 Sokolovaya Str., Saratov, Russia, 410005; Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: fomenkoos@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2700-3119>

Рудик Феликс Яковлевич – ул. Соколова, 335, г. Саратов, Россия, 410005; Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова, д-р техн. наук, профессор; e-mail: rudik.sgau@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>

Felix Ya. Rudik – 335 Sokolovaya Str., Saratov, Russia, 410005; Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Dr Sci. (Engineering), Professor; e-mail: rudik.sgau@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>

УДК 664.834

Исследование процессов вакуумной сушки икры

В. А. Ермолаев*, О. Н. Бондарчук, Е. В. Махачева

*Кузбасский государственный аграрный университет им. В. Н. Полецкого, г. Кемерово, Россия;
e-mail: ermolaevvla@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1450-2517>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
29.11.2024;

получена
после доработки
11.02.2025;

принята
к публикации
13.02.2025

Ключевые слова:

вакуумная сушка,
обезвоживание,
сушка,
продолжительность,
органолептические
показатели

Икра рыб представляет собой ценный продукт, имеющий высокие питательные и вкусовые качества. Икра содержит в себе большое количество белка, что является одним из значимых критериев пищевых продуктов. Незаменимые кислоты, содержащиеся в икре, представляют собой особую ценность. Они не могут синтезироваться в организме человека и поступают в него только с пищей. Поиск эффективных способов консервирования красной икры при помощи новых видов консервантов, а также различных технологий, обеспечивающих высокое качество данного продукта, является перспективным направлением. Проведенные авторами исследования показали, что возможным способом переработки икры в продукт длительного хранения является ее сушка. Обезвоживание позволяет заметно продлить срок хранения икры без добавления консервантов. При этом стоит отметить, что высушенная икра может растираться в порошок для добавления в другие продукты и обогащения их полезными веществами. В качестве способа сушки икры выбрали вакуумную, так как именно вакуумная сушка может обезвоживать пищевые продукты с сохранением их качественных показателей. В работе приведены экспериментальные исследования, которые позволили выявить наиболее рациональные параметры вакуумной сушки икры: температура нагрева 40 °С, остаточное давление – 5 кПа, плотность теплового потока – 3–4 кВт/м², толщина слоя – 10–20 мм. При указанных параметрах продолжительность сушки составляет 270–370 мин, а органолептическая оценка равна 38–40 баллов из 45.

Для цитирования

Ермолаев В. А. и др. Исследование процессов вакуумной сушки икры. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 252–262. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-252-262>.

Research of caviar vacuum drying processes

Vladimir A. Ermolaev*, Olga N. Bondarchuk, Ekaterina V. Makhacheva

*Kuzbass State Agrarian University named after V. N. Poletskov, Kemerovo, Russia;
e-mail: ermolaevvla@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1450-2517>

Article info

Received
29.11.2024;

received
in revised form
11.02.2025;

accepted
13.02.2025

Key words:

vacuum drying,
dehydration,
drying,
duration,
organoleptic properties

Abstract

Fish caviar is a valuable product with high nutritional and taste qualities. Caviar contains a large amount of protein, which is one of the significant criteria for food products. Essential acids contained in caviar are of particular value. They cannot be synthesized in the human body and enter it only with food. The search for effective ways to preserve red caviar using new types of preservatives, as well as various technologies that ensure the high quality of this product, is a promising direction. The studies conducted by the authors have shown that a possible way to process caviar into a long-term storage product is its drying. Dehydration allows you to significantly extend the shelf life of caviar without adding preservatives. It is worth noting that dried caviar can be ground into powder for adding to other products and enriching them with useful substances. Vacuum drying has been chosen as a method of drying caviar, since it is vacuum drying that can dehydrate food products while maintaining their quality indicators. The paper presents experimental studies that have allowed us to identify the most rational parameters for vacuum drying of caviar: heating temperature of 40 °C, residual pressure of 5 kPa, heat flow density of 3–4 kW/m², layer thickness of 10–20 mm. With the specified parameters, the drying time is 270–370 min, and the organoleptic assessment is 38–40 points out of 45.

For citation

Ermolaev, V. A. et al. 2025. Research of caviar vacuum drying processes. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 252–262. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-252-262>.

Введение

Икра рыб представляет собой ценный продукт, получаемый путем обработки ястыков рыбы и имеющий высокие питательные и вкусовые качества (Дементьева и др., 2017; Зайцева и др., 2013; Рубцова и др., 2009). Икра содержит в себе большое количество белка – 20–25 %, что является одним из значимых критериев пищевых продуктов (Ахмерова и др., 2012; Лыков, 1970). Незаменимые кислоты, содержащиеся в икре, представляют собой особую ценность (Ахмерова и др., 2011; Менчинская и др., 2015). Они не могут синтезироваться в организме человека и поступают в него только с пищей. В табл. 1 приведено соответствие аминокислотного состава (в частности, незаменимых аминокислот) различных рыб идеальному белку, т. е. такому белку, который по аминокислотному составу находится в идеальном для организма человека соотношении (Калиниченко и др., 2007; Лебская и др., 2015; Крухмалева и др., 2018).

Таблица 1. Соответствие аминокислотного состава белков икры рыб идеальному белку
Table 1. Correspondence of the amino acid composition of fish roe proteins to the ideal protein

Наименование аминокислот	Содержание аминокислот, г/100 г			
	Идеальный белок	Толстолобик	Сазан	Мойва
Валин	4,00	4,49	4,83	5,10
Изолейцин	3,00	3,94	3,74	3,95
Лейцин	6,10	11,34	9,04	7,16
Лизин	4,8	7,28	6,37	10,65
Метионин + цистин	2,3	3,95	6,22	5,24
Треонин	2,5	5,04	4,81	5,30
Триптофан	0,66	0,91	0,89	1,0
Фенилаланин + тирозин	4,1	7,88	7,42	6,34

Для сравнения – сумма незаменимых аминокислот в идеальном белке составляет 27,5 г/100 г. В икре толстолобика, сазана и мойвы этот показатель равен соответственно 44,8; 43,3; 44,7 г/100 г. Таким образом, сумма незаменимых аминокислот в икре рыбы превышает данный показатель в идеальном белке. В частности, в икре мойвы содержание лизина в 2 раза выше, чем в идеальном белке. Лизин участвует в процессе кроветворения, стимулирует умственные способности, подавляет рост вирусов, поддерживает иммунную систему и способствует регенерации тканей (Ким и др., 2016).

В белках икры толстолобика отмечено большое количество лейцина. Данная кислота принимает участие в обеспечении азотистого баланса, необходимого для белкового и углеводного обмена, способствует повышению работоспособности и лучшему заживлению ран (Chang et al., 1978).

Что касается икры сазана, то по сравнению с остальными представленными видами рыб в ней отмечено высокое содержание метионина с цистином. Метионин принимает участие в биосинтезе адреналина и холина, а также в процессе формирования коллагена. Он способствует активации гормонов, ферментов и витаминов и снижает уровень холестерина в крови. Цистин входит в состав иммуноглобулина и инсулина и обладает антиоксидантными свойствами (Садовникова и др., 1978).

Липиды, входящие в состав икры рыб, могут использоваться в качестве природного эмульгатора (Абрамова и др., 2003; Ахмерова и др., 2011). При этом биологическая эффективность липидов зависит от особенностей их жирнокислотного состава.

Из всего многообразия рыбьей икры красная икра (лососевая) является одной из наиболее распространенных. Она содержит множество микроэлементов (калий, фосфор, йод, железо и др.), витаминов (А, D, E), а также полиненасыщенных жирных кислот. Биологически активные вещества содержатся в ней в концентрированной форме.

Цвет икры лососей обусловлен наличием в ней каротиноидных пигментов – ксантофиллов: лютеин, астаксантин и зеаксантин. Наибольшее содержание астаксантина наблюдается в икре нерки, которая обладает яркой красно-оранжевой окраской, а наименьшее – в икре горбуши, которая имеет светло-оранжевый окрас.

Химический состав икры во многом зависит от стадии зрелости рыбы и сезона ее вылова. Так, например, в красной икре содержание влаги варьирует от 50 до 68 %, липидов – от 10 до 18 %, белков – от 26 до 36 %, минеральных веществ – от 0,7 до 2,5 %.

Витаминный состав икры колеблется в некотором диапазоне для различных видов рыб (табл. 2) (Методы..., 2009).

Из представленных видов рыбы наибольшее содержание витаминов А и D наблюдается в икре горбуши, а наибольшая концентрация витамина Е – в икре кеты. В целом отмечается повышенное содержание витамина А в икре тихоокеанских лососей по сравнению с другими видами рыбы. Ее концентрация в указанной рыбе превосходит таковую в печени трески.

Таблица 2. Витаминный состав икры рыб, мг/100 г
Table 2. Vitamin composition of fish caviar, mg/100 g

Витамин	Вид рыбы			
	Горбуша	Кета	Кижуч	Нерка
A	1,26	1,24	0,59	0,89
D	0,57	0,32	0,19	0,19
E	2,81	3,87	0,19	2,08

Традиционным способом консервирования икры является ее посолка. Данный метод используется издавна и является самым распространенным относительно указанного продукта. В результате посолки происходит извлечение влаги как из самого продукта, так и из микроорганизмов, что влечет за собой существенное подавление их жизнедеятельности. При этом происходит снижение активности воды, что также отрицательно сказывается на активности микроорганизмов, вызывающих порчу (*Курбанова и др., 2013*).

Разрабатывали также способ консервирования икры замораживанием до температуры минус 5 °С, что позволяло продлить срок хранения данного продукта до 2 месяцев. Однако такой способ обладает существенным недостатком, который выражается в заметном снижении органолептических показателей икры после дефростирования. В частности, происходит разрыв оболочки продукта и снижение вкусовых качеств, поэтому данный метод не нашел широкого применения в пищевой промышленности (*Новоселова и др., 2012*).

Имеются сведения о том, что для консервирования икры применялась пастеризация продукта (*Рубцова, 2009*). В ходе исследований был разработан способ пастеризации кетовой икры при температуре 65 °С в течение 1 ч. В результате такой обработки происходит уничтожение вегетативной микрофлоры и снижение активности автолитических процессов. В связи с этим удается продлить сроки хранения икры в 2 раза. Однако стоит отметить, что при термической обработке икры свыше 55 °С происходит потускнение продукта. Наиболее сильно данный эффект проявляется при температуре 73 °С.

Поиском эффективных способов консервирования красной икры при помощи новых видов консервантов, а также различных технологий, обеспечивающих высокое качество данного продукта, занимались многие ученые, среди которых А. М. Теплицкий, Е. Н. Наседкина и др. Кроме того разрабатывались новые методы консервирования икры, основанные на физических принципах. К числу ученых, проводящих исследования в данной области, можно отнести Г. В. Маслову, В. А. Солинек, З. С. Репину, И. И. Лапшина и др.

Материалы и методы

Возможным способом переработки икры в продукт длительного хранения является ее сушка. Обезвоживание позволяет заметно продлить срок хранения икры без добавления консервантов. При этом стоит отметить, что высушенная икра может растираться в порошок для добавления в другие продукты и обогащения их полезными веществами. Для анализа возможности применения сушеной икры в качестве самостоятельного продукта необходимы соответствующие исследования (*Ермолаев, 2008; Ермолаев и др., 2011; Ермолаев и др., 2009; Ермолаев и др., 2010; Ермолаев и др., 2016*).

В качестве объектов исследований выступала икра лосося. Икра лосося, обычно называемая красной икрой, состоит из ярко-оранжевых или красных икринок лосося. Икра лосося характеризуется плотной текстурой, соленым вкусом и ярким цветом, что делает ее популярным деликатесом. Икра лосося также является питательным источником, богатым омега-3 жирными кислотами, витаминами и белками. Лососевую икру изготавливают из икры-зерна рыбы, полученной из рыбы живой или сырца, обработанной поваренной солью с добавлением пищевых добавок, в том числе консервантов, или без них и фасуют в транспортную упаковку. Лососевая икра с консервантами может быть заморожена сухим искусственным способом.

В экспериментальных исследованиях использовали охлажденную икру. Массовая доля влаги в икре составляла 51,2 %.

Для проведения вакуумной сушки икры использовали специально сконструированную сушильную установку. Вакуумная сушильная установка состоит из вакуумного насоса, вакуумной камеры, компрессора, конденсатора, отделителя жидкости, десублиматора, рессивера, вакуумметра, терморегулирующего вентиля. Схема вакуумной сушильной установки и принцип ее работы описан в работах (*Ермолаев, 2008; Ермолаев и др., 2011*).

Подвод теплоты к продукту при вакуумной сушке осуществляется от двух инфракрасных ламп, размещенных в камере сверху и снизу на расстоянии около 70 мм от поддона. Мощность каждой лампы составляет 1 кВт. В камере предусмотрена возможность регулировки расстояния между инфракрасными лампами и поддоном с продуктом. Цилиндрические стенки рабочей камеры помогают фокусировать лучистый поток от излучателей на высушиваемом продукте. Излучение от инфракрасных ламп может осуществляться как непрерывным, так и импульсным способом.

Вначале проводили опыты по сушке с различной температурой в камере – от 30 до 60 °С с шагом в 10 градусов и различной величиной плотности теплового потока – от 2 до 9 кВт/м² с шагом в 1 кВт/м².

Остаточное давление составляло $5 \pm 0,5$ кПа. Сушку осуществляли при толщине слоя от 5 до 30 мм (Курбанова и др., 2011; Просеков и др., 2010).

При вакуумной сушке икры производили непрерывный контроль изменения массы в процессе сушки, контроль массы фиксировали с помощью весов, на которых устанавливалась икра в специальном поддоне. Весы для контроля массы в процессе сушки икры представляют собой балку с защемленным концом, на который закреплен тензодатчик.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены графики зависимости продолжительности вакуумной сушки икры и массовой доли влаги от температуры в камере и плотности теплового потока.

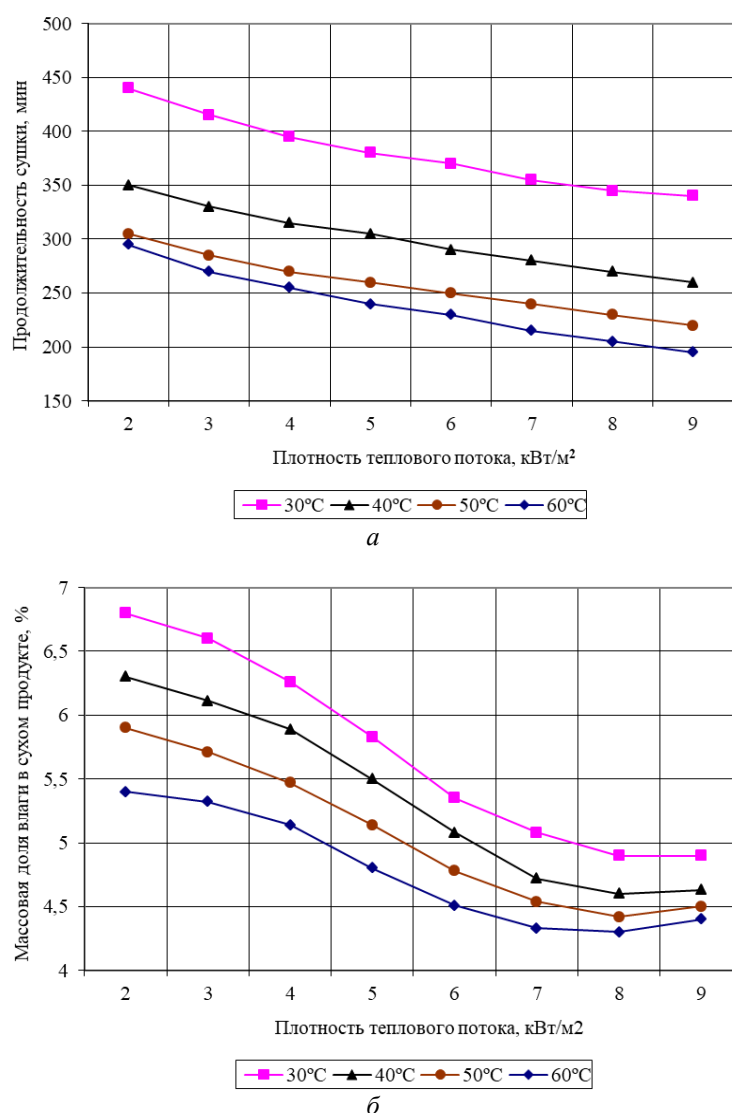


Рис. 1. Графики зависимости продолжительности (а) и массовой доли влаги сухого продукта (б) при вакуумной сушке икры от температуры и плотности теплового потока

Fig. 1. Graphs of the dependence of the duration (a) and the mass fraction of moisture of the dry product (б) during vacuum drying of caviar on the temperature and heat flow density

Продолжительность вакуумной сушки икры при температуре нагрева 30 °С составляет от 340 до 440 мин в зависимости от плотности теплового потока. Повышение температуры в камере до 40 °С позволяет сократить продолжительность сушки до 26–350 мин. Наименьшая продолжительность обезвоживания наблюдалась при температуре в камере 60 °С и составила 195 мин.

С повышением температуры сушки наблюдалось снижение массовой доли влаги в обезвоженной икре, что наиболее ярко проявляется при относительно малых значениях плотности теплового потока. Так, при тепловой нагрузке 2 кВт/м² при сушке с температурой в камере 30 °С массовая доля влаги в сухой икре составила 6,8 %, а при температуре в камере 60 °С это значение было равно 5,4 %.

На зависимость массовой доли влаги в обезвоженном продукте от плотности теплового потока влияет 2 фактора. С одной стороны, повышение тепловой нагрузки до определенной величины благоприятно сказывается на скорости удаления влаги, поскольку продукт прогревается быстрее. С другой стороны, при чрезмерно быстром нагреве происходит образование корочки, снижающей скорость перемещения влаги на периферию продукта, что в свою очередь увеличивает продолжительность сушки и повышает массовую долю влаги в сухом продукте. Снижение массовой доли влаги в сухой икре наблюдалось при повышении плотности теплового потока до 7–8 кВт/м².

Температурные режимы и тепловая нагрузка оказывают существенное влияние на качество сухого продукта. Для проведения органолептической оценки сухой икры была использована методика, представленная в табл. 3.

Таблица 3. Методика органолептической оценки сухой икры
Table 3. Methodology for organoleptic evaluation of dried caviar

Наименование показателя	Оценка, баллы	Характеристика показателя
Вкус	13–15	Ярко выраженный, характерный
	9–12	Слабо выраженный
	4–8	Слабо выраженный с наличием посторонних привкусов
	1–3	Прогорклый, затхлый, нехарактерный
Цвет	8–10	От ярко-оранжевого до красного
	4–7	Тускло-оранжевый
	1–3	Наличие нехарактерных оттенков
Консистенция	8–10	Равномерная по всему объему, икринки не прилипают друг к другу и рассыпаются при механическом воздействии
	4–7	Неравномерная, икринки прилипают друг к другу и слабо рассыпаются при механическом воздействии
	1–3	Неравномерная, наличие пригара, не рассыпается при механическом воздействии
Запах	8–10	Чистый, ярко выраженный, характерный для данного продукта
	4–7	Слабо выраженный, наличие посторонних запахов
	1–3	Нетипичный

Суммарная максимальная органолептическая оценка сухой икры составляет 45 баллов.

Результаты органолептической оценки обезвоженной икры в зависимости от температуры сушки и тепловой нагрузки представлены на рис. 2–5.

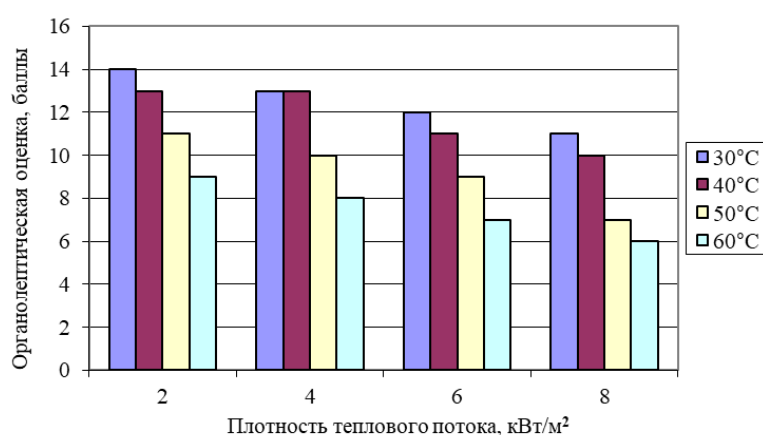


Рис. 2. Результаты органолептической оценки показателя "вкус" сухой икры при подборе температуры и тепловой нагрузки вакуумной сушки

Fig. 2. Results of organoleptic evaluation of the "taste" indicator of dry caviar when selecting the temperature and heat load of vacuum drying

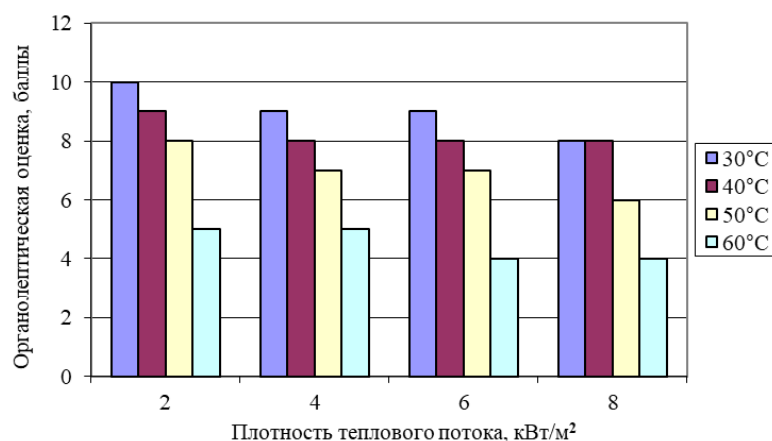


Рис. 3. Результаты органолептической оценки показателя "цвет" сухой икры при подборе температуры и тепловой нагрузки вакуумной сушки
Fig. 3. Results of organoleptic evaluation of the "color" indicator of dry caviar when selecting the temperature and heat load of vacuum drying

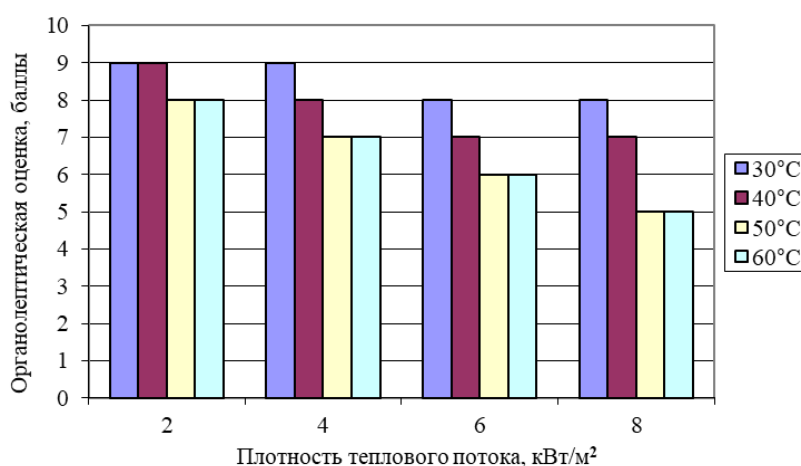


Рис. 4. Результаты органолептической оценки показателя "запах" сухой икры при подборе температуры и тепловой нагрузки вакуумной сушки
Fig. 4. Results of organoleptic evaluation of the "smell" indicator of dried caviar when selecting the temperature and heat load of vacuum drying

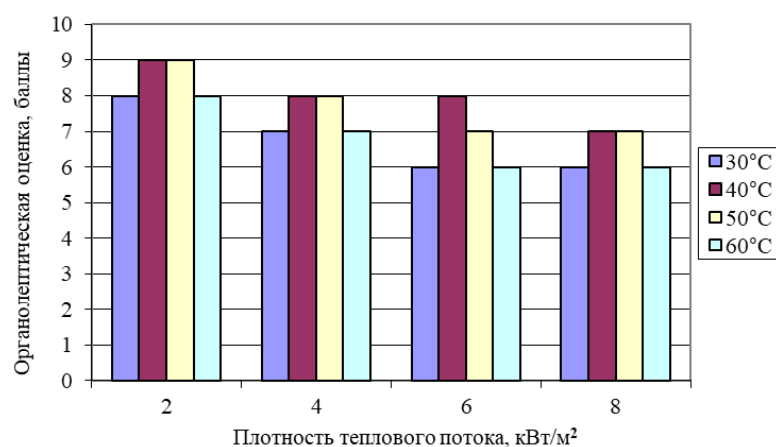


Рис. 5. Результаты органолептической оценки показателя "консистенция" сухой икры при подборе температуры и тепловой нагрузки вакуумной сушки
Fig. 5. Results of organoleptic evaluation of the "consistency" indicator of dry caviar when selecting the temperature and heat load of vacuum drying

Суммарная органолептическая оценка сухой икры, обезвоженной при наименьшей температуре и плотности теплового потока, составила 41 балл из 45. Наихудшая оценка наблюдалась при наиболее высокой температуре и тепловой нагрузке и была равна 21 баллу из 45.

При температуре сушки свыше 40 °С наблюдалось потемнение продукта и, как следствие, заметное снижение показателя "цвет". Наилучшая консистенция продукта наблюдалась при температурах сушки 40 и 50 °С. При более низкой температуре в камере влагосодержание сухой икры повышается, а при более высокой температуре консистенция была неравномерной.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о целесообразности вакуумной сушки икры при температуре 40 °С. Сушка при более высокой температуре обуславливает потемнение икры, а при более низкой температуре увеличивается продолжительность обезвоживания. Что касается плотности теплового потока, то рекомендуется устанавливать его значение в 3–4 кВт/м². При указанных параметрах продолжительность сушки составляет 320–330 мин, а органолептическая оценка равна 37–39 баллов из 45.

Далее проводили подбор остаточного давления вакуумной сушки икры. Указанный параметр в различных опытах так же, как и при сушке микроводорослей, составлял 2, 3, 4, 5 и 6 кПа. Температура сушки была равна 40 °С, плотность теплового потока – 4 кВт/м², толщина слоя – 15 мм (Ермолаев, 2019; Ермолаев, 2020).

На рис. 6 и 7 приведены графики изменения относительной массы и скорости изменения относительной массы икры в процессе вакуумной сушки при подборе остаточного давления.

При остаточном давлении 4, 5 и 6 кПа продолжительность сушки составила соответственно 285, 330 и 370 мин. Что касается сушки при давлении 2 и 3 кПа, то в этом случае из-за высокой разности давлений часть икринок "взрывалась" с потерей массы продукта. На графиках скорости изменения относительной массы (рис. 7) отчетливо прослеживаются пики, соответствующие данному процессу. Это обуславливает существенно меньшую относительную массу продукта по завершении сушки (рис. 6). Таким образом, исключается сушка икры при давлении ниже 4 кПа.

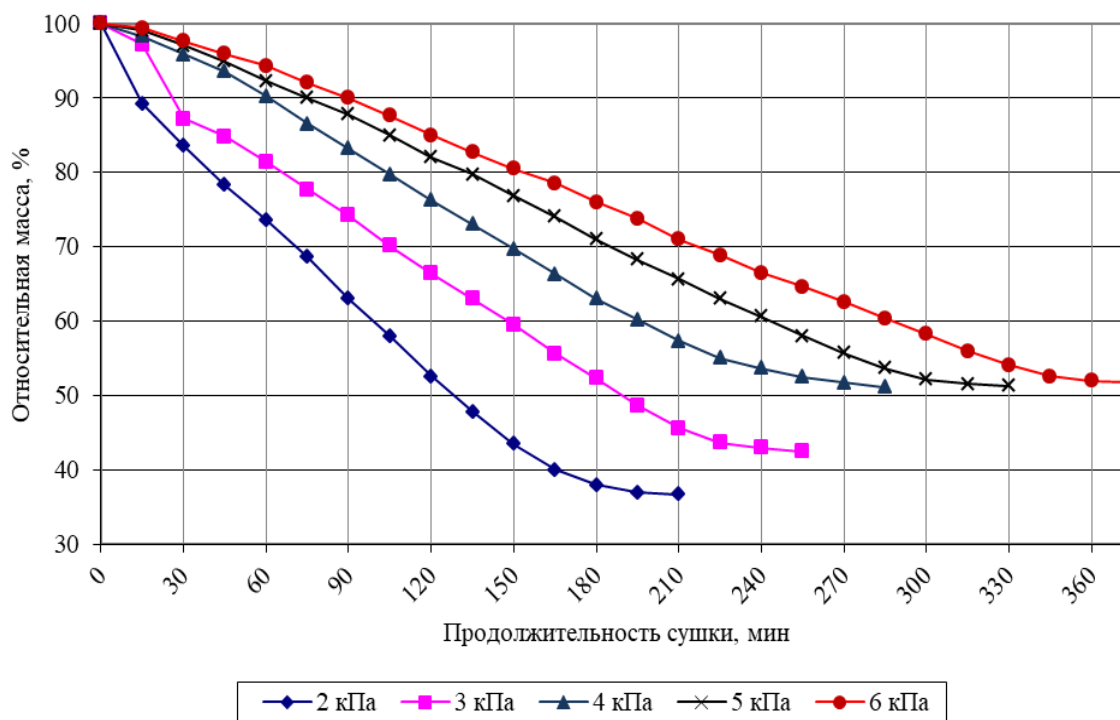


Рис. 6. Графики зависимости относительной массы икры в процессе вакуумной сушки при подборе остаточного давления

Fig. 6. Graphs of the dependence of the relative mass of caviar in the process of vacuum drying when selecting the residual pressure

Теоретически "взрыв" отдельных икринок возможен и при давлении 4 кПа, поэтому рекомендуется обезвоживать данный продукт при остаточном давлении 5 кПа. В дальнейших исследованиях использовали данный параметр.

Органолептическая оценка сухой икры, обезвоженной при остаточном давлении 5 кПа, выражается в следующих показателях: вкус – 14 баллов из 15, цвет и запах – 8 баллов из 10 и консистенция – 9 баллов из 10. Суммарная оценка составляет 39 баллов из 45.

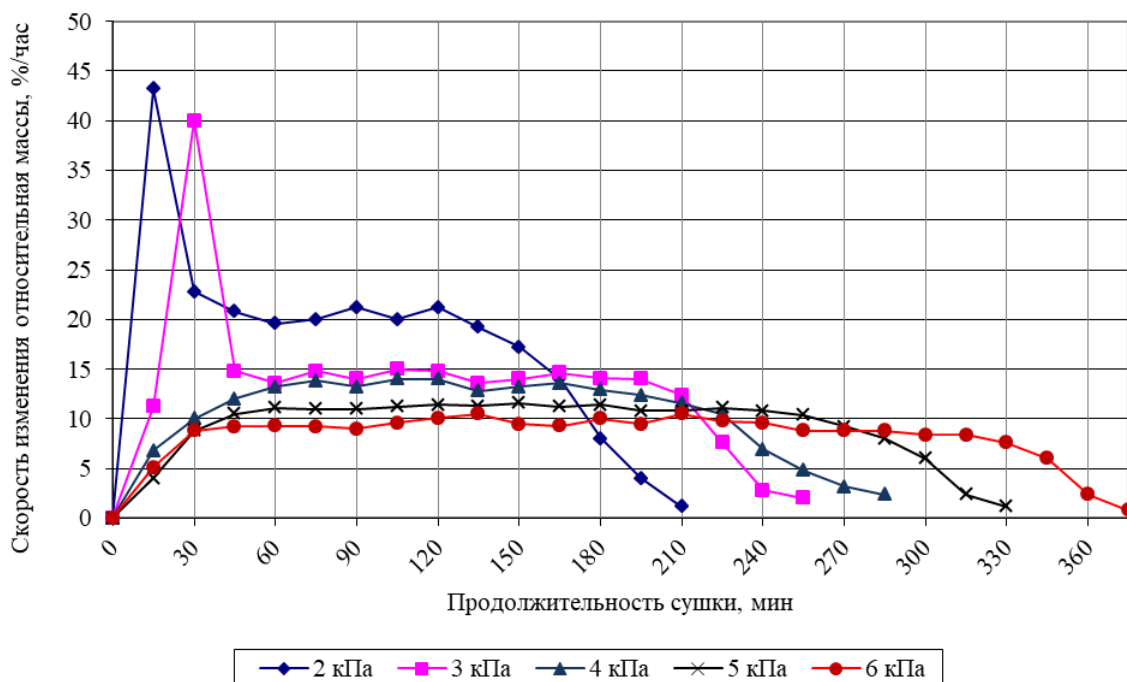


Рис. 7. Графики зависимости скорости изменения относительной массы икры в процессе вакуумной сушки при подборе остаточного давления
Fig. 7. Graphs of the dependence of the rate of change of the caviar relative mass in the process of vacuum drying when selecting the residual pressure

Заключительный этап исследования вакуумной сушки икры заключался в подборе толщины слоя сушки. Указанный параметр в различных опытах составлял от 5 до 30 мм с шагом в 5 мм.

Графики продолжительности вакуумной сушки икры и массовой доли влаги в сухом продукте в зависимости от толщины слоя приведены на рис. 8.

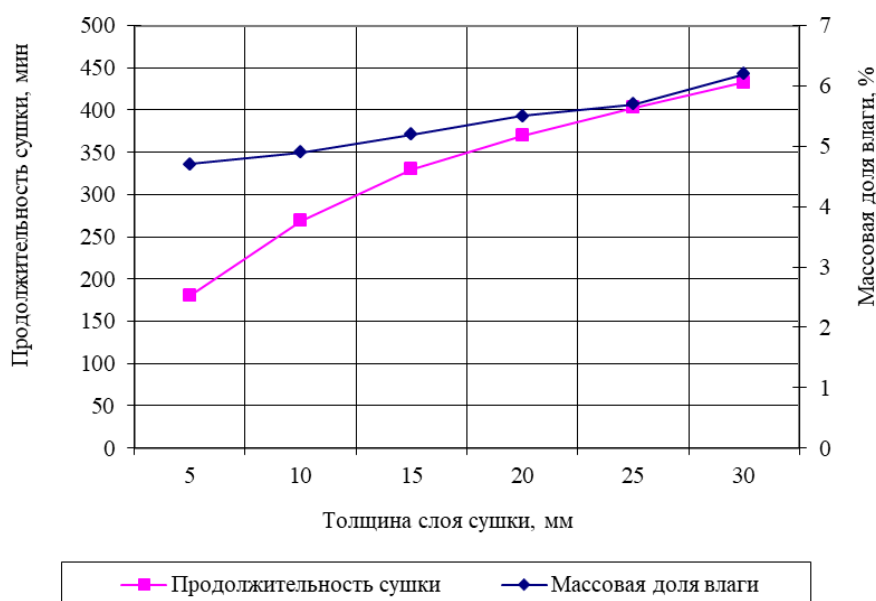


Рис. 8. Графики продолжительности вакуумной сушки икры и массовой доли влаги в сухом продукте в зависимости от толщины слоя
Fig. 8. Graphs of the duration of vacuum drying of caviar and the mass fraction of moisture in the dry product depending on the layer thickness

При увеличении толщины слоя сушки от 5 до 30 мм наблюдается повышение продолжительности процесса от 180 до 430 мин, а также увеличение массовой доли влаги в сухой икре от 4,7 до 6,2 %. Это обусловлено ухудшением условий тепломассопереноса и снижением интенсивности обезвоживания при увеличении слоя продукта.

Наибольшая органолептическая оценка в 42 балла из 45 наблюдалась в икре, высушенной при минимально исследованной толщине слоя – в данном случае 5 мм. При увеличении толщины слоя сушки наблюдается ухудшение такого показателя как "консистенция", что отражается на суммарной оценке. Это проявляется в менее однородной консистенции.

Вышеприведенные данные свидетельствуют о том, что сушку икры целесообразно осуществлять при толщине слоя 10–20 мм для обеспечения рационального соотношения качества сухой икры и производительности сушильной установки.

Заключение

Таким образом, экспериментальные исследования позволили выявить наиболее рациональные параметры вакуумной сушки икры: температура нагрева 40 °С, остаточное давление – 5 кПа, плотность теплового потока – 3–4 кВт/м², толщина слоя – 10–20 мм. При указанных параметрах продолжительность сушки составляет 270–370 мин, а органолептическая оценка равна 38–40 баллов из 45.

Полученные результаты по вакуумной сушке икры лосося рыб имеют прикладной характер и полезны при консервировании на длительное время. Вакуумная сушка позволяет расширить способы консервирования икры рыб.

Дальнейшие исследования будут направлены на подбор режимов вакуумной сушки икры других видов рыбы, а также исследования качественных показателей высушенной икры.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абрамова Л. С., Радыгина Л. С. Эмульсионные продукты на основе рыбной икры // Рыбное хозяйство. 2003. № 3. С. 57–59. EDN: PGPYEP.
- Ахмерова Е. А., Копыленко Л. Р., Рубцова Т. Е. Пищевая ценность икры рыб // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю. А. Овчинникова. 2012. Т. 8, № 4. С. 12–20. EDN: PZYEYR.
- Ахмерова Е. А., Хамзина А. К. Биологическая ценность липидов икры некоторых видов рыб // материалы VI Московского междунар. конгресса, г. Москва, 21–25 марта 2011 г. В 2 ч. Ч. 2. М. : Экспо-биохим-технологии, РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2011. С. 160–161.
- Деметьева Н. В., Богданов В. Д. Функционально-технологические свойства икры сельди тихоокеанской // Пищевая промышленность. 2017. № 3. С. 36–39. EDN: YNDGCV.
- Ермолаев В. А. Анализ эффективности сублимационной сушки спироулины // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке : материалы IX междунар. науч.-техн. конф., г. Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 г. СПб. : Ун-т ИТМО, 2019. Т. 1. С. 32–34. EDN: IPGJLW.
- Ермолаев В. А. Подбор температурного режима сублимационного обезвоживания спироулины // Вестник Международной академии холода. 2020. № 1. С. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2020-19-1-84-88>. EDN: APDSLH.
- Ермолаев В. А. Разработка технологии вакуумной сушки обезжиренного творога : дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2008. 168 с.
- Ермолаев В. А., Захаров С. А. Теоретическое обоснование основ консервирования сушкой и практическая реализация технологии вакуумной сушки творога. Кемерово : КемТИПП, 2009. 176 с.
- Ермолаев В. А., Масленникова Г. А., Комарова Н. А., Федоров Д. Е. Исследование процессов сублимационной сушки ягод // Техника и технология пищевых производств. 2011. № 1. С. 67–70. EDN: NDTDEN.
- Ермолаев В. А., Шушпанников А. Б. Исследование показателя активности воды сухих молочных продуктов // Техника и технология пищевых производств. 2010. № 2(17). С. 84–88. EDN: MQPMDL.
- Ермолаев В. А., Иваненко О. Н., Онюшев М. В. Разработка температурных режимов вакуумного концентрирования молока // Вестник КрасГАУ. 2016. № 9(120). С. 121–127. EDN: UFINRI.
- Зайцева Д. Е., Шейкина Т. В., Данылиев М. М. Определение показателей биологической ценности икры рыб // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство : материалы междунар. науч.-техн. конф. (заочная), г. Воронеж, 3–4 декабря 2013 г. Воронеж : ВГУИТ, 2013. С. 382–385. EDN: TDCZYB.
- Калининченко Т. П., Тимчишина Г. Н., Болтенков Е. В., Слуцкая Т. Н. [и др.]. Особенности химического состава икры макруруса и возможность производства из нее деликатесной продукции // Известия ТИПРО. 2007. Т. 149. С. 400–407. EDN: JYWYV.

- Ким Г. Н., Дементьева Н. В., Богданов В. Д. Сравнительное исследование пищевой ценности икры рыб тихоокеанского бассейна // Рыбное хозяйство. 2016. № 3. С. 102–106. EDN: WMZNLL.
- Крухмалева М. В., Камербаев А. Ю. Оптимизация биологической ценности вторичных сырьевых ресурсов агропромышленного комплекса // Вестник Инновационного Евразийского университета. 2018. № 3. С. 64–68. EDN: IYXFOD.
- Курбанова М. Г., Бондарчук О. Н., Масленникова С. М. Практические аспекты гидролиза казеина молока эндопептидазами // Техника и технология пищевых производств. 2013. № 2(29). С. 34–39. EDN: QANQOF.
- Курбанова М. Г., Ермолаев В. А. Исследование гигроскопических свойств и активности воды молочнокислых концентратов // Вестник КрасГАУ. 2011. № 8. С. 233–236. EDN: NYKKQV.
- Лебская Т. К., Менчинская А. А. Сравнительная характеристика пищевой ценности икры некоторых рыб // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2015. Т. 1, № 2. С. 91–97. EDN: VNUJWT.
- Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 429 с.
- Менчинская А. А., Лебская Т. К. Особенности биологической ценности белков икры мойвы и сазана // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств: материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Мурманск, 7 апреля 2015 г.: в 2 ч. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2015. Ч. 2. С. 145–149. EDN: VEZJVJ.
- Методы консервирования икры лососевых рыб // Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов. 2009. № 1. С. 12–13. EDN: KXEOXF.
- Новоселова М. В., Борисова Г. В., Бондарчук О. Н., Малова Ю. С. Подбор параметров ферментативного гидролиза казеина // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. С. 659. EDN: TODTVN.
- Просеков А. Ю., Ермолаев В. А. Подбор остаточного давления для вакуумного концентрирования жидких молочных продуктов // Достижение науки и техники АПК. 2010. № 6. С. 69–70. EDN: MSRJQR.
- Рубцова Т. Е., Копыленко Л. Р. Пищевая ценность икры лососевых рыб // Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов. 2009. № 1. С. 8–11. EDN: KXEOVW.
- Рубцова Т. Е. Технология консервирования икры лососевых рыб без консервантов // Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов. 2009. № 1. С. 32. EDN: KXEOZX.
- Садовникова М. С., Беликов В. М. Пути применения аминокислот в промышленности // Успехи химии. 1978. Т. 47, Вып. 2. С. 357–383.
- Chang T. W., Goldberg A. L. Leucine inhibits oxidation of glucose and pyruvate in skeletal muscles during fasting // Journal of Biological Chemistry. 1978. Vol. 253, Iss. 10. P. 3696–3701. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(17\)34857-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(17)34857-3).

References

- Abramova, L. S., Radygina, L. S. 2003. Emulsion products based on fish roe. *Fisheries*, 3, pp. 57–59. EDN: PGPYEP. (In Russ.)
- Akhmerova, E. A., Kopylenko, L. R., Rubtsova, T. E. 2012. Nutritional value of fish roe. *Yu. A. Ovchinnikov Bulletin of Biotechnology and Physical and Chemical Biology*, 8(4), pp. 12–20. EDN: PZYEYR. (In Russ.)
- Akhmerova, E. A., Khamzina, A. K. 2011. Biological value of lipids of roe of some fish species. *Proceedings of the VI Moscow Intern. Congress Biotechnology: Status and Development Prospects*, Moscow, 21–25 March, 2011. In 2 parts. Part 2. Moscow, pp. 160–161. (In Russ.)
- Dementeva, N. V., Bogdanov, V. D. 2017. Functional and technological properties of Pacific herring caviar. *Food Industry*, 3, pp. 36–39. EDN: YNDGCV. (In Russ.)
- Ermolaev, V. A. 2019. Analysis of the efficiency of freeze-drying of spirulina. *Proceedings of the IX Intern. scientific and technical conf. Low-Temperature and Food Technologies in the 21st Century*, St. Petersburg, 13–15 November, 2019. St. Petersburg, Vol. 1, pp. 32–34. EDN: IPGJLW. (In Russ.)
- Ermolaev, V. A. 2020. Selection of the temperature regime for freeze-drying of spirulina. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*, 1, pp. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2020-19-1-84-88>. EDN: APDSLH. (In Russ.)
- Ermolaev, V. A. 2008. Development of technology for vacuum drying of low-fat cottage cheese. Ph.D. Thesis. Kemerovo. (In Russ.)
- Ermolaev, V. A., Zakharov, S. A. 2009. Theoretical substantiation of the basics of canning by drying and practical implementation of the technology of vacuum drying of cottage cheese. Kemerovo. (In Russ.)
- Ermolaev, V. A., Maslennikova, G. A., Komarova, N. A., Fedorov, D. E. 2011. Study of processes of freeze-drying of berries. *Food Processing: Techniques and Technology*, 1, pp. 67–70. EDN: NDTDEH. (In Russ.)
- Ermolaev, V. A., Shushpannikov, A. B. 2010. Study of the water activity index of dry milk products. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2(17), pp. 84–88. EDN: MQPMDL. (In Russ.)
- Ermolaev, V. A., Ivanenko, O. N., Onyushev, M. V. 2016. Development of temperature modes for vacuum concentration of milk. *Bulletin of KSAU*, 9(120), pp. 121–127. EDN: UFINRI. (In Russ.)

- Zaitseva, D. E., Sheykina, T. V., Danyliv, M. M. 2013. Determination of indicators of biological value of fish eggs. Proceedings of the Intern. scientific and technical conf. *Innovative Technologies in the Food Industry: Science, Education and Production*, Voronezh, 3–4 December, 2013. Voronezh, pp. 382–385. EDN: TDCZYB. (In Russ.)
- Kalinichenko, T. P., Timchishina, G. N., Boltenkov, E. V., Slutskaia, T. N. et al. 2007. Features of the chemical composition of grenadier caviar and the possibility of producing delicacy products from it. *Izvestiya TINRO*, 149, pp. 400–407. EDN: JYWYV. (In Russ.)
- Kim, G. N., Dementyeva, N. V., Bogdanov, V. D. 2016. Comparative study of the nutritional value of Pacific fish caviar. *Fisheries*, 3, pp. 102–106. EDN: WMZNLL. (In Russ.)
- Krhumaleva, M. V., Kamerbaev, A. Yu. 2018. Optimization of the biological value of secondary raw materials of the agro-industrial complex. *Bulletin of the Innovative University of Eurasia*, 3, pp. 64–68. EDN: IYXFOD. (In Russ.)
- Kurbanova, M. G., Bondarchuk, O. N., Maslennikova, S. M. 2013. Practical aspects of milk casein hydrolysis by endopeptidases. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2(29), pp. 34–39. EDN: QANQOF. (In Russ.)
- Kurbanova, M. G., Ermolaev, V. A. 2011. Study of hygroscopic properties and water activity of milk protein concentrates. *Bulletin of KSAU*, 8, pp. 233–236. EDN: NYKKQV. (In Russ.)
- Lebskaya, T. K., Menchinskaya, A. A. 2015. Comparative characteristics of the nutritional value of some fish caviar. *Journal of Science and Education of North-West Russia*, 1(2), pp. 91–97. EDN: VNUJWT. (In Russ.)
- Lykov, M. V. 1970. Drying in the chemical industry. Moscow. (In Russ.)
- Menchinskaya, A. A., Lebskaya, T. K. 2015. Features of the biological value of proteins in capelin and carp caviar. Proceedings of the Intern. scientific and practical conf. *Modern Ecological, Biological and Chemical Research, Engineering and Production Technology*, Murmansk, 7 April, 2015, in 2 parts. Murmansk, 2015. Part 2, pp. 145–149. EDN: VEZJVJ. (In Russ.)
- Methods of preserving salmon caviar. 2009. *Fish Industry*, 1, pp. 12–13. EDN: KXEOXF. (In Russ.)
- Novoselova, M. V., Borisova, G. V., Bondarchuk, O. N., Malova, Yu. S. 2012. Selection of parameters for enzymatic hydrolysis of casein. *Modern Problems of Science and Education*, 6, pp. 659. EDN: TODTVN. (In Russ.)
- Prosekov, A. Yu., Ermolaev, V. A. 2010. Selection of residual pressure for vacuum concentration of liquid dairy products. *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*, 6, pp. 69–70. EDN: MSRJQR. (In Russ.)
- Rubtsova, T. E., Kopylenko, L. R. 2009. Nutritional value of salmon caviar. *Fish Industry*, 1, pp. 8–11. EDN: KXEOVW. (In Russ.)
- Rubtsova, T. E. 2009. Technology of preserving salmon caviar without preservatives. *Fish Industry*, 1, pp. 32. EDN: KXEOZX.
- Sadovnikova, M. S., Belikov, V. M. 1978. Ways of using amino acids in industry. *Uspekhi Khimii*, 47(2), pp. 357–383. (In Russ.)
- Chang, T. W., Goldberg, A. L. 1978. Leucine inhibits oxidation of glucose and pyruvate in skeletal muscles during fasting. *Journal of Biological Chemistry*, 253(10), pp. 3696–3701. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(17\)34857-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(17)34857-3).

Сведения об авторах

Ермолаев Владимир Александрович – ул. Марковцева, 5, г. Кемерово, Россия, 650056; Кузбасский государственный аграрный университет им. В. Н. Полецкого, д-р техн. наук, доцент, профессор; e-mail: ermolaevvla@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1450-2517>

Vladimir A. Ermolaev – 5 Markovtseva Str., Kemerovo, Russia, 650056; Kuzbass State Agrarian University named after V. N. Poletskov, Dr Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor; e-mail: ermolaevvla@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1450-2517>

Бондарчук Ольга Николаевна – ул. Марковцева, 5, г. Кемерово, Россия, 650056; Кузбасский государственный аграрный университет им. В. Н. Полецкого, ассистент; e-mail: b120983@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0820-5965>

Olga N. Bondarchuk – 5 Markovtseva Str., Kemerovo, Russia, 650056; Kuzbass State Agrarian University named after V. N. Poletskov, Assistant; e-mail: b120983@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0820-5965>

Махачева Екатерина Владимировна – пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073; Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), канд. техн. наук, доцент; e-mail: shev-04@yandex.ru

Ekaterina V. Makhacheva – 20 K. Marksa Ave., Novosibirsk, Russia, 630073; Novosibirsk State Technical University (NSTU), Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: shev-04@yandex.ru

УДК 637.13

Численное исследование процесса распылительной сушки молока

В. В. Харьков*, К. З. Лаврова

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
10.02.2025;

получена
после доработки
14.04.2025;

принята
к публикации
28.04.2025

Ключевые слова:
кинетика сушки,
CFD,
обезжиренное молоко,
одиночная капля,
стадии сушки,
температура капли

Распылительная сушка является одной из наиболее распространенных и энергозатратных технологических операций, которая используется для получения сухих продуктов. Сухое обезжиренное молоко применяется при производстве продуктов детского и диетического питания, в кондитерской промышленности и др. Небольшое время пребывания капель в распылительной сушилке и механизм сушки позволяют использовать греющий газ высокой температуры без отрицательных последствий для качества сухого молока. На основе рассмотрения существующих моделей для прогнозирования кинетики сушки капель в распыленном состоянии для термического обезживания обезжиренного молока принята механистическая модель, включающая следующие последовательные стадии: прогрев, квазиравновесное испарение, образование сухой корки, сушка пористой частицы. Численное моделирование – эффективный инструмент при модернизации и проектировании распылительных сушильных установок, так как снижает потребность проведения дорогостоящих и сложных измерений параметров сплошной и дисперсной фаз в процессе сушки. Целью работы является численное исследование процесса распылительной сушки капель обезжиренного молока согласно предлагаемой модели сушки, учитывающей отступление фронта испарения, образованного между влажным ядром и коркой высушиваемой частицы. На основании численного расчета построены временные зависимости для изменения массы и температуры капли при различных температурах греющего газа. Сравнение результатов численного расчета сушки капель с имеющимися экспериментальными данными показало их удовлетворительное согласование: относительная погрешность значений массы капли при температурах греющего газа 323 и 363 К в процессе сушки составила в среднем 10,7 %, а абсолютная погрешность значений осредненной температуры капли – не более 5 К. Представлены результаты моделирования по распределению температуры и влагосодержания внутри одиночной капли обезжиренного молока в период падающей скорости сушки.

Для цитирования

Харьков В. В. и др. Численное исследование процесса распылительной сушки молока. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 263–272. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-263-272>.

Simulation of milk spray drying

Vitaly V. Kharkov*, Kamilla Z. Lavrova

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Article info

Received
10.02.2025;

received
in revised form
14.04.2025;

accepted
28.04.2025

Key words:

drying kinetics,
CFD,
skim milk,
single droplet,
drying stages,
droplet temperature

Abstract

Spray drying is one of the most common and energy-consuming technological operations used to obtain dry products. Dry skim milk is used in the production of baby and dietary food, in the confectionery industry, etc. The short residence time of droplets in the spray dryer and the drying mechanism allow the use of high-temperature heating gas without negative consequences for the quality of dry milk. Based on the consideration of existing models for predicting the kinetics of drying droplets in a sprayed state for thermal dehydration of skim milk, a mechanistic model has been adopted that includes the following successive stages: heating, quasi-equilibrium evaporation, formation of a dry crust, drying of a porous particle. Numerical modeling is an effective tool for modernization and design of spray drying units, as it reduces the need for expensive and complex measurements of the parameters of the continuous and dispersed phases during the drying process. The aim of the work is a numerical study of the process of spray drying of skim milk droplets according to the proposed drying model, taking into account the retreat of the evaporation front formed between the wet core and the crust of the dried particle. Based on the numerical calculation, time dependences for the change in the mass and temperature of the droplet at different temperatures of the heating gas have been constructed. Comparison of the results of the numerical calculation of the drying of the droplets with the available experimental data has shown their satisfactory agreement: the relative error of the droplet mass values at heating gas temperatures of 323 and 363 K during the drying process has averaged 10.7 %, and the absolute error of the averaged droplet temperature values is no more than 5 K. The results of modeling for the distribution of temperature and moisture content inside a single drop of skim milk during the period of decreasing drying rate have been presented.

For citation

Kharkov, V. V. et al. 2025. Simulation of milk spray drying. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 263–272. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-263-272>.

Введение

Молоко является сбалансированным, легкоусвояемым и ценным продуктом питания, который играет важную роль в рационе человека благодаря его богатому химическому составу. В молоке содержится полный комплекс незаменимых аминокислот (лизин, лейцин, тирозин и др.), витаминов (А, В₁, В₂, В₁₂, D), микроэлементов (кальций, магний, калий) и других нутриентов. Оно является основным сырьем для изготовления множества различных молочных продуктов. Потребление молока и молочных продуктов населением при соблюдении суточной нормы является частью здорового и диетического питания (*Zhang et al., 2021; Milk..., 2013*).

Цельное молоко является общепризнанно полезным для детей и подростков для роста и развития организма, но его неконтролируемое потребление может быть потенциально вредным для взрослых и пожилых людей из-за высокого содержания насыщенных жиров. В данном случае наилучшим заменителем цельного молока выступает обезжиренное молоко. Обезжиренное молоко – это молочный продукт с пониженным содержанием жира (0–1 %), изготовленный из цельного молока путем отделения сливок, т. е. обезжиренное молоко является отходом производства сливок. Поэтому дальнейшее использование этого молока непосредственно в пищевых целях или в качестве сырья в рецептуре других молочных продуктов является важным элементом безотходной технологии молокоперерабатывающих предприятий. Так как сухая форма молока отличается длительным сроком хранения и возможностью полной автоматизации процесса, то такая форма является предпочтительной при утилизации обезжиренного молока.

Согласно ГОСТ 333629-2015¹ сухое обезжиренное молоко – это концентрированный продукт, полученный посредством распылительной сушки обезжиренного молока, предназначенный для пищевых целей или дальнейшей переработки. Сухое обезжиренное молоко широко используется как полноценный аналог свежего молока, так как при правильно проведенном технологическом процессе практически полностью сохраняется пищевая ценность и вкусовые характеристики исходного (свежего) молока. Сухое обезжиренное молоко является важным ингредиентом не только в молочной промышленности, но и в кондитерской, хлебобулочной, масложировой, фармацевтической и других отраслях.

В свое время изобретение технологии распылительной сушки произвело революцию в молокоперерабатывающей промышленности (*Jakkamsetty, 2024*). По сравнению с другими способами сушки она отличается высокой скоростью процесса и отсутствием прямого контакта продукта с нагретыми поверхностями сушилки (*Белецкая и др., 2019*), что способствует сохранению полезных веществ молочных продуктов (*Харьков и др., 2017а*).

Получение сухого продукта в распылительной сушильной установке зависит не только от теплового режима, но и от гидрогазодинамики внутри установки, способа распыла жидкости, ее дисперсности, теплофизических свойств среды. Поэтому исследование процесса распылительной сушки не является простым. В работе (*Wadud Ahmed et al., 2024*) в качестве детерминирующего фактора при сушке выбрано время пребывания распыленных капель в сушильной камере. Получено распределение времени пребывания обезжиренного молока при различных режимных параметрах работы распылительной сушилки. Авторы (*Михалева и др., 2010*) проанализировали гидродинамические характеристики частиц в процессе распылительной сушки жидких молочных продуктов с целью оптимизации процесса, увеличения выхода готового продукта и улучшения его качества. Представлена математическая модель движения капель молока в газозвешенном режиме сушки. Выполнено исследование работы пульсатора, обеспечивающего возвратно-поступательное движение греющего газа в сушильной установке. В работе (*Муродова, 2024*) проведена оптимизация работы распылительной сушилки молока для определения оптимальных режимов ее работы. Найдено, что низкотемпературный режим сушки и контроль влажности способствуют значительному улучшению качества, сохранению питательных веществ и повышению однородности молочного порошка.

Ведутся также исследования по интенсификации распылительной сушки с помощью различных электрофизических методов. В работе (*Dantas, 2024*) проведен сравнительный анализ модифицированных методов распылительной сушки (пульсационный, электростатический, нано-, экструзионно-пористый), на основе которого выявлены их ограничения и даны рекомендации по дальнейшим исследованиям. Авторами (*Беззубцева и др., 2019*) предложен метод распылительной сушки молока с использованием ультразвуковых технологий для повышения эффективности термического обезвоживания и качества получаемого сухого продукта. Установлено, что при определенной мощности ультразвуковых колебаний формируются сферические шарообразные капли диаметром приблизительно 1,0 мм. Также выявлено, что производительность распыления жидкости под действием ультразвука зависит от давления насыщенных паров и коэффициентов динамической вязкости, а также поверхностного натяжения жидкости.

При моделировании распылительной сушки необходимо учитывать изменение скорости сушки с течением времени. На данный момент существует классификация основных моделей, описывающих кинетику сушки капель, содержащих твердые включения (*Poozesh et al., 2018*):

1) модели, в которых описываются изменения средней температуры и влагосодержания частицы без учета их морфологической эволюции в течение сушки. Репрезентативными моделями являются

¹ ГОСТ 333629-2015. Консервы молочные. Молоко сухое. Технические условия. М., 2017.

полуэмпирическая модель CDC (Characteristic Drying Curve), в которой используется характеристическая кривая для скорости сушки, зависящей только от среднего влагосодержания частицы (*Langrish et al., 2001*), и механистическая модель REA (Reaction Engineering Approach), представленная в работе (*Chen et al., 1997*), в которой весь процесс сушки рассматривается как конкурирующий реакционный процесс между испарением и конденсацией. Ограничением REA модели является необходимость установления связи между энергией активации и влагосодержанием частицы в процессе сушки. Позднее авторы (*Chen et al., 1999*) усовершенствовали эту модель, включив учет сопротивления переносу массы при наличии сухой корки. В работе (*Schmitz-Schug et al., 2016*) было выполнено численное моделирование распылительной сушки молочных продуктов на основе REA модели. Показано, что связь свойств частиц с кинетикой нежелательных реакций позволяет улучшить качество высушенного продукта. В работе (*Putranto, 2016*) приведены различные параметры кинетики сушки по подходу REA для различных пищевых продуктов. Сравнение результатов моделирования сушки углеводов, выполненное авторами (*Woo, 2008*), показало, что подход REA может быть использован для оценки влажности поверхности частиц, которая может влиять на процесс их агломерации;

2) детерминистические модели, описывающие процесс формирования частиц, включая рост и агломерацию дисперсных частиц, что приводит к кристаллизации капли во время процесса сушки. Представителем этой группы моделей является подход, представленный в работе (*Nesic et al., 1991*), в котором выявлено пять последовательных стадий процесса распылительной сушки, через которые проходит одиночная капля, включающая растворенные или взвешенные твердые включения, а именно: подогрев и испарение, квазиравновесное испарение, образование корки и ее рост, кипение и сушка пористой частицы. Приведены критерии перехода между этими стадиями в виде условий, при которых заканчивается одна и начинается другая стадия испарения. Основным недостатком данного подхода является необходимость определения соответствующих коэффициентов диффузии. Другим представителем этой группы моделей является модель усадки (или сокращения диаметра) ядра, в которой процесс сушки разделен на период постоянной скорости сушки и период падающей скорости сушки. В рамках данного концепта в работе (*Mohammed, 2003*) описывается модель распылительной сушки капель с твердыми включениями с учетом отступающей границы (фронта) испарения, которая разделяет области влажного ядра и сухой корки частицы. Постулатом служит предположение, что кинетика сушки полностью определяется диффузионными процессами внутри частицы и сопротивлением внешней конвекции. Игнорирование температурой фронта испарения ограничивает применимость данной модели сушки.

Высокая стоимость распылительной сушилки и вспомогательного оборудования (насос, вентилятор, калорифер, циклон, фильтр и т. д., средства контроля и автоматизации), затраты на проведение пусконаладочных работ и сервисное обслуживание, сложности при проведении точных измерений параметров дисперсной фазы и греющего газа – все это сильно ограничивает возможность проведения экспериментальных исследований процесса сушки. Хорошей альтернативой при проектировании распылительных установок, их модернизации и научного всестороннего исследования является использование современных инструментов компьютерного моделирования (CFD), позволяющих симулировать реальный процесс на основе существующих сложных моделей кинетики сушки капель растворов и распыла даже при изменении конструктивных характеристик оборудования и режимов параметров его работы (*Харьков и др., 2018*).

Целью работы является численное исследование процесса распылительной сушки капель обезжиренного молока на основе модели усадки ядра.

Материалы и методы

Модель сушки одиночных сферических капель, содержащих твердые включения, используемая в этом исследовании, является механистической моделью усадки ядра, основанной на отступании фронта испарения, которая включает четыре последовательные стадии сушки: стадию нагрева, квазиравновесное испарение, формирование корки (и кипение), сушка пористой частицы. Детальное математическое описание модели с принятыми допущениями представлено в работах (*Харьков и др., 2023; Харьков и др., 2024*). Характерной особенностью данной модели является то, что она дает детальную информацию о распределении влаги и твердых включений, а также температуры внутри капли в процессе термического обезвоживания в дисперсном виде. Показательно, что предлагаемая модель сушки капель суспензий является физической, а не эмпирической.

Численное исследование выполнено с использованием CFD продукта открытого кода OpenFOAM 11. Для описания характеристик движения газовой фазы использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса, тогда как для дисперсной фазы – подход Лагранжа. Для замыкания системы уравнений для турбулентного течения газа применялась стандартная k - ϵ модель. Учет взаимного влияния фаз основан на методе двусторонней связи (*Farid, 2003*).

В качестве расчетной геометрической области был выбран параллелепипед длиной 0,1 м в плоскости XY и 0,01 м в плоскости XZ. Построена равномерная гексагональная сетка с размерами $50 \times 100 \times 50$. Поток греющего газа постоянной температуры поступает из нижней части. Капля диаметра D_k вводится в центр вычислительной области с нулевой начальной скоростью в момент времени $t = 0$ с. Так

рассматриваемая капля зафиксирована во взвешенном состоянии в потоке встречного греющего газа. Масса капли m_k рассчитывается в зависимости от ее плотности и диаметра. Для решения уравнений сохранения массы и тепла внутри капли в процессе распылительной сушки используется явный метод конечных разностей. Для этого была разработана одномерная сферическая конечно-разностная расчетная схема, в которой полный объем капли разбивается на 50 оболочек одинаковой толщины.

При изучении кинетики сушки каплей обезжиренного молока предполагается, что летучим компонентом капель молока является вода. Физико-химические свойства порошка молока взяты из (Pugliese et al., 2017). В качестве греющего газа использовался воздух. Необходимые параметры моделирования перечислены в таблице.

Таблица. Начальные данные
Table. Initial data

Содержание сухих веществ $w_{св}$, % масс.	Плотность жидкости ρ , кг/м ³	Начальный диаметр капли D_k , мм	Скорость греющего газа V_g , м/с	Температура греющего газа T_g , К
20	1 234	1,76 и 1,71	0,75	323 и 363
Коэффициент диффузии корки $D_{кор}$, м ² /с	Коэффициент теплопроводности корки $k_{кор}$, Вт/м·К	Коэффициент теплопроводности ядра $k_{ядро}$, Вт/м·К	Температура капли T_k , К	Концентрация насыщения (растворимость) S^* , кг/кг
$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,07	0,372	289	0,50

Результаты данного численного исследования процесса сушки капель обезжиренного молока по предлагаемой модели сушки сравниваются с данными из экспериментальной работы (Nesic et al., 1991).

Средняя температура капли $\bar{T}(K)$ рассчитывалась интегрированием локальной температуры капли $T(K)$ в радиальном направлении капли r по следующему выражению:

$$\bar{T} = \frac{3}{r^3} \int_0^r r^2 T(r) dr. \quad (1)$$

Температура на поверхности капли $T_{пов}(K)$ была рассчитана с помощью уравнений 2 и 3 в зависимости от периода сушки:

- для периода постоянной скорости сушки

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \text{ при } -k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_{пов} - T_{\infty}), r = R_k; \quad (2)$$

- для периода падающей скорости сушки

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mC_v} \left[\frac{2\pi R_k Nu \lambda_g (T_{\infty} - T_{пов})}{1 + \frac{Nu \lambda_g \delta}{2k_{кор} R_{кр} - \delta}} + L \frac{dm}{dt} \right], \quad (3)$$

где t – время сушки, с; a – температуропроводность капли, м²/с; h – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; C_v – теплоемкость жидкости, Дж/кг·К; Nu – число Нуссельта; λ_g – коэффициент теплопроводности газа, Вт/м·К; T_{∞} – температура на удалении от поверхности капли, К; $R_{кр}$ – критический радиус (радиус после усадки), м; δ – толщина корки, м; L – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Коэффициент диффузии для капли обезжиренного молока был рассчитан с помощью следующего уравнения (Wijlhuizen et al., 1979):

$$D = \exp \left(- \frac{38912 + 32339 w_g}{1 + 1584 w_g} \right), \quad (4)$$

где w_g – влагосодержание капли, кг воды/кг сухих веществ.

Результаты и обсуждение

На рис. 1–2 показаны результаты численного расчета сушки одиночных капель обезжиренного молока при температуре греющего газа 323 К. В общем случае, временной процесс сушки складывается из двух последовательных периодов – период с постоянной скоростью сушки сменяется периодом падающей скорости сушки. Стоит отметить, что кривые сушки капли для этих периодов различны. Начало периода падающей скорости сушки наблюдается при $t = 125$ с, когда возникают новые сопротивления явлениям переноса из-за образования сухой корки, которые приводят к замедлению процесса сушки. Причем это падение скорости сушки прямо пропорционально наклону кривой потери массы капли (рис. 1). Возможно,

это вызвано тем, что коэффициент теплопроводности влажного ядра высушиваемой частицы примерно в 6 раз больше коэффициента теплопроводности для пористой корки.

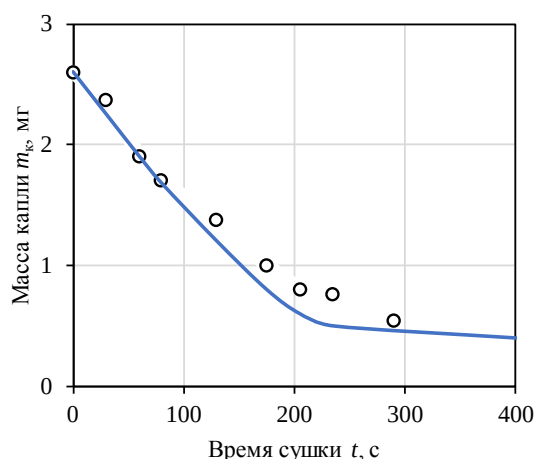


Рис. 1. Изменение массы капли при $T_r = 323$ К: линия – расчет; точки – эксперимент
Fig. 1. Change in droplet mass at $T_{\text{gas}} = 323$ K: line – simulation; points – experiment

Согласно временной зависимости изменения температуры капли при температуре греющего газа $T_r = 323$ К и основываясь на принятой морфологической модели кинетики сушки, на рис. 2 могут быть выделены четыре различные стадии сушки:

- начальный период, соответствующий прогреву капли (0–15 с);
- квазиравновесное испарение (15–125 с);
- формирования корки (125–280 с);
- сушка пористой частицы (280–400 с).

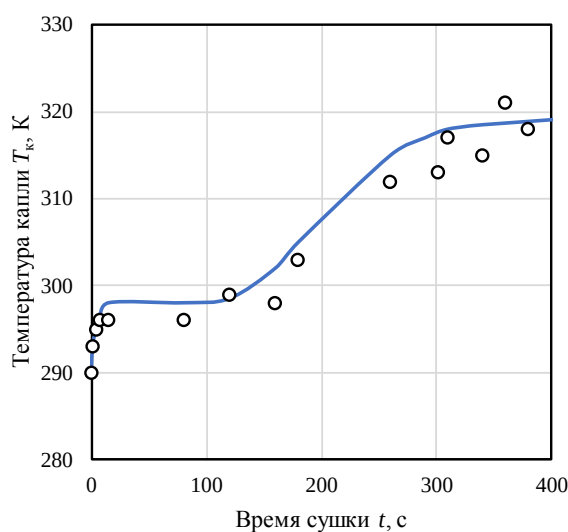


Рис. 2. Изменение температуры капли при $T_r = 323$ К: линия – расчет; точки – эксперимент
Fig. 2. Change in droplet temperature at $T_{\text{gas}} = 323$ K: line – simulation; points – experiment

Кривая кинетики сушки показывает, что на второй стадии, соответствующей периоду с постоянной скоростью сушки, происходит интенсивное удаление свободной влаги с поверхности капли при небольшом изменении ее температуры. На следующей стадии (период падающей скорости сушки) наблюдается постепенное увеличение температуры одиночной капли обезжиренного молока. Здесь формирование сухой корки на поверхности капли приводит к значительному снижению интенсивности удаления влаги из капли. На заключительной стадии сушки удаляется связанная влага, поэтому наблюдается небольшая скорость сушки.

Для оценки влияния температуры греющего газа на процесс сушки обезжиренного молока также было проведено численное моделирование этого процесса в соответствии с предлагаемой моделью при

$T_r = 363$ К. Согласно рис. 3–4 при более высокой температуре газа на входе скорость сушки увеличивается, и весь процесс протекает быстрее приблизительно в 2 раза.

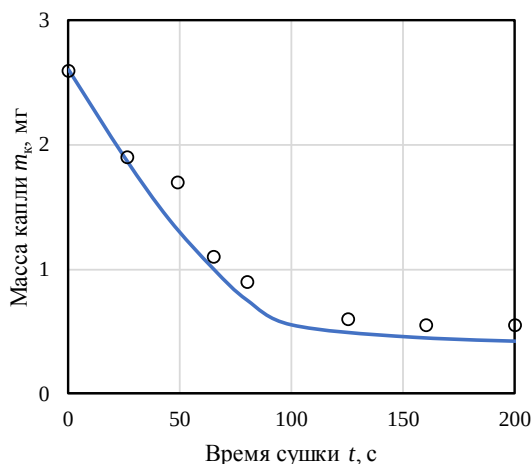


Рис. 3. Изменение массы капли при $T_r = 363$ К: линия – расчет; точки – эксперимент
Fig. 3. Change in droplet temperature at $T_{gas} = 363$ K: line – simulation; points – experiment

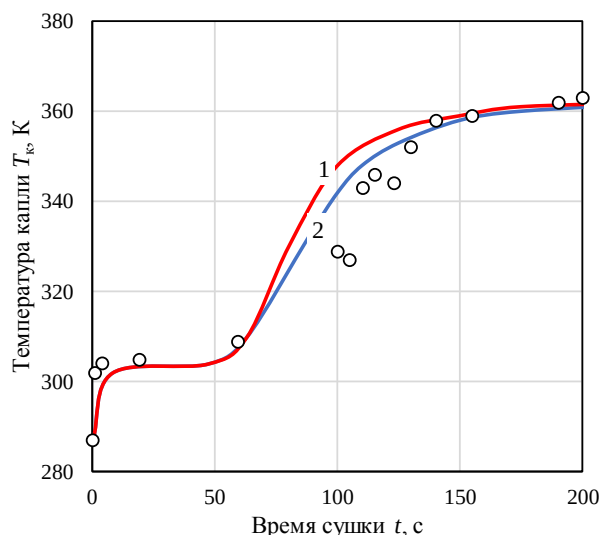


Рис. 4. Изменение температуры капли при $T_r = 363$ К: линия (1) – расчетная температура на поверхности капли; линия (2) – расчетная осредненная температура; точки – эксперимент
Fig. 4. Change in droplet temperature at $T_{gas} = 363$ K: line (1) – calculated temperature on the droplet surface; line (2) – calculated averaged temperature; points – experiment

Для случая когда $T_r = 323$ К, время до резкого повышения температуры капли составляет приблизительно 120 с, в то время как соответствующее значение при $T_r = 363$ К – около 70 с. Так как высокая температура греющего газа может негативно повлиять на качество готовой продукции (Харьков и др., 2017б), отмечается, что даже при повышенной температуре греющего газа на кривой сушки отсутствует кипение.

Согласно рис. 4 также можно различить четыре последовательные стадии сушки:

- начальный период, соответствующий прогреву капли (0–10 с);
- квазиравновесное испарение (10–50 с);
- формирование корки (50–140 с);
- сушка пористой частицы (140–200 с).

Сокращение общего времени сушки при повышении температуры греющего газа происходит в основном за счет уменьшения продолжительности стадий квазиравновесного испарения (на 63,6 %) и формирования корки (на 50 %).

Результаты численного расчета по принятой модели (рис. 4) также показывают, что температура на поверхности капли, начиная со стадии формирования корки, превышает осредненную температуру капли. Наибольшая разница температур наблюдается в период времени $t = 70$ –120 с и составляет в среднем 8,5 %. В конце периода падающей скорости сушки значения осредненной температуры капли и температуры

на поверхности капли выравниваются. Это связано с тем, что диаметр (и объем) влажного ядра, имеющего более низкую температуру, чем сухая корка, уменьшается. Соответственно, снижается вклад температуры влажного ядра при расчете осредненной температуры частицы.

Анализ полученных зависимостей, представленных на рис. 1–4, позволяет сделать вывод, что имеется удовлетворительное согласование между результатами численного расчета по реализованной модели сушки и экспериментальными данными (Nesic et al., 1991) при различных условиях распылительной сушки капель обезжиренного молока. В частности, относительная ошибка между экспериментальными и расчетными значениями массы капли при температурах греющего газа 323 и 363 К в процессе сушки составляет в среднем 10,7 %, а средняя абсолютная погрешность для осредненной температуры капли – не более 5 К.

Далее на основе валидной математической модели проведены численные расчеты распределений температуры и влагосодержания внутри одиночной капли/частицы во время распылительной сушки.

Согласно рис. 4 в период постоянной скорости сушки температура внутри одиночной капли изменяется незначительно. На рис. 5, а показаны температурные профили внутри одиночной капли обезжиренного молока с начальным диаметром 1,71 мм для различных моментов времени от 72,5 до 199,3 с, соответствующих периоду падающей скорости сушки при температуре воздуха 363 К. Отмечается, что увеличение толщины сухой пористой корки приводит к повышению сопротивления теплопередачи, так как увеличивается разница между температурой на поверхности капли и температурой влажного ядра. Для всех случаев вначале наблюдается линейная зависимость температуры капли от радиуса r , затем она становится выпуклой. Это может быть связано с тепловым эффектом паров, диффундирующих через поры корки, так как согласно рис. 5, б влагосодержание частицы в начале падающего периода сушки еще небольшое. Зависимости на рис. 5, б показывают, что в процессе падающей скорости сушки значение граничной концентрации влаги (максимальной концентрации для каждой кривой) увеличивается, так как она рассчитывается на основе температуры на границе влажное ядро – корка, которая постепенно растет из-за влияния теплопроводности.

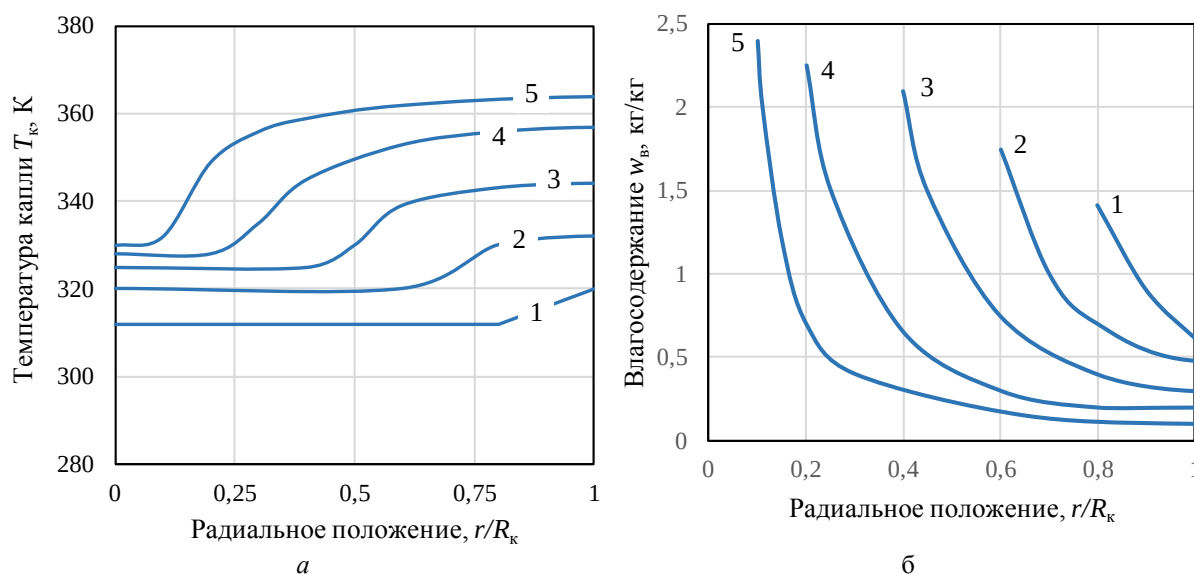


Рис. 5. Профили температуры (а) и влаги (б) внутри капли ($T_r = 363$ К, $D_k = 1,71$ мм) в зависимости от времени t , с: 1 – 72,5; 2 – 79,8; 3 – 99,7; 4 – 152,1; 5 – 199,3

Fig. 5. Temperature (a) and moisture (б) profiles inside a droplet ($T_{gas} = 363$ К, $D_d = 1.71$ mm) depending on time t , s: 1 – 72.5; 2 – 79.8; 3 – 99.7; 4 – 152.1; 5 – 199.3

Закключение

На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы:

- результаты численного моделирования процесса распылительной сушки капель обезжиренного молока на основе механистической модели усадки ядра при различных режимных параметрах удовлетворительно сходятся с экспериментальными данными (относительная погрешность для массы капли составляет в среднем 10,7 %, а абсолютная погрешность для осредненной температуры капли – не более 5 К);
- данная модель кинетики сушки позволяет оценивать изменение температуры и влагосодержания частицы во время сушки в дисперсном виде, что обычно пренебрегается в других подходах;
- валидная модель кинетики сушки может быть использована для моделирования процесса распылительной сушки капель разного диаметра различных суспензий и растворов в периоды постоянной и падающей скорости сушки.

В дальнейшем планируется провести прогнозирование работы полупромышленной распылительной сушилки на основе разработанной математической модели кинетики сушки, чтобы оценить возможность ее использования в реальных условиях при производстве сухого обезжиренного молока.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Беззубцева М. М., Романов А. Р., Волков В. С. Интенсификация процесса распылительной сушки молока с использованием ультразвука // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 56. С. 167–172. DOI: 10.24411/2078-1318-2019-13167. EDN: MXSLFA.
- Белецкая М. Е., Владимиров А. А., Кригер О. В., Голубцова Ю. В. [и др.]. Влияние сушки на качество сухого молока // Молочная промышленность. 2019. № 6. С. 22–23. EDN: FNJHWL.
- Михалева Т. В., Попов П. В. Движение частиц при распылительной сушке молока // Молочная промышленность. 2010. № 4. С. 75–76. EDN: MHUNVB.
- Муродова (Хазраткулова) С. Г. К. Современные технологии сушки в производстве сухого молока и их влияние на качество продукта // Universum: технические науки. 2024. № 9–3(126). С. 14–15. EDN: FZKNSQ.
- Харьков В. В., Вахитов М. Р., Николаев А. Н. К модели сушки обезжиренного молока в распылительной сушилке // Пищевые технологии и биотехнологии. XVIII Всерос. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием (г. Казань, 18–21 апреля 2023 г.) : материалы конференции. Казань : Изд-во КНИТУ, 2023. С. 122–125. EDN: GWWVQR.
- Харьков В. В., Кузнецов М. Г., Николаев А. Н. Модель распылительной сушки суспензий и растворов // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 12. С. 14–19. EDN: DWWCZI.
- Харьков В. В., Николаев А. Н. Выбор модели кинетики сушки дисперсных материалов для вычислительного эксперимента // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 9. С. 7–11. EDN: YLHZNB.
- Харьков В. В., Николаев А. Н. Инженерная методика расчета вихревой камеры со взвешенным капельным слоем // Химическая промышленность сегодня. 2017а. № 1. С. 16–21. EDN: YTXQMF.
- Харьков В. В., Николаев А. Н. Особенности кинетики реакций термического разложения материала при концентрировании во взвешенном слое // Научно-технический вестник Поволжья. 2017б. № 5. С. 33–37. DOI: <https://doi.org/10.24153/2079-5920-2017-7-5-33-37>. EDN: ZQLDFJ.
- Chen X. D., Farid Md., Reid D., Fletcher A. [et al.]. A new model for the drying of milk droplets for fast computation purposes. In Chemeca 99: Chemical Engineering: Solutions in a Changing Environment, Institution of Engineers. Australia, 1999. P. 865–870. DOI: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.949283595459606>.
- Chen X. D., Xie G. Z. Fingerprints of the drying behaviour of particulate or thin layer food materials established using a reaction engineering model // Food and Bioproducts Processing. 1997. Vol. 75, Iss. 4. P. 213–222. DOI: <https://doi.org/10.1205/096030897531612>.
- Dantas A., Piella-Rifà M., Pontes Costa D., Felipe X. [et al.]. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application // Applied Food Research. 2024. Vol. 4, Iss. 1. Article number: 100382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>.
- Jakkamsetty C., Subramanian P., Rashidinejad A. Spray drying of milk and milk products. In Spray drying for the food industry / eds.: S. M. Jafari, K. Samborska. Chapter 4. P. 87–123. Woodhead Publishing, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819799-8.00002-8>.
- Langrish T. A. G., Kockel T. K. The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modelling // Chemical Engineering Journal. 2001. Vol. 84, Iss. 1. P. 69–74. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00384-3](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00384-3).
- Milk and dairy products in human nutrition / technical eds.: E. Muehlhoff, A. Bennett, D. McMahon. Food and agriculture organization of the United Nations. Rome, 2013.
- Mohammed F. A new approach to modelling of single droplet drying // Chemical Engineering Science. 2003. Vol. 58, Iss. 13. P. 2985–2993. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(03\)00161-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00161-1).
- Nešić S., Vodnik J. Kinetics of droplet evaporation // Chemical Engineering Science. 1991. Vol. 46, Iss. 2. P. 527–537. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(91\)80013-O](https://doi.org/10.1016/0009-2509(91)80013-O).
- Poozesh S., Lu K., Marsac P. J. On the particle formation in spray drying process for bio-pharmaceutical applications: Interrogating a new model via computational fluid dynamics // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 122. P. 863–876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.043>.
- Pugliese A., Cabassi G., Chiavaro E., Paciulli M. [et al.]. Physical characterization of whole and skim dried milk powders // Journal of Food Science and Technology. 2017. Vol. 54. P. 3433–3442. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2795-1>.

- Putranto A., Chen X. D. The relative activation energy of food materials: Important parameters to describe drying kinetics // *International Journal of Food Properties*. 2016. Vol. 19, Iss. 8. P. 1726–1737. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.999863>.
- Schmitz-Schug I., Kulozik U., Foerst P. Modeling spray drying of dairy products – Impact of drying kinetics, reaction kinetics and spray drying conditions on lysine loss // *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 141. P. 315–329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.11.008>.
- Wadud Ahmed Md., Schulnies F., Kleinschmidt T. Residence time distribution and kinetics of insolubility of skim milk powder during spray drying // *Food and Humanity*. 2024. Vol. 2. Article number: 100211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.100211>.
- Wijlhuizen A. E., Kerkhof P. J. A. M., Bruin S. Theoretical study of the inactivation of phosphatase during spray drying of skim-milk // *Chemical Engineering Science*. 1979. Vol. 34, Iss. 5. P. 651–660. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(79\)85110-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(79)85110-6).
- Woo M. W., Daud W. R. W., Mujumdar A. S., Talib M. Z. M. [et al.]. Comparative study of droplet drying models for CFD modelling // *Chemical Engineering Research and Design*. 2008. Vol. 86, Iss. 9. P. 1038–1048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.04.003>.
- Zhang X., Chen X., Xu Y., Yang J. [et al.]. Milk consumption and multiple health outcomes: umbrella review of systematic reviews and meta-analyses in humans // *Nutrition & Metabolism*. 2021. Vol. 18. Article number: 7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12986-020-00527-y>.

References

- Bezzubtseva, M. M., Romanov, A. R., Volkov, V. S. 2019. Intensification of the process of spray drying of milk using ultrasound. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*, 56, pp. 167–172. DOI: 10.24411/2078-1318-2019-13167. EDN: MXSLFA. (In Russ.)
- Beletskaya, M. E., Vladimirov, A. A., Krieger, O. V., Golubtsova, Yu. V. et al. 2019. The effect of drying on the quality of milk powder. *Dairy Industry*, 6, pp. 22–23. EDN: FNJHWL. (In Russ.)
- Mikhaleva, T. V., Popov, P. V. 2010. Particle motion during spray drying of milk. *Dairy Industry*, 4, pp. 75–76. EDN: MHUNVB. (In Russ.)
- Murodova (Khazratkulova), S. G. K. 2024. Modern drying technologies in the production of powdered milk and their impact on product quality. *Universum: Technical Sciences*, 9–3(126), pp. 14–15. EDN: FZKNSQ. (In Russ.)
- Kharkov, V. V., Vakhitov, M. R., Nikolaev, A. N. 2023. Towards a model for drying skimmed milk in a spray dryer. *Proceedings of Intern. conf. Food Technologies and Biotechnologies: XVIII All-Russian Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students with International participation, Kazan, 2023*. Kazan, pp. 122–125. EDN: GWWVQR. (In Russ.)
- Kharkov, V. V., Kuznetsov, M. G., Nikolaev, A. N. 2024. Model of spray drying of suspensions and solutions. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 12, pp. 14–19. EDN: DWWCZI. (In Russ.)
- Kharkov, V. V., Nikolaev, A. N. 2018. The choice of a model of kinetics of drying of dispersed materials for a computational experiment. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 9, pp. 7–11. EDN: YLHZNB. (In Russ.)
- Kharkov, V. V., Nikolaev, A. N. 2017a. Engineering method for calculating a vortex chamber with a weighted droplet layer. *Chemical Industry Today*, 1, pp. 16–21. EDN: YTXQMF. (In Russ.)
- Kharkov, V. V., Nikolaev, A. N. 2017b. Features of the kinetics of thermal decomposition reactions of a material during concentration in a suspended layer. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 5, pp. 33–37. DOI: <https://doi.org/10.24153/2079-5920-2017-7-5-33-37>. EDN: ZQLDFJ. (In Russ.)
- Chen, X. D., Farid, Md., Reid, D., Fletcher, A. et al. 1999. A new model for the drying of milk droplets for fast computation purposes. In *Chemeca 99: Chemical Engineering: Solutions in a Changing Environment, Institution of Engineers*. Monograph. Australia, pp. 865–870. DOI: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.949283595459606>.
- Chen, X. D., Xie, G. Z. 1997. Fingerprints of the drying behaviour of particulate or thin layer food materials established using a reaction engineering model. *Food and Bioproducts Processing*, 75(4), pp. 213–222. DOI: <https://doi.org/10.1205/096030897531612>.
- Dantas, A., Piella-Rifà, M., Pontes Costa, D., Felipe, X. et al. 2024. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application. *Applied Food Research*, 4(1). Article number: 100382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>.
- Jakkamsetty, C., Subramanian, P., Rashidinejad, A. 2024. Spray drying of milk and milk products. In *Spray drying for the food industry*. Monograph. Eds.: S. M. Jafari, K. Samborska. Chapter 4, pp. 87–123. Woodhead Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819799-8.00002-8>.
- Langrish, T. A. G., Kockel, T. K. 2001. The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modelling. *Chemical Engineering Journal*, 84(1), pp. 69–74. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00384-3](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00384-3).

- Milk and dairy products in human nutrition. 2013. Monograph. Technical Eds.: E. Muehlhoff, A. Bennett, D. McMahon. Food and agriculture organization of the United Nations. Rome.
- Mohammed, F. 2003. A new approach to modelling of single droplet drying. *Chemical Engineering Science*, 58(13), pp. 2985–2993. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(03\)00161-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00161-1).
- Nešić, S., Vodnik, J. 1991. Kinetics of droplet evaporation. *Chemical Engineering Science*, 46(2), pp. 527–537. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(91\)80013-O](https://doi.org/10.1016/0009-2509(91)80013-O).
- Poozesh, S., Lu, K., Marsac, P. J. 2018. On the particle formation in spray drying process for bio-pharmaceutical applications: Interrogating a new model via computational fluid dynamics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122, pp. 863–876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.043>.
- Pugliese, A., Cabassi, G., Chiavaro, E., Paciulli, M. et al. 2017. Physical characterization of whole and skim dried milk powders. *Journal of Food Science and Technology*, 54, pp. 3433–3442. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2795-1>.
- Putranto, A., Chen, X. D. 2016. The relative activation energy of food materials: Important parameters to describe drying kinetics. *International Journal of Food Properties*, 19(8), pp. 1726–1737. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.999863>.
- Schmitz-Schug, I., Kulozik, U., Foerst, P. 2016. Modeling spray drying of dairy products – Impact of drying kinetics, reaction kinetics and spray drying conditions on lysine loss. *Chemical Engineering Science*, 141, pp. 315–329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.11.008>.
- Wadud Ahmed, Md., Schulnies, F., Kleinschmidt, T. 2024. Residence time distribution and kinetics of insolubility of skim milk powder during spray drying. *Food and Humanity*, 2. Article number: 100211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.100211>.
- Wijlhuizen, A. E., Kerkhof, P. J. A. M., Bruin, S. 1979. Theoretical study of the inactivation of phosphatase during spray drying of skim-milk. *Chemical Engineering Science*, 34(5), pp. 651–660. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(79\)85110-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(79)85110-6).
- Woo, M. W., Daud, W. R. W., Mujumdar, A. S., Talib, M. Z. M. et al. 2008. Comparative study of droplet drying models for CFD modelling. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(9), pp. 1038–1048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.04.003>.
- Zhang, X., Chen, X., Xu, Y., Yang, J. et al. 2021. Milk consumption and multiple health outcomes: umbrella review of systematic reviews and meta-analyses in humans. *Nutrition & Metabolism*, 18. Article number: 7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12986-020-00527-y>.

Сведения об авторах

Харьков Виталий Викторович – ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Россия, 420015;
Казанский национальный исследовательский технологический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Vitaly V. Kharkov – 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia, 420015;
Kazan National Research Technological University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>

Лаврова Камилла Зайдуллаевна – ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Россия, 420015;
Казанский национальный исследовательский технологический университет, аспирант;
e-mail: kamillavrova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0975-8758>

Kamilla Z. Lavrova – 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia, 420015;
Kazan National Research Technological University, PhD Student;
e-mail: kamillavrova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0975-8758>

Современные методы бланширования и их влияние на процесс сушки фруктов и овощей

Л. Ч. Бурак

Общество с ограниченной ответственностью "БЕЛПРОСАКБА", г. Минск, Республика Беларусь;
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
11.03.2025;

принята
к публикации
17.03.2025

Ключевые слова:

фрукты, овощи,
микробиологическая
обсемененность,
сушка,
бланширование,
инфракрасное излучение,
пищевая ценность,
качество

Традиционные методы сушки фруктов и овощей являются эффективным способом сохранения и увеличения срока годности плодоовощного сырья. Вместе с тем процесс сушки часто приводит к нежелательным изменениям физико-химических, органолептических свойств и пищевой ценности высушенных продуктов. Бланширование как метод предварительной подготовки плодоовощного сырья перед сушкой оказывает значительное влияние как на процесс сушки, так и на качество готового продукта. Цель данного исследования – анализ современных способов бланширования, эффективность их влияния на процесс сушки фруктов и овощей и качество готового продукта. В ходе анализа научных публикаций основное внимание уделялось инфракрасному бланшированию. В качестве материалов и методов исследования послужили 104 научные публикации. В обзор включены статьи, опубликованные на английском и русском языках в 2015–2025 гг. Поиск научной литературы по данной теме проводили по ключевым словам в библиографических базах Scopus, Web of science, PubMed и Google Scholar. Анализ данных выполнен с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением с использованием элементов искусственного интеллекта. В ходе анализа научных исследований установлены достоинства и недостатки различных методов бланшировки, таких как бланширование водой, паром, также микроволновое, инфракрасное, которые используются в качестве предварительной обработки фруктов и овощей перед проведением технологического процесса сушки. Инфракрасное бланширование является современной инновационной технологией, оказывающей эффективное влияние на улучшение качества сушеных продуктов за счет значительного сокращения времени сушки и, соответственно, энергоемкости процесса. Данные исследований свидетельствуют о том, что инфракрасное бланширование может сократить время сушки до 50 %, увеличить скорость сушки и снизить потребление энергии примерно на 17 %, достигая уровня энергоэффективности 80–90 %. Однако максимальная эффективность инфракрасного метода бланшировки достигается при соблюдении таких параметров, как толщина продукта (2–5 см), длительность обработки (от 30 секунд до нескольких минут) и расстояние от инфракрасного излучателя (10–30 см). Результаты научных исследований показали, что использование инфракрасного способа бланширования оказывает положительное влияние на консистенцию, сохранение цвета и питательных веществ в сушеных фруктах и овощах. При этом существующие ограничения использования данного метода бланширования требуют проведения дальнейших научных исследований, которые должны быть направлены на анализ эффективности применения комбинированных методов бланшировки, установление и оптимизацию параметров обработки, которые позволят повысить эффективность процесса сушки овощей и фруктов и будут способствовать максимальному сохранению пищевой ценности и качества сушеных продуктов.

Для цитирования

Бурак Л. Ч. Современные методы бланширования и их влияние на процесс сушки фруктов и овощей. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 273–295. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-273-295>.

Modern methods of blanching and their influence on the process of drying fruits and vegetables

Leonid Ch. Burak

Limited Liability Company "BELROSAKVA", Minsk, Republic of Belarus;

e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Article info

Received
11.03.2025;

accepted
17.03.2025

Key words:

fruits,
vegetables,
microbiological
contamination,
drying,
blanching,
infrared radiation,
nutritional value,
quality

Abstract

Traditional methods of drying fruits and vegetables are effective ways to preserve and increase the shelf life of fruit and vegetable raw materials. However, the drying process often leads to undesirable changes in the physicochemical, organoleptic properties and nutritional value of dried products. Blanching as a method of preliminary preparation of fruit and vegetable raw materials before drying has a significant impact on both the drying process and the quality of the finished product. The purpose of this study is to analyze modern blanching methods, the effectiveness of their impact on the drying process of fruits and vegetables and the quality of the finished product. During the analysis of scientific publications, the main attention has been paid to infrared blanching. 104 scientific publications have served as materials and methods of the study. The review includes articles published in English and Russian in 2015–2025. The search for scientific literature on this topic has been carried out by keywords in the bibliographic databases Scopus, Web of science, PubMed and Google Scholar. The data analysis has been performed with their systematization, generalization, intermediate conclusions and a general conclusion using elements of artificial intelligence. During the analysis of scientific research, the advantages and disadvantages of various blanching methods have been established, such as blanching with water, steam, as well as microwave, infrared, which are used as a preliminary treatment of fruits and vegetables before the drying process. Infrared blanching is a modern innovative technology that has an effective impact on improving the quality of dried products by significantly reducing the drying time and, accordingly, the energy intensity of the process. Research data indicate that infrared blanching can reduce drying time by up to 50 %, increase the drying speed and reduce energy consumption by about 17 %, reaching energy efficiency levels of 80–90 %. However, the maximum efficiency of the infrared blanching method is achieved when observing such parameters as product thickness (2–5 cm), processing time (from 30 seconds to several minutes) and distance from the infrared emitter (10–30 cm). The results of scientific research have shown that the use of the infrared blanching method has a positive effect on the consistency, color and nutrient retention in dried fruits and vegetables. At the same time, the existing limitations of using this blanching method require further scientific research, which should be aimed at analyzing the effectiveness of using combined blanching methods, establishing and optimizing processing parameters that will increase the efficiency of the drying process of vegetables and fruits and will contribute to the maximum preservation of the nutritional value and quality of dried products.

For citation

Burak, L. Ch. 2025. Modern methods of blanching and their influence on the process of drying fruits and vegetables. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 273–295. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-273-295>.

Введение

Фрукты и овощи имеют высокое содержание воды (80–90 %), что приводит к порче продуктов и последующей потере качества и пищевой ценности плодоовощного сырья. Поиск и применение современных способов и методов сушки плодоовощного сырья направлены на обеспечение качества и микробиологической стабильности сушеных продуктов в процессе хранения и увеличения срока годности без применения синтетических консервантов. Вместе с тем процесс сушки может привести к деградации и разрушению биологически активных веществ из-за их термической чувствительности. С этой целью особо важно найти подходящие методы сушки, которые обеспечивают получение новых продуктов с высокопористой высушенной текстурой, высоким уровнем удержания активных ингредиентов, оптимальным выходом при сушке и максимальным сохранением фитокомпонентов, а также более высокой энергоэффективностью, низкой стоимостью, безопасностью и экологичностью (Бурак, 2025; Adeyeye et al., 2022). Для решения этих проблем научное сообщество находится в постоянном поиске эффективных методов и способов предварительной подготовки сырья перед сушкой, которые позволят повысить эффективность процесса и качество готовой продукции.

Бланширование является наиболее значимым методом предварительной обработки фруктов, овощей и других пищевых продуктов (Бурак, 2024a; Richter Reis, 2023). Бланшировка – одна из основных операций предварительной обработки перед сушкой, консервированием или замораживанием фруктов и овощей. Бланширование горячей водой (БГВ) и бланширование острым паром (БОП) обычно используются в пищевой промышленности для предварительной обработки фруктов и овощей (Бурак и др., 2024a; Wu et al., 2024). Основная цель процесса бланширования – инактивировать в пищевом сырье эндоферменты, такие как полифенолоксидаза (ПФО), пероксидаза (ПОД) и каталаза, которые отвечают за потемнение пищевых продуктов и выделение неприятных запахов во время обработки и хранения (Бурак и др., 2024a; Xiao et al., 2017). Несмотря на вызванную нагреванием инактивацию ферментов, бланширование позволяет сохранить органолептические свойства плодоовощного сырья, смягчает консистенцию пищевых продуктов, облегчая последующие операции, такие как очистка, нарезка или сушка (Wu et al., 2024). Этот процесс также способствует снижению микробиологической обсемененности на поверхности пищевых продуктов, тем самым продлевая срок годности конечных продуктов (Бурак, 2024a). Для достижения максимальной эффективности процесса необходимо тщательно оптимизировать временные и температурные параметры бланширования. Неправильные условия бланширования могут привести к значительным потерям питательных веществ и нежелательным изменениям органолептических показателей. Потому на протяжении последних десятилетий были проведены обширные исследования для определения оптимальных условий бланширования для различных пищевых продуктов с учетом типа, размера и тепловых свойств продуктов.

Результаты последних научных достижений по оценке методов бланширования показали перспективу и необходимость использования, эффективность, универсальность и энергоемкость таких методов, как инфракрасное (ИК), микроволновое (МВ) и ультразвуковое (УЗ) бланширование (Бурак, 2024b; Llavata et al., 2020). Инфракрасное бланширование (ИКБ) является эффективным и универсальным методом обработки пищевых продуктов, обеспечивающим значительные преимущества в энергоэффективности, времени обработки и теплопередаче по сравнению с традиционными термическими методами (ТМ) (Бурак и др., 2024b; Okonkwo et al., 2022; Tyagi et al., 2020). Высокая энергоэффективность в процессе применения инфракрасного излучения обусловлена тем, что во время ИК-нагрева энергия может быстро передаваться от излучателя к продуктам питания в виде волн без нагрева окружающей среды, что снижает потери тепла и сводит к минимуму ухудшение качества продукта, что еще больше сокращает время обработки и затраты на электроэнергию (Бурак и др., 2024b; Huang et al., 2021). Например, в своем исследовании Anuj Sonal et al. (2020) продемонстрировали потребление энергии 5,3; 3,4 и 3,2 кВтч/кг при работе ИК-сушилки при температурах 50, 60 и 70 °С соответственно, что указывает на оптимальную энергоэффективность при 70 °С. Эффективность ИК-нагрева в основном зависит от того, насколько материал поглощает ИК-излучение; чем больше поглощение ИК-излучения, тем эффективнее нагрев. Когда длины волн излучателя совпадают с длинами волн нагретого материала, генерируемая ИК-энергия может быть максимально поглощена, вызывая резонанс и трение между молекулами материала, что приводит к повышению его температуры (Бурак и др., 2024b).

В процессе научного обзора установлено, что многие научные публикации сосредоточены на общих аспектах процесса бланширования и нет углубленных анализов конкретного использования современных методов бланширования, их достоинств и недостатков, включая инфракрасный метод бланширования в качестве предварительной обработки в процессе сушки фруктов и овощей.

Цель данного исследования – анализ современных способов бланширования, инфракрасного нагрева, эффективность их влияния на процесс сушки фруктов и овощей и качество готового продукта. Наряду

с традиционными и инновационными методами бланширования значительное внимание уделялось анализу и оценке последних достижений в применении инфракрасного метода бланширования.

Материалы и методы

В качестве материалов и методов исследования послужили 104 научные публикации. В обзор включены статьи, опубликованные на английском и русском языках в 2015–2025 гг. Поиск научной литературы по данной теме проводили по ключевым словам в библиографических базах Scopus, Web of science, PubMed и Google Scholar. Отбор источников для анализа реализовался по следующим ключевым словам: infrared radiation, quality, nutritional value, blanching, cleaning of vegetables and fruits, drying of fruit and vegetable raw materials, enzyme inactivation, microbiological contamination, инфракрасное излучение, качество, пищевая ценность, бланширование, очистка овощей и фруктов, сушка плодовоовощного сырья, инактивация ферментов, микробиологическое загрязнение.

Применялись следующие критерии включения для статей, подлежащих анализу:

- 1) статья написана в период 2015–2025 гг.;
- 2) статья соответствует теме исследования;
- 3) типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, краткие отчеты.

Критерии исключения для статей, подлежащих анализу:

- 1) статья не соответствует теме данного обзора: не касается тематики бланширования как метода предварительной обработки фруктов и овощей перед сушкой, современных инновационных технологий бланшировки, каталитического инфракрасного нагрева при обработке плодов и овощей;
- 2) статья написана не на английском языке, статья на русском языке не входит в РИНЦ;
- 3) содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Анализ данных выполнен с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением с использованием элементов искусственного интеллекта.

Результаты и обсуждение

1. Принцип действия инфракрасного излучения (ИК-излучения)

Инфракрасное (ИК) излучение – это электромагнитные волны, которые находятся между видимым светом и микроволнами и охватывают диапазон от 0,78 до 1 000 мкм. В зависимости от длины волны ИК-диапазон делится на три области: ближнюю ИК (0,78–1,4 мкм), среднюю ИК (1,4–3,0 мкм) и дальнюю ИК (3,0–1 000 мкм) (Бурак и др., 2024а; 2024б; Adeyeye et al., 2022; Oduola et al., 2022). ИК-нагрев работает на основе селективного поглощения, при котором молекулы воды и полярные соединения в тканях растений поглощают ИК-излучение, что приводит к быстрому нагреву и испарению влаги (Aboud et al., 2019; Adeyeye et al., 2022). Этот механизм обеспечивает эффективную и целенаправленную передачу энергии от источника ИК-тепла к продукту. В пищевой промышленности ближний ИК-нагрев обычно используется для неразрушающего контроля и оценки качества сырья и готовой продукции, тогда как дальний и средний ИК-нагрев применяются для нагрева, бланширования и сушки фруктов и овощей (Бурак и др., 2024а; Fayaz et al., 2023). Лучевая энергия передается материалу во время ИК-нагрева, вызывая вращение и вибрацию молекул. Когда молекулы возвращаются в свое естественное состояние, поглощенная энергия преобразуется в тепло, что способствует термической обработке (Xiao et al., 2017; Oduola et al., 2022).

Для применения в пищевой промышленности при обработке фруктов и овощей были изучены два основных типа систем ИК-нагрева: электрический инфракрасный нагрев (ЭИК-нагрев) и каталитический инфракрасный нагрев (КИК-нагрев) (Wu et al., 2024). При бланшировании с помощью ЭИК используются электрически нагреваемые излучатели, такие как вольфрамовая нить или нихромовая проволока, для генерации необходимого ИК-излучения. Эти излучатели обычно располагаются над или под продуктом, что обеспечивает прямой нагрев поверхности (Fayaz et al., 2023). Напротив, бланширование с помощью КИК основано на сжигании топлива, обычно природного газа или пропана, для генерации ИК-энергии. Системы КИК обеспечивают высокую энергоэффективность по сравнению с ЭИК, достигая эффективности 80–90 % при потреблении на 60–70 % меньше энергии, чем электрические системы инфракрасного нагрева (Бурак и др., 2024б; Tyagi et al., 2020; Wang et al., 2024). Такое значительное снижение потребления энергии в первую очередь объясняется особым механизмом нагрева, который включает каталитическую реакцию, преобразующую топливо в тепло. В электрических нагревателях ЭИК катализатор, обычно состоящий из металлов, таких как платина или палладий, необходимо сначала предварительно нагреть

примерно до 150 °С, чтобы активировать его (Gu et al., 2022; Wang et al., 2024). После активации источник питания автоматически отключается, что позволяет экономить энергию и поддерживать оптимальные условия для каталитической реакции. На этом этапе катализатор вводится в источник топлива (например, природный газ или пропан) вместе с воздухом, вызывая каталитическую реакцию, которая способствует горению без открытого пламени (Wu et al., 2024). Полученное тепло передается на материал подложки, обычно керамический или металлический, который эффективно излучает ИК-энергию (Huang et al., 2021). В результате нагреватели КИК испускают ИК-излучение, которое напрямую нагревает целевой продукт, а не просто нагревает окружающий воздух, что повышает эффективность нагрева и снижает потребление энергии (Бурак и др., 2024б; Wu et al., 2024).

Вместе с тем необходимо отметить, что системы ЭИК, как правило, обеспечивают лучший контроль температуры и легче интегрируются в существующие технологические линии (Joardder et al., 2023). ЭИК системы бланширования можно дополнительно классифицировать в соответствии с конкретными диапазонами длин волн, которые они излучают и которые определяются типом используемого нагревательного элемента.

Три основные категории ЭИК-нагревателей – это керамические, кварцевые и галогенные нагреватели (Tyagi et al., 2020). Керамические ИК-нагреватели используют резистивный керамический элемент, который нагревается до высоких температур – обычно от 300 до 700 °С – для генерации длинноволнового ИК-излучения в диапазоне длин волн 2–10 мкм. Эта длинноволновая ИК-энергия особенно эффективна для быстрого поверхностного нагрева пищевых продуктов, что делает керамические ИК-нагреватели популярным выбором при использовании ИК-бланширования (Joardder et al., 2023; Zhao et al., 2023). С другой стороны, кварцевые ИК-нагреватели используют кварцево-галогеновую лампу в качестве нагревательного элемента, которая может достигать температуры до 2 000 °С. Эти нагреватели излучают средневолновое и коротковолновое ИК-излучение, как правило, в диапазоне длин волн 0,9–3,5 мкм. Более короткие длины волн, создаваемые кварцевыми ИК-нагревателями, обеспечивают более глубокое проникновение в продукт, что делает их пригодными для применений, требующих более объемного нагрева (Jenkins et al., 2019; Joardder et al., 2023). Галогенные ИК-нагреватели похожи на кварцевые ИК-нагреватели, но используют вольфрамовую нить, заключенную в кварцевую оболочку, заполненную галогеном. Такая конфигурация позволяет галогенным ИК-нагревателям работать при еще более высоких температурах, до 2 500 °С, создавая коротковолновое ИК-излучение в диапазоне 0,7–1,4 мкм. Высокоинтенсивная коротковолновая энергия галогенных ИК-нагревателей способствует быстрому нагреву поверхности и обеспечивает повышенную энергоэффективность по сравнению с другими технологиями ЭИК (Joardder et al., 2023).

Выбор подходящего типа нагревателя ЭИК (керамический, кварцевый или галогенный) для ИК-бланширования зависит от конкретных характеристик продукта, желаемых профилей нагрева и общих требований к конструкции системы. Однако галогенные нагреватели для ИК-бланширования (ИКБ) могут представлять некоторые проблемы из-за высоких рабочих температур (до 2 500 °С). Интенсивное высокоэнергетическое излучение потенциально может повредить поверхность пищевого продукта во время бланширования, поэтому требует более щадящего и контролируемого нагрева. Как правило, диапазон температур, обычно используемый для бланширования пищевых продуктов, составляет от 650 до 1 200 °С (Tyagi et al., 2020). Глубина проникновения ИК-излучения в пищевые продукты сильно зависит от длины волны ИК-излучения. Более коротковолновое ближнее ИК-излучение (0,7–1,4 мкм) может проникать глубже в пищевую матрицу по сравнению с более длинноволновым ближним ИК-излучением (2–4 мкм) или дальним ИК-излучением (4–14 мкм) (Joardder et al., 2023; Tyagi et al., 2020).

Состав и структура пищевого продукта также играют значительную роль в определении глубины проникновения ИК-излучения (Delfiya et al., 2022; Phyo et al., 2019). Продукты с более высоким содержанием воды и более плотной структурой обычно демонстрируют меньшую глубину проникновения из-за повышенного поглощения и рассеивания ИК-излучения. И наоборот, продукты с более низким содержанием воды и менее плотной структурой допускают более глубокое проникновение ИК-излучения (Tyagi et al., 2020; Phyo et al., 2019). В работе Tyagi et al. (2020) авторы изучали глубину проникновения ИК-излучения при нагревании различных пищевых материалов. Результаты показали, что глубина проникновения для печенья составила 4 мм при длине волны 1 мкм и 12 мм при 0,88 мкм. Более того, глубина проникновения при длине волны 1 мкм менялась в зависимости от различных пищевых материалов: 2 мм для зерна, 1,5 мм для моркови, 1 мм для томатной пасты (содержание влаги 75–85 %), 12 мм для хлеба и 6 мм для сырого картофеля (Tyagi et al., 2020).

Поэтому выбор длины волны ИК-излучения и системы нагрева следует тщательно анализировать, чтобы оптимизировать баланс между поверхностным нагревом, внутренним проникновением и общими качественными характеристиками пищевого продукта. Следует отметить, что глубина проникновения ИК-энергии не оказала существенного влияния на распределение температуры внутри пищевого материала

(Huang et al., 2021). Механизм повышения внутренней температуры пищевых материалов во время ИКБ включает избирательное поглощение и нагревание различных компонентов пищи, в частности молекул воды (Tyagi et al., 2020). Когда ИК-излучение взаимодействует с поверхностью пищи, высокоэнергетические фотоны преимущественно поглощаются молекулами воды во внешних слоях. Это избирательное поглощение заставляет молекулы воды вибрировать и увеличивает кинетическую энергию, что приводит к быстрому повышению температуры на поверхности (Joardder et al., 2023). Затем нагретые молекулы воды передают свою тепловую энергию окружающей пищевой матрице посредством процессов кондуктивного и конвективного теплопереноса (Bouhile et al., 2025). Этот локализованный нагрев поверхности создает температурный градиент, который направляет тепло внутрь, даже когда ИК-излучение не достигает более глубоких областей продукта (Tyagi et al., 2020). Кроме того, другие компоненты пищи, такие как белки и углеводы, могут поглощать ИК-излучение, способствуя общему нагреву пищи (Joardder et al., 2023). Относительное распределение воды, белков и других молекул в структуре пищи влияет на эффективность этого механизма нагрева (Бурак и др., 2024а).

Понимание этих сложных взаимодействий между ИК-энергией и компонентами обрабатываемого продукта имеет решающее значение для оптимизации процесса ИКБ для различных видов овощей и фруктов.

2. Современные технологии бланширования фруктов и овощей

2.1. Традиционные технологии бланширования

Бланширование горячей водой (БГВ) является наиболее широко используемым и применяемым в промышленности методом бланширования пищевых продуктов благодаря своей простоте и удобству эксплуатации (Бурак, 2024б; Bouhile et al., 2025; Abu-Ghannam et al., 2015). При БГВ пищевые продукты погружаются в горячую воду обычно в диапазоне от 70 до 100 °C на несколько минут. Данная обработка способствует инактивации ферментов, изменению консистенции и удалению кожуры (Richter Reis, 2023). Однако обычное БГВ также может приводить к нежелательным побочным эффектам, таким как повреждение клеток тканей, денатурация белка и потеря питательных веществ (Бурак, 2025; Бурак, 2024б; Xiao et al., 2017). Горячая вода вызывает выщелачивание или диффузию водорастворимых питательных веществ, таких как витамины, минералы, углеводы, сахара и белки, в воду для бланширования (Бурак, 2025; Renard et al., 2023). Кроме того, это приводит к деградации термочувствительных биологически активных соединений, снижению аромата, изменению вкуса (Richter Reis, 2023). Так, например, Avila et al. (2023) сообщили, что БГВ в течение 1 мин привел к потере приблизительно 26, 20, 14, 13 и 12 % фенольных соединений в водном шпинате, белокочанной капусте, шпинате, луке-шалоте и брюссельской капусте соответственно. В исследовании Abu-Ghannam et al. (2015) установили, что обработка кипящей водой значительно снизила антиоксидантную способность капусты. Аналогичное снижение общего содержания фенолов и антиоксидантных веществ было отмечено после БГВ в различных овощах, таких как красный болгарский перец (Wang et al., 2017), ямс (Quayson et al., 2021), самнамул (Kim et al., 2020) и картофель (Makavana, 2018). При этом сточные воды от операций с горячей водой часто содержат высокие уровни органических веществ и питательных веществ, таких как азот и фосфор, из-за выщелачивания и растворения водорастворимых соединений, а при несоблюдении экологических требований они могут способствовать загрязнению окружающей среды (Бурак, 2025; Akinnowo, 2023).

ИКБ является современной и более эффективной альтернативой термическим методам бланширования. Процесс ИК-нагрева, как правило, требует меньше времени обработки, чем традиционные методы, поскольку энергия напрямую передается пищевому материалу без необходимости использования внешнего источника нагрева (Бурак и др., 2024б; Tyagi et al., 2020). Прямое воздействие обеспечивает такие преимущества, как высокая тепловая эффективность, минимальные изменения качества продукта, а также сокращение времени обработки и затрат на электроэнергию (Wu et al., 2024). Кроме того, контролируемое применение ИК-излучения помогает сохранить цвет, текстуру и общее сенсорное качество сушеных фруктов и овощей, что приводит к получению превосходного конечного продукта (Bouhile et al., 2025; Tyagi et al., 2020). Например, Wu et al. (2018b) обнаружили, что морковь, бланшированная ИК-излучением и высушенная горячим воздухом, показала более высокую скорость сушки, потребовала меньше времени на сушку, сохранила больше витамина С, показала лучшую способность к регидратации, незначительно изменила цвет и имела меньшую толщину и радиальную усадку по сравнению с образцами, бланшированными ГВ и высушенными горячим воздухом. Аналогичным образом, Okonkwo et al. (2022) наблюдали, что картофель, бланшированный ИК-излучением, имел наименьшее изменение цвета, самую медленную потерю влаги, более низкую микробную активность и более высокий уровень витамина С, чем образцы, бланшированные ГВ. Касаемо инактивации ферментов установлено, что ИК-нагрев потребовал 10–15 мин для бланширования

ломтиков моркови, что значительно дольше, чем 5–10 мин, необходимых для методов кипячения паром и ГВ. Разницу можно объяснить постепенным повышением температуры и движением воздуха на поверхности образца во время ИКБ (*Bouhile et al., 2025*). Эти факторы способствуют более контролируемому и стабильному повышению температуры, что приводит к улучшению качества продукта, о чем свидетельствует более высокое сохранение витамина С по сравнению с бланшированием паром и горячей водой.

Бланширование горячим воздухом (БГВо) – еще один традиционный метод предварительной обработки фруктов и овощей, при котором нагретый воздух используется для инактивации ферментов и сохранения качества продукта перед сушкой (*Bouhile et al., 2025; Guo et al., 2023*). Сравнительные исследования показывают, что хотя БГВо и ИКБ направлены на сохранение цвета и текстуры, ИК-бланширование, как правило, более эффективно сохраняет консистенцию и структуру фруктов и овощей за счет быстрого нагрева (*Ju et al., 2023*). Так, например, *Jiang et al. (2024)* сравнили воздействие ИКБ и БГВо на клубнику и установили, что ИКБ вызвал незначительные структурные повреждения, что позволило образцам сохранить пористую текстуру, которая усилила их хрусткость. Напротив, БГВо привело к большей деградации цвета и разрушению клеточных стенок, что вызвало потерю структурной целостности из-за длительного времени сушки и постепенного повышения температуры.

2.2. Инновационные технологии бланширования

Микроволновое бланширование (МВБ) – это инновационный метод термической обработки, который использует электромагнитные волны для быстрого нагрева и инактивации ферментов во фруктах и овощах и представляет эффективную альтернативу традиционным методам бланширования (*Guruprasad et al., 2024; Бурак и др., 2023*). Исследование, проведенное *Okonkwo et al. (2022)*, показало, что МВБ картофеля значительно эффективнее дезактивирует ферменты пероксидазы (ПОД), требуя всего 5–7 мин по сравнению с 18–21 мин, которые необходимы для ИКБ. Кроме того, МВБ ассоциируется с уменьшенной утечкой электролита и улучшенной микроструктурной целостностью, что указывает на минимальное повреждение клеточных мембран. Вместе с тем ИКБ во многих случаях более эффективно для сохранения качества продукта, о чем свидетельствует меньшее изменение цвета и потеря влаги. При сравнении ИКБ и МВБ относительно глубины проникновения возникают значительные различия из-за их соответствующих механизмов теплопередачи (*Zahoor et al., 2023*). ИКБ использует лучевую энергию для нагрева поверхности пищи, а затем тепло передается внутрь посредством теплопроводности. Это приводит к ограниченной глубине проникновения, что делает его эффективнее для более мелких или тонких пищевых продуктов, поскольку внешним слоям нужно время, чтобы провести тепло к центру (*Bouhile et al., 2025; Xiao et al., 2017*). Напротив, МВБ использует электромагнитные волны, которые перемешивают молекулы воды внутри пищи, равномерно генерируя тепло по всему материалу и обеспечивая более глубокое проникновение, часто простирающееся на несколько сантиметров в зависимости от частоты и характеристик пищи (*Nguyen et al., 2022; Zahoor et al., 2023*). Этот объемный нагрев обеспечивает равномерное распределение тепла и более короткое время обработки, что особенно полезно для более толстых или плотных продуктов (*Zeng et al., 2022*).

Радиочастотное бланширование (РЧБ), как и микроволновый нагрев, представляет собой метод диэлектрического нагрева, который использует электромагнитные поля на радиочастотах для достижения объемного нагрева пищи (*Zhang et al., 2020a*). РЧ-нагрев имеет несколько преимуществ по сравнению с ИК- и микроволновым нагревом, включая более равномерное распределение и более глубокое проникновение тепла, причем глубина проникновения достигает нескольких дециметров (*Zeng et al., 2022; Zhang et al., 2020b*). Этот метод, как правило, способствует более быстрому тепловому равновесию, потенциально сокращая общее время обработки по сравнению с ИКБ (*Zeng et al., 2022*). Кроме того, процесс РЧБ приводит к меньшей потере влаги и лучшему сохранению клеточной целостности, вероятно, из-за его способности быстро генерировать пар внутри пищевых матриц (*Guo et al., 2019*). Вместе с тем большие габаритные размеры и высокая стоимость оборудования РЧБ являются значительной проблемой для промышленного использования, тогда как оборудование ИКБ, как правило, более простое и экономически эффективное (*Бурак и др., 2024a; Guo et al., 2019; Zeng et al., 2022*).

Омическое бланширование (ОБ) – один из инновационных методов обработки пищевых продуктов, в процессе которого для повышения эффективности нагрева используют электрический ток (*Бурак и др., 2024a; Guida et al., 2013*). Омический нагрев можно использовать для пищевых продуктов с проводимостью от 0,1 до 10 см/м. Напряженность электрического поля, конфигурация электродов и проводимость нагреваемого материала генерируют потоки тока, которые обуславливают высокую плотность мощности и быстрое выделение тепловой энергии. Параметры, применяемые при ОН: напряжение от 400 до 4000 В; мощность поля от 20 до 400 В/см, зазор между электродами – от 10 до 50 см. Скорость нагрева

определяется эффективностью источника энергии, конструкцией оборудования и характером тепловой среды, например проводимостью, вязкостью и теплоемкостью (Бурак и др., 2024а). Этот процесс может включать добавление веществ с ионной связью, таких как соли или кислоты, для улучшения проводимости, что обеспечивает быстрый и равномерный нагрев, который необходим для бланширования (Misra et al., 2022). Вместе с тем внесение таких веществ может создавать проблемы, особенно в кислых средах (около pH 3,5), что может привести к коррозии и эрозии электродов, оказывая влияние на срок службы оборудования, и потенциально изменить вкус и качество пищевых продуктов (Bouhile et al., 2025).

Несмотря на явные преимущества многих инновационных методов бланширования, исследования синергетических подходов, объединяющих ИКБ с другими методами, такими как МВ, радиочастотный и омический нагрев, остаются ограниченными. Исследование этих комбинированных методов имеет значительный потенциал для повышения эффективности и качества конечной обработки продукта. Отсутствие научных знаний по результатам комбинированного применения различных методов бланширования требует проведения дальнейших исследований, потенциально стимулируя разработку более эффективных, энергосберегающих и устойчивых методов бланширования.

3. Основные цели бланширования фруктов и овощей

3.1. Инактивация ферментов

Основная цель бланширования – дезактивация ферментов, оказывающих влияние на физико-химические и микробиологические процессы, которые имеют решающее значение для сохранения качества и стабильности пищевых продуктов в процессе сушки (Llavata et al., 2020). Ферменты – это природные катализаторы, присутствующие в различных пищевых системах, которые оказывают негативное влияние на изменения цвета, вкуса, текстуры и пищевой ценности растительного сырья (Бурак, 2024а).

Полифенолоксидазы (ПФО) – одни из таких ферментов, присутствующих во фруктах и овощах, которые вызывают ферментативное потемнение. Этот процесс приводит к характерным изменениям цвета, таким как коричневое обесцвечивание яблок или бананов из-за окисления фенольных соединений до хинонов (de Souza et al., 2024; El-Mesery et al., 2023; Iqbal et al., 2019; Sui et al., 2023). Другим ферментом, участвующим в потемнении, является полиоксидаза (ПОД), которая реагирует с перекисью водорода с образованием феноксидрадикалов. Эти радикалы могут дополнительно окислять другие соединения, такие как хлорофилл, что приводит к распаду пигментов хлорофилла и образованию бесцветных соединений с низкой молекулярной массой, в результате чего овощи теряют свой яркий зеленый цвет (Arnold et al., 2022). Из-за их обилия во фруктах и овощах и их термостабильности ПОД и ПФО обычно используются в качестве ферментативных маркеров для бланширования в пищевой промышленности (Wu et al., 2023). ПОД, в частности, является одним из самых термостабильных ферментов, ответственных за ухудшение качества во время обработки и хранения фруктов и овощей (Бурак и др., 2024а; Arnold et al., 2022). Его стабильность при высоких температурах и доступность простых, быстрых методов анализа делают его эффективным показателем для оценки эффективности бланширования. Результаты исследований показали значительную корреляцию между инактивацией ПОД и других ферментов, которые способствуют ухудшению качества пищевых продуктов (Wang et al., 2023b).

В процессе ИК-нагрева на инактивацию ПФО и ПОД влияют термическая инактивация и уникальное взаимодействие ИК-излучения с пищевой матрицей, которое увеличивает молекулярную вибрацию, в итоге приводя к денатурации ферментов (Бурак и др., 2024а; Iqbal et al., 2019). Высокоэнергетическое ИК-излучение, поглощаемое пищевым продуктом, быстро нагревает поверхностные и подповерхностные слои, значительно увеличивая кинетическую энергию молекул ферментов. Эта повышенная тепловая энергия нарушает нековалентные взаимодействия, такие как водородные связи, ионные связи и гидрофобные взаимодействия, которые стабилизируют трехмерные структуры ПФО и ПОД (Huang et al., 2021; Chourio et al., 2018; Wu et al., 2019). В результате эти ферменты претерпевают структурные изменения, что приводит к разворачиванию и денатурации их белков. Денатурация ПФО необратимо изменяет его активный центр, делая фермент неактивным и неспособным катализировать окисление фенольных соединений, что является основной функцией этого фермента. Аналогично, денатурация ПОД необратимо изменяет его активный центр, делая его неактивным и не давая ему катализировать окисление фенольных соединений, что является его основной функцией.

Степень и скорость инактивации ПФО и ПОД зависят от таких факторов, как интенсивность и продолжительность воздействия ИК-излучения, состав сырья, глубина проникновения и начальная активность фермента (Бурак, 2025; Chourio et al., 2018). Выбор оптимальных параметров ИКБ имеет решающее значение для обеспечения эффективной инактивации фермента при сохранении качественных характеристик пищевых продуктов. Оптимизацию ИКБ можно регулировать на основе конкретных требований

различных пищевых продуктов, что позволяет модулировать скорость денатурации ферментов для достижения желаемого уровня инактивации, сводя к минимуму любое негативное влияние на качество продукта (Бурак и др., 2024a; Boateng et al., 2021; Wu et al., 2024).

3.2. Снижение микробного загрязнения

Процесс бланширования и ИКБ, в частности, играют ключевую роль в сокращении микробных популяций за счет денатурации белков и разрушения клеточных структур микроорганизмов (Aaliya et al., 2021). Когда ИК-излучение воздействует на поверхность фруктов или овощей, энергия поглощается молекулами воды, присутствующими в микроорганизмах, таким образом происходит быстрое повышение температуры (Aboud et al., 2019). Этот тепловой шок вызывает денатурацию белков и необратимое повреждение ферментов микроорганизмов, что приводит к их инактивации (Sirohi et al., 2021).

Споры проявляют большую устойчивость к ИК-излучению по сравнению с вегетативными клетками (Sharma et al., 2024). Однако конкретные механизмы, лежащие в основе инактивации спор, остаются неясными. Предыдущие исследования изучали механизмы инактивации спор, особенно в *Bacillus subtilis*, под воздействием ИК-излучения при определенных уровнях потока (Dikec et al., 2022). Были изучены четыре потенциальных пути, способствующих инактивации спор: образование плазмы, повышение температуры, термоупругое напряжение и многофотонное поглощение энергии (Dikec et al., 2022). Установлено, что прямое применение ИК-нагрева эффективно инактивирует высокотермостойкие микробные споры, такие как *B. subtilis* и *Aspergillus niger* (Бурак и др., 2024b; Rifna et al., 2019). Параметры ИКБ можно оптимизировать на основе конкретных требований микробной безопасности различных пищевых продуктов. Его эффективность в устранении микробной активности зависит от различных факторов, включая температуру образца, интенсивность ИК-излучения и поток, пиковую длину волны и ширину полосы пропускания ИК-излучателя, толщину образца, концентрацию микроорганизмов, содержание влаги, тип и фазу роста микроорганизмов (экспоненциальная или стационарная) и конкретные характеристики пищевых материалов (Бурак и др., 2024b).

Dikec et al. (2022) установили, что полная инактивация и непрорастание спор *B. subtilis* происходят после ИК-облучения с диапазоном мощности 14–15 ГВт/м². Кроме того, необратимые повреждения были вызваны в спорах, облученных потоком 12,6 и 15,4 ГВт/м². ИК-излучение оказалось эффективным в стерилизации распространенных микроорганизмов на поверхности пшеницы и соевых бобов за короткий период (Sirohi et al., 2021). Когда каждое зерно облучалось ИК-излучением, температура поверхности пшеницы и соевых бобов различалась более чем на 50 °C после 7 с облучения, однако выживаемость микроорганизмов оставалась практически неизменной. Это указывает на то, что стерилизующее действие ИК-излучения на микроорганизмы в основном обусловлено прямым нагревом микробных клеток излучением, а не кондуктивным нагревом от поверхности образца (Sirohi et al., 2021).

В другом исследовании изучали влияние длины волны ИК-излучения на инактивацию спор *B. subtilis* с использованием трех различных ИК-нагревателей с пиковыми длинами волн 950, 1100 и 1150 нм. Результаты показали, что более короткая длина волны (950 нм) была более эффективна при инактивации спор, чем другие нагреватели. На время десятичного уменьшения (время D) влияли как начальная активность воды (АВ), так и спектры ИК-лучей. По мере уменьшения длины волны значения АВ, которые приводили к максимальному времени D для инактивации спор, увеличивались. Кроме того, на устойчивость спор к ИК-излучению влияли спектральные характеристики поглощения ИК-излучения, которые варьировались в зависимости от *aw* спор (Aboud et al., 2019). Эти результаты показали, что ИК-нагрев имеет потенциал для поверхностной дезактивации фруктов, овощей и зерновых. ИК-нагрев применялся к различным сельскохозяйственным товарам, включая пшеницу, сою, коричневый рис, ростки, специи и цитрусовые, при этом количество микроорганизмов в этих образцах эффективно снижалось (Bouhile et al., 2025).

3.3. Сохранение пищевой ценности

Термическое бланширование может оказывать негативное влияние на содержание термочувствительных питательных веществ в пищевых продуктах (Бурак, 2025; Xiao et al., 2017; Faas et al., 2020). Поэтому важно установить корреляцию между инактивацией ферментов, достигаемой посредством термического бланширования, и связанной с этим потерей питательных веществ. Такие вещества, как витамин С, каротиноиды и фенольные соединения, обычно встречающиеся во фруктах и овощах, являются ключевыми показателями для оценки эффективности бланширования. Витамины С и А являются важными питательными веществами в различных фруктах и овощах. Однако они подвержены деградации, особенно во время обработки пищевых продуктов, такой как сушка (Adeyeye et al., 2022; Afzal et al., 1998). Деградация витамина С во время сушки в первую очередь объясняется длительным воздействием высоких температур,

что приводит к окислению (El Gamal et al., 2023). Chen et al. (2018) установили, что сохранение витамина С было значительно выше в сушеной моркови, предварительно обработанной ИКБ, чем в небланшированной. Более того, ИК-сухое бланширование с последующей ИК-сушкой сохранило 73,60 % витамина С и ингибировало активность ПОД, тем самым сохраняя естественный цвет сушеных продуктов.

Аналогичным образом, Guiamba et al. (2015) наблюдали, что сохранение витамина С было выше в манго, подвергнутых ИК-сухому бланшированию, чем БГВ, с диапазоном сохранения 69,2–88,3 %. Это объясняется инактивацией ферментов, таких как аскорбатоксидаза (АсО), которая отвечает за деградацию витамина С во время ИКБ. АсО – это содержащий медь фермент, обнаруженный в вакуоли, клеточной стенке и цитоплазме. Неповрежденные клеточные структуры обеспечивают защиту от термической инактивации и выщелачивания АсО. Guiamba et al. (2015) показали, что АсО проявляет термостойкость, сохраняя незначительную активность даже после обработки, особенно в целых кусочках манго. Рекомендуется применять термическую обработку выше 70 °С к измельченным овощным продуктам, чтобы предотвратить окисление АсО в дегидроаскорбиновую кислоту (ДГАК) (Okonkwo et al., 2022; Gu et al., 2022; Faas et al., 2020).

Так же, как и витамин С, фенольные вещества по своей природе нестабильны и подвержены деградации при высоких температурах (Wu et al., 2024). Несколько исследований показали, что ИКБ способствует высокому сохранению фенольных соединений по сравнению с БГВ в пекане и красном болгарском перце (Bouhile et al., 2025; Wu et al., 2024).

Каротиноиды – это класс природных пигментов, содержащихся в различных фруктах и овощах. Эти соединения играют решающую роль в физиологии растений, способствуя их яркой окраске и выступая в качестве антиоксидантов против окислительного стресса. К распространенным каротиноидам относятся β-каротин, ликопин и лютеин, каждый из которых имеет различную химическую структуру и биологические функции (Lu et al., 2021; Qu et al., 2021). Воздействие воздуха и высокой температуры может вызвать как окисление ненасыщенных каротиноидов, так и изомеризацию *транс*-каротиноидов в *цис*-формы, что приводит к потере каротиноидов (Wang et al., 2023a). Song et al. (2021) обнаружили, что ИКБ увеличивает содержание β-каротина в ломтиках батата, вероятно, из-за снижения активности ферментов и нарушения структуры клеток, что повышает эффективность экстракции и изменяет внутреннюю матрицу клеток во время бланширования. Ферменты в растениях могут разрушать каротиноиды, поэтому ингибирование активности ферментов является ключом к сохранению этих соединений. Вместе с тем не было установлено существенной разницы в общем содержании каротиноидов между образцами ИК бланшированной и небланшированной сушеной моркови (Chen et al., 2018).

4. Влияние параметров ИК-бланширования на качество овощей и фруктов

Краткий обзор исследований влияния технологических параметров инфракрасного бланширования на качество фруктов и овощей представлен в табл. 1. На кинетику сушки и качество сырья существенное влияние оказывают различные параметры ИКБ, такие как продолжительность воздействия, температура, расстояние ИК-облучения (расстояние бланширования) и толщина продукта (Бурак и др., 2024б; Xiao et al., 2017).

Таблица 1. Влияние технологических параметров процесса инфракрасного бланширования на качество фруктов и овощей

Table 1. The influence of technological parameters of the infrared blanching process on the quality of fruits and vegetables

Наименование сырья	Параметры процесса	Основные результаты	Источник
Сладкий картофель	Толщина ломтиков: 3, 5 и 7 мм. Расстояние бланширования: 6, 12 и 18 см. Скорость конвейера: 0,7, 0,35 и 0,1 м/мин	Уменьшение толщины ломтика и расстояния ускоряет инактивацию ПОД. Увеличение расстояния обработки привело к большему изменению цвета поверхности и утечке электролита. Расстояние значительно повлияло на сохранение витамина С по сравнению с толщиной ломтика	Song et al., 2021
Морковь	Толщина ломтиков: 3, 5 и 7 мм. Расстояние бланширования: 10, 15 и 20 см	Увеличение расстояния привело к сокращению времени бланширования и повышению содержания каротиноидов. Увеличение толщины ломтика увеличивает время бланширования и твердость поверхности	Wu et al., 2023

Чеснок	Толщина ломтиков: 3, 5 и 7 мм	Увеличение толщины среза способствовало большому изменению цвета поверхности. Повышение температуры привело к снижению содержания аллицина. Увеличение температуры обработки и толщины среза привело к снижению общей численности популяции бактерий. Уменьшение толщины ломтика ускоряет повышение внутренней температуры, снижение влажности и инактивацию ферментов (ПОД)	<i>Feng et al., 2018</i>
Морковь	Расстояние бланширования: 70, 75 и 80 мм. Время воздействия: 110, 130 и 150 с	Интенсивность инфракрасного излучения не оказала существенного влияния на снижение влажности и остаточную активность ПОД в ломтиках моркови. Более высокая интенсивность ИК-излучения привела к более быстрому повышению температуры поверхности. Более высокая температура бланширования и наиболее длительное время бланширования привели к более быстрому разрушению витамина С	<i>Chen et al., 2018</i>
Красный болгарский перец	Температура в камере: 130, 150 и 170 °С. Время обработки: 3–8 мин	Температура ИК-камеры 150 °С в течение 6 мин не оказала существенного влияния на содержание жирорастворимых витаминов, жиров, белков, углеводов, золы, клетчатки и влаги	<i>Wang et al., 2017</i>
Картофель	Расстояние бланширования: 9,5, 12,5 и 15,5 см. Толщина ломтиков: 0,8, 1 и 1,3 мм, диаметр 6 см	Толщина среза обратно пропорциональна энергии активации и прямо пропорциональна эффективному коэффициенту диффузии влаги. Уменьшение расстояния привело к соответствующему увеличению эффективной диффузии влаги в образцах. Уменьшение толщины ломтиков и расстояния привело к большому снижению влажности, быстрой инактивации ферментов и лучшему сохранению цвета	<i>Ma et al., 2023</i>
Манго	Высокотемпературное кратковременное излучение (ВТКИ) при 90 °С в течение 2 мин и низкотемпературное длительное излучение (НТДИ) при 65 °С в течение 10 мин	Образцы, обработанные ВКТИ, показали более высокую сохранность витамина С. Условия бланширования не оказали существенного влияния на сохранение <i>транс</i> -β-каротина	<i>Guiamba et al., 2015</i>

Эффективность обработки ИКБ зависит от толщины обрабатываемого сырья и расстояния от источника воздействия, поскольку эти факторы существенно влияют на равномерность теплопередачи и общую эффективность бланширования (*Wu et al., 2023*). Толщина продукта играет решающую роль в определении глубины проникновения ИК-излучения. По мере увеличения толщины продукта внешние слои могут достигать желаемой температуры бланширования, тогда как внутренние слои могут оставаться недостаточно обработанными, что подчеркивает важность точного контроля толщины для обеспечения равномерного теплового отклика по всему продукту (*Huang et al., 2021; Wu et al., 2023*). Кроме того, расстояние напрямую влияет на интенсивность и распределение лучевой энергии. Более короткое расстояние бланширования увеличивает энергию, поглощаемую продуктом, ускоряя поглощение тепла и сокращая время воздействия, необходимое для эффективного бланширования (*Zeng et al., 2022; Barrón-García et al., 2022*). Однако чрезмерное сокращение расстояния бланширования может привести к подгоранию поверхности без адекватной обработки внутренних слоев (*Guo et al., 2023*). В исследовании *Song et al. (2021)* результаты показали,

что уменьшение толщины ломтика и сокращение расстояния ИК-нагрева увеличивают скорость инактивации ПОД. Аналогичное снижение остаточной активности ПФО с увеличением толщины ломтика наблюдалось во время бланширования ломтиков картофеля (*Ma et al., 2023*). Время, необходимое для 90 % инактивации ПОД, уменьшалось по мере уменьшения расстояния ИКБ, что можно объяснить более высокой интенсивностью ИК-излучения на более коротких расстояниях, что приводит к быстрой инактивации во время бланширования. Аналогичным образом более тонкие ломтики требуют более короткого времени для 90 % инактивации ПОД за счет лучшего проникновения ИКИ (*Ghaboos et al., 2016*). Более длительное бланширование также приводило к более выраженному изменению цвета поверхности ломтиков батата из-за длительного времени нагрева, необходимого для достижения 90 % инактивации ПОД. Сопоставимая тенденция наблюдалась в ломтиках бланшированного картофеля, где более толстые ломтики демонстрировали более высокие значения a^* и b^* , что указывает на повышенное потемнение и желтизну (*Ma et al., 2023*).

По мере повышения температуры ИК-излучения глубина проникновения и скорость нагрева увеличиваются, что приводит к более эффективной инактивации термочувствительных ферментов, таких как ПФО, которые влияют на изменение цвета (*Luo et al., 2023; Barrón-García et al., 2022*). Однако чрезмерно высокие температуры могут отрицательно влиять на текстуру и вкус пищи, что делает крайне важной оптимизацию этого параметра в диапазоне 60–80 °C для большинства овощей (*Bei et al., 2023*). Аналогичным образом время воздействия должно быть точно определено; длительное воздействие, хотя и эффективно для снижения активности ферментов, может привести к нежелательным изменениям в продукте, таким как потеря питательных качеств и изменение органолептических характеристик (*Gu et al., 2022; Ghaboos et al., 2016*).

Guiamba et al. (2015) исследовали влияние времени воздействия и температуры на сохранение витамина С и β -каротина во время бланшировки манго. Сравнивались две обработки бланшировкой: высокотемпературная кратковременная при 90 °C в течение 2 мин и низкотемпературная длительная при 65 °C в течение 10 мин. Результаты показали, что условия бланшировки оказали минимальное влияние на сохранение полностью *транс*- β -каротина. Однако ломтики, обработанные длительное время, показали значительно более высокую потерю витамина С, что было связано с высокой активностью АсО в этих образцах. В другом исследовании – чеснока – было обнаружено, что температура обработки значительно влияет на цвет бланшированного продукта. *Feng et al. (2018)* установили, что общее изменение цвета чеснока уменьшалось по мере повышения температуры бланширования. Тем не менее при 135 °C образец перегревался и даже сгорал, что приводило к быстрому увеличению изменения цвета. На сохранение аллицина значительно влияла температура обработки, при этом температуры 95, 115 и 135 °C демонстрировали разные показатели сохранения. Исследователи отметили, что быстрая инактивация ПОД при 135 °C может привести к повышенной инактивации аллииназы, фермента, ответственного за преобразование аллиина в аллицин, тем самым снижая сохранение аллицина. *Wang et al. (2017)* предложили оптимальные параметры бланшировки для красного болгарского перца, в частности 150 °C в течение 6 мин, что эффективно сохраняет качество продукта, при этом значительно снижая потери жирорастворимых витаминов, жиров, белков, углеводов, золы и клетчатки.

Повышенные температуры также могут вызывать неферментативную деградацию пигмента через реакцию Майяра, что приводит к потере цвета (*Luo et al., 2023*).

5. Влияние метода бланширования на технологический процесс сушки

Качество готового сушеного сырья во многом зависит от выбранного процесса сушки. Низкотемпературные процессы требуют длительного времени сушки, способы сушки с использованием высоких температур более эффективны, но могут оказать негативное влияние на качество продукта (*Adeyeye et al., 2022*). Пищевая промышленность сталкивается с проблемой достижения более короткого времени сушки в умеренных условиях при сохранении максимального качества продукта (*Aboud et al., 2019; Salehi et al., 2019*). Несмотря на многочисленные инновации для улучшения традиционных процессов сушки, такие как технология рекуперации собственного тепла, сложность и высокие затраты на внедрение ограничили ее широкое промышленное использование. Традиционно для оптимизации технологии сушки использовались различные подготовительные процессы. Среди них ИК-излучение в качестве подготовительного процесса перед традиционной сушкой имеет некоторые преимущества (табл. 2).

В последние годы интегрирование процесса инфракрасного бланширования в системы сушки привлекло значительное внимание научного сообщества. При использовании в качестве метода предварительной обработки перед сушкой ИКБ значительно повышает эффективность процесса за счет сокращения времени обработки и способствует большему сохранению биологически активных соединений и других питательных веществ, что значительно повышает качество продуктов (*Gu et al., 2022; Salehi et al., 2017; 2019*).

Разработка комбинированных методов сушки – это инновационная стратегия оптимизации качества продукта и повышения энергоэффективности процесса (*Nalawade et al., 2018; Zeng et al., 2019*).

Таблица 2. Влияние инфракрасного бланширования на качество фруктов и овощей по сравнению с другими методами бланширования
Table 2. Effect of infrared blanching on the quality of fruits and vegetables compared to other blanching methods

Вид сушки	Наименование сырья	Предварительная обработка	Условия обработки	Основные результаты	Источник
Инфракрасная	Морковь	Бланширование горячей водой	Инфракрасное бланширование при температуре 90 °С в течение 15 мин. Сушка с использованием инфракрасного излучения при температуре 70 °С	Увеличение скорости сушки, меньшее время, максимальное сохранение витамина С, а также более мелкие и однородные пористые структуры	<i>Wu et al., 2023</i>
Сушка горячим воздухом	Морковь	Бланширование горячей водой	Инфракрасное бланширование при температуре 90 °С в течение 15 мин. Сушка горячим воздухом при температуре 70 °С и скорости воздуха 0,5 м/с	Уменьшение времени сушки, большее сохранение витамина С и меньшая усадка	<i>Wu et al., 2018a</i>
	Зеленый лук	Без бланширования	Каталитическое инфракрасное бланширование при 70 °С. Сушка горячим воздухом при 70 °С	Уменьшение времени сушки без существенной разницы в цвете, витамине С, летучих компонентах и сохранении аллицина	<i>Gu et al., 2022</i>
	Манго	Бланширование горячей водой	Бланширование в ближнем инфракрасном диапазоне при 90 °С в течение 2 мин и при 65 °С в течение 10 мин. Сушка горячим воздухом при температуре 70 °С и скорости воздуха 1 м/с	Более высокое содержание витамина С и более низкое содержание <i>транс</i> -β-каротина	<i>Guiamba et al., 2015</i>
	Морковь	Без бланширования	Бланширование с использованием инфракрасного излучения мощностью 552 Вт, расстоянием 70, 75 и 80 мм и различной продолжительностью 110, 130 и 150 с	Более высокое сохранение витамина С (14,39–19,03 %), меньшее время сушки, более низкая активность остаточной пероксидазы (ПОД), более высокое общее сохранение каротиноидов и более высокая хрусткость	<i>Chen et al., 2018</i>
ИК-сушка с последующей сушкой горячим воздухом	Морковь	Бланширование горячей водой	Инфракрасное бланширование при температуре 90 °С в течение 15 мин. Инфракрасная сушка при 70 °С, затем сушка горячим воздухом при 70 °С	Улучшенное качество моркови с максимальным содержанием витамина С, лучшей регидратацией, меньшим изменением цвета и меньшей усадкой	<i>Bouhile et al., 2025</i>
Сублимационная сушка	Зеленый лук	Без бланширования	Каталитическое инфракрасное бланширование при 70 °С. Сублимационная сушка при температуре –80 °С	Максимальное содержание витамина С, летучих компонентов и аллицина	<i>Gu et al., 2022</i>

	Бананы	Без бланширования	Погружение ломтиков банана в раствор (10 г/л аскорбиновой кислоты и 10 г/л лимонной кислоты) перед каталитической инфракрасной бланшировкой. Интенсивность инфракрасного излучения: 4 000 Вт/м ²	Увеличенное время сушки и большая усадка. Обработка погружением перед бланшированием обеспечивает лучшую сохранность цвета, большую хрупкость и меньшую усадку	<i>Gu et al., 2022</i>
	Клубника	Предварительная обработка горячим воздухом	Каталитическое инфракрасное бланширование с различной интенсивностью 3 000, 4 000 и 5 000 Вт/м ² . Сублимационная сушка продолжительностью 0,0167, 1, 2, 4, 6, 8, 16, 22 и 29 ч	Образцы, предварительно обработанные инфракрасным излучением, показали лучшую сохранность цвета, более высокую хрупкость, более низкий коэффициент регидратации, меньшее необходимое время сушки (на 42 %) и большую усадку	<i>Bouhile et al., 2025</i>
Гибридная сушка: сушка горячим воздухом с использованием инфракрасного излучения	Морковь	Бланширование горячей водой	Бланширование в ближнем инфракрасном диапазоне в течение 8–15 мин со скоростью воздуха 0,5 м/с. Гибридная сушка при температуре 80 ± 2 °С со скоростью воздуха 1,4 м/с	Сокращение времени сушки на 45 %. Лучшее сохранение структуры клеток, максимальное содержание витамина С	<i>Bouhile et al., 2025</i>

5.1. Инфракрасное бланширование перед сушкой горячим воздухом

Сушка горячим способом (СГВ) обычно используется в пищевой промышленности по причине простоты и экономической эффективности процесса (Бурак, 2025; Bi et al., 2022; Chen et al., 2015). Однако использование горячего воздуха в качестве сушильной среды имеет несколько недостатков, таких как длительное время обработки и существенное ухудшение как физических свойств, так и пищевой ценности конечного продукта (Adeyeye et al., 2022; Xiao et al., 2017). В ходе исследований установлено, что применение ИКБ значительно сокращает время сушки горячим воздухом. Это может быть связано с более низким начальным содержанием влаги и более высокой температурой поверхности бланшированных образцов перед сушкой (Aboud et al., 2019). Например, Chen et al. (2018) установили, что использование ИКБ позволило сократить время СГВ на 32,3–45 %, однако сокращение времени сушки во многом зависит от конкретных параметров ИКБ, включая продолжительность и интенсивность воздействия ИК-излучения. Оптимизация этих параметров имеет значение для достижения желаемого сокращения времени сушки при сохранении качества продукта. Чрезмерное воздействие ИК-излучения или чрезмерно высоких температур во время бланширования может привести к нежелательным изменениям качества готового продукта (Feng et al., 2018; Zeng et al., 2019).

Комбинирование ИКБ и СГВ способствует сохранению витамина С. Исследования, проведенные Chen et al. (2018), показали, что содержание витамина С в ломтиках моркови, обработанных ИКБ перед СГВ, было значительно выше – от 14,39 до 19,03 %, чем в моркови, высушенной без предварительной обработки ИКБ. Общеизвестно, что процесс сушки вызывает значительную усадку и ухудшает качество продукта из-за быстрого испарения поверхностной влаги, что создает разницу давления между внешней и внутренней частью образца (Adeyeye et al., 2022; Thamkaew et al., 2021). Установлено, что применение ИКБ способствует уменьшению объемной усадки и деформации, так как улучшает равномерность распределения температуры внутри материала, вызывая последовательную миграцию влаги и сводя к минимуму риск локального высыхания, что может привести к неравномерной усадке (Xiao et al., 2017). При этом ИКБ вызывает изменения в клеточной структуре фруктов и овощей, такие как повышение проницаемости клеточных мембран, что способствует более эффективному высвобождению влаги во время последующей сушки горячим воздухом (СГВ) (Sakare et al., 2020; Chen et al., 2015; Qu et al., 2021). Gu et al. (2022) сравнили органолептические свойства бланшированного ИК-излучением и небланшированного высушенного горячим воздухом зеленого лука. Бланшированные образцы показали лучшую сохранность цвета с более высокими значениями a^* (краснота), что можно отнести к реакции Майяра, которая привела к образованию коричневого вещества. Wu et al. (2018b) установили, что применение ИК-излучения в качестве подготовительного этапа перед СГВ значительно увеличило значения L^* , a^* и b^* моркови, обработанной ИКБ, по сравнению со свежими образцами. Сочетание ИКБ – СГВ также влияет на клейстеризацию крахмала в пищевых матрицах, что в конечном итоге может повлиять на реакцию Майяра (Neutzling et al., 2023; Yan et al., 2024). Во время ИКБ быстрое проникновение интенсивного ИК-излучения вызвало обширную клейстеризацию гранул крахмала. Этот процесс нарушил нативную кристаллическую структуру крахмала, растворив молекулы крахмала и обнажив восстанавливающие сахара, которые являются важнейшими предшественниками реакций Майяра (Neutzling et al., 2023). Повышенная доступность восстанавливающих сахаров усилила потемнение и развитие вкуса во время последующей СГВ. Более того, клейстеризованный крахмал может взаимодействовать с аминокислотами, дополнительно способствуя реакции Майяра (Wang et al., 2018). Однако чрезмерная желатинизация крахмала, вызванная ИКБ, способна вызвать нарушение целостности структуры и изменение текстурных свойств растительного сырья во время сушки, что может привести к нежелательным качественным изменениям (Sethi et al., 2022). Поэтому применение ИКБ в качестве подготовительного процесса к СГВ может быть неприемлемым для продуктов с высоким содержанием крахмала.

5.2. Инфракрасное бланширование перед сублимационной сушкой

Сублимационная сушка (СБС) – это многоступенчатый процесс, включающий замораживание, сублимацию, десорбцию, вакуумное удаление влаги и конденсацию (Abla et al., 2022; Bhambere et al., 2015). Следовательно, СБС является энергоемким процессом, и его затраты, как правило, оцениваются в 4–8 раз выше, чем у СГВ (Yao et al., 2023). Для снижения потребления энергии, предотвращения реакций потемнения и сокращения общего времени обработки в качестве эффективной стратегии рассматривают предварительную обработку плодовоовощного сырья перед СБС. Результаты многих исследований показали, что продукты после СБС демонстрируют однородную мелкопористую структуру с минимальным повреждением или разрушением клеточных стенок на поверхности образца (Bhambere et al., 2015). Это объясняется образованием кристаллов льда во время СБС, которые сжимают поверхность и создают пористую

структуру внутри клеток (Feng et al., 2024). В результате усадка и внутреннее разрушение образцов сводятся к минимуму, в первую очередь из-за небольшого удлинения клеточной стенки (Nguyen et al., 2018). Напротив, когда в качестве предварительной обработки перед СБС применяют ИКБ, на поверхности обработанного продукта образуется плотный слой (Mehanna et al., 2022). Это явление, вероятно, связано с быстрым повышением температуры поверхности во время ИК-нагрева, что приводит к разрушению поверхностных клеток со скоростью, сопоставимой или превышающей скорость перемещения влаги изнутри к поверхности (Wu et al., 2024). Результаты исследования Jiang et al. (2024) показали, что ИКБ сублимированных ломтиков клубники привело к образованию крупных пор в центральной области. Это микроструктурное изменение потенциально было связано с паром, образующимся во время процесса ИКБ, который расширял клеточные стенки и создавал более крупные поры, последние могли усилить хрусткость конечного продукта (Wu et al., 2019; Jiang et al., 2024).

Определение соотношения регидратации включает погружение высушенных образцов в воду при определенных температурах и продолжительности (Lopez-Quiroga et al., 2020). Регидратация – это многогранный процесс восстановления высушенных материалов при контакте с водой. Во время процессов дегидратации, таких как ИК-нагрев, происходят необратимые разрывы, нарушающие клеточную целостность и образующие плотную структуру со сжатыми капиллярами, которые демонстрируют сниженные гидрофильные свойства (Abu-Ghannam et al., 2015; Alaei et al., 2015; Salehi et al., 2017). Несколько исследований показали, что ИКБ перед СБС может снизить способность к регидратации в конечном продукте, что желательно для продуктов, потребляемых в качестве закусок или включаемых в состав сухих завтраков (Xiao et al., 2017). Это снижение регидратации объясняется изменениями в содержании и структуре пектина, что приводит к образованию плотной корки на поверхности образцов, бланшированных и высушенных методом ИК-обработки (Chen et al., 2018; Salehi et al., 2017; Wu et al., 2019). Наличие этой корки препятствует проникновению воды или других регидратирующих сред в высушенный образец, что способствует более медленной и менее полной регидратации по сравнению с образцами только после СБС. Сочетание потери воды и воздействия тепла во время ИКБ также вызывает напряжение в клеточной структуре, что приводит к изменениям формы, размеров и общей структурной целостности (Owusu-Apenten et al., 2023; Antal et al., 2017). В результате исследования выяснилось, что сублимированная клубника с ИК-бланшировкой показала немного большую усадку толщины и хрусткости, чем контрольные образцы (Feng et al., 2024).

Влияние ИКБ как подготовительного процесса к СБС на цвет конечного продукта различается в зависимости от разных пищевых продуктов. Вместе с тем ИКБ в целом положительно влияет на сохранение цвета сублимированных продуктов. Для лука-резанца цвет продуктов, бланшированных каталитическим ИК-излучением и сублимированных, оказался схожим с цветом образцов после СБС (Gu et al., 2022). Это можно объяснить нетермической природой СБС, которая помогает сохранить исходный цвет и форму лука-резанца. Напротив, образцы после ИКБ и затем СБС показали более низкие значения угла оттенка для клубники, чем свежие образцы, но более высокие, чем сублимированные образцы. Следует отметить, что комбинированный процесс ИКБ – СБС усилил красноту клубники, придав сушеным продуктам более темный красный цвет, что может быть связано с неферментативным потемнением и увеличением концентрации антоцианов. Для ломтиков банана наблюдалось увеличение желтизны в ИК-бланшированных и лиофилизированных образцах по сравнению со свежими образцами (Braga et al., 2021). Это говорит о том, что сочетание ИКБ – СБС может оказывать различное влияние на цветовые характеристики различных пищевых материалов в зависимости от их внутреннего состава и чувствительности к термической и нетермической обработке.

6. Проблемы и ограничения использования метода ИК-бланширования

Хотя процесс ИКБ имеет некоторые преимущества по сравнению с обычным бланшированием, включая улучшенную энергоэффективность и значительное сохранение питательных веществ и качественных характеристик, он также имеет присущие ему ограничения и недостатки (Бурак и др., 2024б). Одним из основных недостатков является ограниченная глубина проникновения ИК-излучения. ИК-энергия в первую очередь взаимодействует с поверхностью фруктов и овощей, тогда как внутренние области получают меньше энергии, когда толщина материала достигает определенного значения (Joardder et al., 2023; Tyagi et al., 2020). Неравномерный нагрев способен вызвать значительные изменения в микроструктуре бланшированных образцов, что может отрицательно повлиять на качество сушеных продуктов. На микроструктурном уровне интенсивный нагрев поверхности в результате ограниченного проникновения ИК-излучения может привести к быстрой деградациии полисахаридов клеточной стенки, таких как пектин и гемицеллюлоза, что ставит под угрозу механическую целостность и текстуру бланшированных материалов

(Wu *et al.*, 2023). Кроме того, неравномерный нагрев может привести к неравномерной инактивации ферментов, когда поверхностные области перегреваются, а внутренняя часть остается недобланшированной. Такая неоднородность в дезактивации ферментов отрицательно влияет на последующий процесс сушки и ухудшает качество конечного продукта. С целью устранения данных недостатков и ограничений необходимы дальнейшие научные исследования по изучению проникновения ИК-излучения в различные виды плодоовощного сырья и пищевые материалы.

Целесообразно проводить научные исследования по комбинированному использованию ИК-нагрева с другими способами бланширования. Интеграция ИК-нагрева с дополнительными методами может улучшить массоперенос и теплопередачу внутри пищевого продукта, обеспечивая равномерное распределение температуры по всему материалу. Например, сочетание ультразвука и ИКБ может увеличить скорость массопереноса за счет механических и кавитационных эффектов, усиливая теплопередачу и приводя к более равномерной потере влаги. Другим потенциальным решением является применение химической предварительной обработки перед ИКБ. Использование кислых растворов, таких как аскорбиновая или лимонная кислота, может улучшить теплопередачу, способствовать равномерному нагреву и более глубокому проникновению ИК-излучения. Это возможно за счет способности кислых растворов изменять физические и химические свойства растительного сырья (Бурак, 2025).

Заключение

Бланширование как метод предварительной подготовки плодоовощного сырья перед сушкой оказывает значительное влияние как на процесс сушки, так и на качество готового продукта. По сравнению с традиционными методами, такими как бланширование водой или паром, применение инфракрасного метода бланшировки перед процессом сушки имеет несколько преимуществ, включая более полное сохранение пищевой ценности фруктов и овощей, сокращенное время сушки и минимальное изменение естественного цвета плодоовощного сырья. Быстрый нагрев поверхности пищевых продуктов с помощью ИК-излучения эффективно дезактивирует ферменты и микроорганизмы, тем самым сохраняя качество пищевых продуктов. Отсутствие использования воды в процессе инфракрасного бланширования способствует сохранению водорастворимых питательных веществ, таких как витамин С. На эффективность процесса инфракрасного бланширования значительное влияние оказывает время обработки, толщина продукта и расстояние обрабатываемого сырья от источника ИК-излучения. В ходе обзора результатов научных исследований установлено, что оптимальные условия бланширования для различных фруктов и овощей, как правило, достигаются при толщине 2–5 см и расстоянии 10–20 см от ИК-излучателя.

Вместе с тем необходимо продолжить исследования с целью оптимизации рабочих параметров бланширования, энергоэффективности и масштабируемости систем ИКБ. Необходимы дальнейшие научные исследования для более полной и комплексной оценки результатов сочетания ИК-нагрева с другими методами бланширования. Детальная оценка и понимание механизмов, с помощью которых эти комбинированные способы обработки улучшают тепло- и массоперенос и их влияние на микроструктурные и биохимические изменения в бланшированных продуктах, позволят получить информацию для разработки более эффективных и действенных методов ИКБ. Требуется тщательно изучить влияние комбинированного бланширования и химической предварительной обработки на последующий процесс сушки с целью обеспечения качества сушеных продуктов и их пищевой ценности. Для дальнейшего промышленного внедрения комбинированных методов бланшировки необходимо учитывать стоимость оборудования, потребление энергии и эксплуатационные расходы.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

References

- Aaliya, B., Sunooj, K. V., Navaf, M., Akhila, P. P. et al. 2021. Recent trends in bacterial decontamination of food products by hurdle technology: A synergistic approach using thermal and non-thermal processing techniques. *Food Research International*, 147. Article number: 110514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110514>.
- Abla, K. K., Mehanna, M. M. 2022. Freeze-drying: A flourishing strategy to fabricate stable pharmaceutical and biological products. *International Journal of Pharmaceutics*, 628. Article number: 122233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2022.122233>.
- Aboud, S. A., Altemimi, A. B., Al-Hilphy, A. R. S., Yi-Chen, L. et al. 2019. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing. *Molecules*, 24(22). Article number: 4125. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24224125>.
- Abu-Ghannam, N., Jaiswal, A. K. 2015. Blanching as a treatment process: Effect on polyphenol and antioxidant capacity of cabbage. In V. Preedy (Ed.) *Processing and Impact on Active Components in Food*, Academic Press, pp. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404699-3.00005-6>.

- Adeyeye, S. A. O., Ashaolu, T. J., Babu, A. S. 2022. Food drying: A review. *Agricultural Reviews*, 46(1), pp. 86–93. DOI: <https://doi.org/10.18805/ag.R-2537>.
- Afzal, T. M., Abe, T. 1998. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering*, 37(4), pp. 353–365. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00111-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00111-3).
- Akinawo, S. O. 2023. Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges*, 12. Article number: 100733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>.
- Alaei, B., Chayjan, R. A. 2015. Drying characteristics of pomegranate arils under near infrared-vacuum conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(5), pp. 469–479. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12252>.
- Aniesrani, Delfiya D. S., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V. et al. 2022. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 45(6). Article number: e13810. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13810>. (Special Issue: Design and Development of Food Processing Equipment).
- Antal, T., Tarek-Tilistýák, J., Cziáký, Z., Sinka, L. 2017. Comparison of drying and quality characteristics of pear (*Pyrus communis* L.) using mid-infrared-freeze drying and single stage of freeze drying. *International Journal of Food Engineering*, 13(4). DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0294>.
- Anuj, Sonal P., Jayaraj, A., Shahana, A., Khalai, S. et al. 2020. Development and performance evaluation of infrared dryer. Department of Post Harvest-Technology and Agricultural Processing, Kerala, India.
- Arnold, M., Gramza-Michałowska, A. 2022. Enzymatic browning in apple products and its inhibition treatments: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(6), pp. 5038–5076. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13059>.
- Ávila, S., Zalamanski, S., Tanikawa, L. M., Kruger, C. C. H. et al. 2023. Influence of cooking methods on *in vitro* bioaccessibility of phenolics, flavonoids, and antioxidant activity of red cabbage. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78, pp. 124–131. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11130-022-01027-5>.
- Barrón-García, O. Y., Nava-Álvarez, B., Gaytán-Martínez, M., Gonzalez-Jasso, E. et al. 2022. Ohmic heating blanching of *Agaricus bisporus* mushroom: Effects on polyphenoloxidase inactivation kinetics, color, and texture. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 80. Article number: 103105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103105>.
- Bei, X., Yu, X., Li, D., Sun, Q. et al. 2023. Heat source replacement strategy using catalytic infrared: A future for energy saving drying of fruits and vegetables. *Journal of Food Science*, 88(12), pp. 4827–4839. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16834>.
- Bi, Y.-X., Zielinska, S., Ni, J.-B., Li, X.-X. et al. 2022. Effects of hot-air drying temperature on drying characteristics and color deterioration of rape bee pollen. *Food Chemistry: X*, 16. Article number: 100464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100464>.
- Boateng, I. D., Yang, X.-M. 2021. Effect of different drying methods on product quality, bioactive and toxic components of *Ginkgo biloba* L. seed. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(8), pp. 3290–3297. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10958>.
- Bouhile, Y., Guo, Y., Wu, B., Dai, J. et al. 2025. Research progress in the application of infrared blanching in fruit and vegetable drying process. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(1). Article number: e70112. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70112>.
- Braga, R. C. P., Ruiz, S. P., De Aquino, D. S. 2021. Drying kinetics and the effect of blanching pretreatment on banana. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, 15(2), pp. 3626–3647. DOI: <https://doi.org/10.3895/rbta.v15n2.13607>.
- Burak, L. Ch. 2024a. Using modern processing technologies to increase the shelf life of fruits and vegetables. Review of the subject field. *Polzunovsky Vestnik*, 1, pp. 99–119. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013>. EDN: AQZOQO. (In Russ.) = Бурак Л. Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля. Ползуновский вестник. 2024а. Т. 1. С. 99–119. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013>. EDN: AQZOQO.
- Burak, L. Ch. 2024b. Limitations and possibilities of modern technologies for ensuring microbiological safety of food products. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(396), pp. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1>. EDN: JSFXRG. (In Russ.) = Бурак Л. Ч. Ограничения и возможности современных технологий по обеспечению микробиологической безопасности пищевых продуктов. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2024б. Т. 2–3(396). С. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1>. EDN: JSFXRG.
- Burak, L. Ch. 2025. The influence of modern methods of processing and sterilization on the quality of fruit and vegetable raw materials and juice products. Monograph. Moscow. 236 p. DOI: <https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991>. EDN: EQDBKL. (In Russ.) = Бурак Л. Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодовоовощного сырья и соковой продукции. Москва : ИНФРА-М, 2025. 236 с. DOI: <https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991>. EDN: EQDBKL.

- Burak, L. Ch., Sapach, A. N. 2023. Biologically active substances of elderberry: Properties, methods of extraction and preservation. *Food Systems*, 6(1), pp. 80–94. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94>. EDN: BDOJAW. (In Russ.) = Бурак Л. Ч., Сапач А. Н. Биологически активные вещества бузины: свойства, методы извлечения и сохранения. Пищевые системы. 2023. Т. 6(1). С. 80–94. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94>. EDN: BDOJAW.
- Burak, L. Ch., Sapach, A. N. 2024a. Use of omic heating technology in the process of processing fruits and vegetables. Overview of the subject field. *Food systems*, 7(1), pp. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70>. EDN: BKQTXQ. (In Russ.) = Бурак Л. Ч., Сапач А. Н. Использование технологии омического нагрева в процессе переработки плодов и овощей. Обзор предметного поля. Пищевые системы. 2024. Т. 7(1). С. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70>. EDN: BKQTXQ.
- Burak, L. Ch., Vostrikov, A. V. 2024b. Use of catalytic infrared radiation technology in the processing of fruit and vegetable raw materials. Review of the subject field. *Scientific Review. Engineering Sciences*, 4, pp. 2–34. DOI: <https://doi.org/10.17513/srts.1479>. EDN: BBQKMV. (In Russ.) = Бурак Л. Ч., Востриков А. В. Использование технологии каталитического инфракрасного излучения при переработке плодовоовощного сырья. Обзор предметного поля. Научное обозрение. Технические науки. 2024. Т. 4. С. 2–34. DOI: <https://doi.org/10.17513/srts.1479>. EDN: BBQKMV.
- Chen, J., Venkitasamy, C., Shen, Q., McHugh, T. H. et al. 2018. Development of healthy crispy carrot snacks using sequential infrared blanching and hot air drying method. *LWT*, 97, pp. 469–475. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.026>.
- Chen, Q., Bi, J., Wu, X., Yi, J. et al. 2015. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation. *LWT – Food Science and Technology*, 64(2), pp. 759–766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.071>.
- Chourio, A. M., Salas-Fierro, F., Mehmood, Z., Martinez-Montegudo, S. I. et al. 2018. Inactivation of peroxidase and polyphenoloxidase in coconut water using pressure-assisted thermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, pp. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.014>.
- de Souza, J. V. B., Perazzini, H., Lima-Corrêa, R. A. B., Borel, L. D. M. S. 2024. Combined infrared-convective drying of banana: Energy and quality considerations. *Thermal Science and Engineering Progress*, 48. Article number: 102393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102393>.
- Dikec, J., Bechoua, N., Winckler, P., Perrier-Cornet, J. M. 2022. Effects of pulsed near infrared light (NIR) on *Bacillus subtilis* spores. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 234. Article number: 112530. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2022.112530>.
- ElGamal, R., Song, C., Rayan, A. M., Liu, C. et al. 2023. Thermal degradation of bioactive compounds during drying process of horticultural and agronomic products: A comprehensive overview. *Agronomy*, 13. Article number: 1580. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13061580>.
- El-Mesery, H. S., Ashiagbor, K., Hu, Z., Alshaer, W. G. 2023. A novel infrared drying technique for processing of apple slices: Drying characteristics and quality attributes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 52. Article number: 103676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103676>.
- Faas, N., Röcker, B., Smrke, S., Yerezian, C. et al. 2020. Prevention of lipid oxidation in linseed oil using a palladium-based oxygen scavenging film. *Food Packaging and Shelf Life*, 24. Article number: 100488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100488>.
- Fayaz, U., Aga, M. B., Bashir, I., Bashir, O. et al. 2023. Applications of infrared processing in the food industry. In *Emerging Thermal Processes in the Food Industry. Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry*. Monograph. Ed.: S. M. Jafari. Woodhead Publishing, pp. 63–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822107-5.00003-9>.
- Feng, S., Bi, J., Laaksonen, T., Laurén, P. et al. 2024. Texture of freeze-dried intact and restructured fruits: Formation mechanisms and control technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 143. Article number: 104267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104267>.
- Feng, Y., Wu, B., Yu, X., Yagoub, A. E. A. et al. 2018. Effect of catalytic infrared dry-blanching on the processing and quality characteristics of garlic slices. *Food Chemistry*, 266, pp. 309–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.012>.
- Gaidhani, K. A., Harwalkar, M., Bhambere, D., Nirgude, P. S. 2015. Lyophilization/freezing drying – A review. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 4(8), pp. 516–543.
- Ghaboos, S. H. H., Ardabili, S. M. S., Kashaninejad, M., Asadi, G. et al. 2016. Combined infrared-vacuum drying of pumpkin slices. *Journal of Food Science and Technology*, 53, pp. 2380–2388. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2212-1>.
- Gu, C., Ma, H., Tuly, J. A., Guo, L. et al. 2022. Effects of catalytic infrared drying in combination with hot air drying and freeze drying on the drying characteristics and product quality of chives. *LWT*, 161. Article number: 113363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113363>.

- Guiamba, I. R.F., Svanberg, U., Ahrné, L. 2015. Effect of infrared blanching on enzyme activity and retention of β -carotene and vitamin C in dried mango. *Journal of Food Science*, 80(6), pp. E1235-E1242. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12866>.
- Guida, V., Ferrari, G., Pataro, G., Chambery, A. et al. 2013. The effects of ohmic and conventional blanching on the nutritional, bioactive compounds and quality parameters of artichoke heads. *LWT – Food Science and Technology*, 53(2), pp. 569–579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.04.006>.
- Guo, C., Mujumdar, A. S., Zhang, M. 2019. New development in radio frequency heating for fresh food processing: A review. *Food Engineering Reviews*, 11, pp. 29–43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9184-z>.
- Guo, X., Hao, Q., Qiao, X., Li, M. et al. 2023. An evaluation of different pretreatment methods of hot-air drying of garlic: Drying characteristics, energy consumption and quality properties. *LWT*, 180. Article number: 114685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114685>.
- Guruprasad, M., Chengaiyan, J. G., Ahmad, F., Haque, S. et al. 2024. Effect of microwave-based dry blanching on drying of potato slices: A comparative study. *ACS Omega*, 9(13), pp. 15143–15150. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09465>.
- Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L. et al. 2021. Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 110, pp. 765–777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.039>.
- Iqbal, A., Murtaza, A., Hu, W., Ahmad, I. et al. 2019. Activation and inactivation mechanisms of polyphenol oxidase during thermal and non-thermal methods of food processing. *Food and Bioproducts Processing*, 117, pp. 170–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.07.006>.
- Jenkins, R., Aldwell, B., Yin, S., Meyer, M. et al. 2019. Energy efficiency of a quartz tungsten halogen lamp: Experimental and numerical approach. *Thermal Science and Engineering Progress*, 13. Article number: 100385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100385>.
- Jiang, D.-L., Wang, Q.-H., Huang, C., Sutar, P. P. et al. 2024. Effect of various different pretreatment methods on infrared combined hot air impingement drying behavior and physicochemical properties of strawberry slices. *Food Chemistry: X*, 22. Article number: 101299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101299>.
- Joardder, M. U. H., Shahriar, Md. F. 2023. Principles of infrared heating in food processing and preservation. In *Emerging Thermal Processes in the Food Industry. Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry*. Monograph. Ed.: S. M. Jafari, Woodhead Publishing, pp. 33–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822107-5.00010-6>.
- Ju, H.-Y., Vidyarthi, S. K., Karim, M. A., Yu, X.-L. et al. 2023. Drying quality and energy consumption efficient improvements in hot air drying of papaya slices by step-down relative humidity based on heat and mass transfer characteristics and 3D simulation. *Drying Technology*, 41(3), pp. 460–476. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2099416>.
- Kapadiya, D. C., Makavana, J. M., Kathiria, M. K. 2018. Effect of hot water blanching treatment on quality of dried potato slices. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(7), pp. 2754–2764. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.707.322>.
- Kim, A.-N., Lee, K.-Y., Rahman, M. S., Kim, H.-J. et al. 2020. Effect of water blanching on phenolic compounds, antioxidant activities, enzyme inactivation, microbial reduction, and surface structure of samnamul (*Aruncus dioicus* var *kamtschaticus*). *International Journal of Food Science & Technology*, 55(4), pp. 1754–1762. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14424>.
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., Cárcel, J. A. 2020. Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, pp. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.001>.
- Lopez-Quiroga, E., Prosapio, V., Fryer, P. J., Norton, I. T. et al. 2020. Model discrimination for drying and rehydration kinetics of freeze-dried tomatoes. *Journal of Food Process Engineering*, 43(5). Article number: e13192. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13192>. (Special Issue: Conference of Food Engineering 2018).
- Lu, W., Shi, Y., Wang, R., Su, D. et al. 2021. Antioxidant activity and healthy benefits of natural pigments in fruits: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9). Article number: 4945. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22094945>.
- Luo, S.-Z., Sun, Y., Yuan, X., Pan, L.-H. et al. 2023. Infrared radiation blanching – inhibited browning and extended shelf life of pecan kernels. *Journal of Food Science*, 88(4), pp. 1566–1579. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16505>.
- Ma, Y., Yi, J., Jin, X., Li, X. et al. 2023. Freeze-drying of fruits and vegetables in food industry: Effects on phytochemicals and bioactive properties attributes – A comprehensive review. *Food Reviews International*, 39(9), pp. 6611–6629. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2122992>.

- Mehanna, M. M., Abla, K. K. 2022. Recent advances in freeze-drying: Variables, cycle optimization, and innovative techniques. *Pharmaceutical Development and Technology*, 27(8), pp. 904–923. DOI: <https://doi.org/10.1080/10837450.2022.2129385>.
- Misra, S., Mandliya, S., Panigrahi, C. 2022. Ohmic heating: Principles and applications. 2022. In *Thermal Food Engineering Operations*. Monograph. Eds.: N. Kumar, A. Panghal, M. K. Garg. Wiley, pp. 261–299. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119776437.ch10>.
- Nalawade, S. A., Sinha, A., Hebbar, H. U. 2018. Infrared based dry blanching and hybrid drying of bitter gourd slices: Process efficiency evaluation. *Journal of Food Process Engineering*, 41(4). Article number: e12672. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12672>.
- Neutzling, H. P., da Silva, Timm N., da Costa, Corrêa Cañizares L., Schwab, M. P. et al. 2023. Effects of infrared radiation heating temperature and time on starch gelatinization and technological, thermal, and pasting properties of parboiled rice. *Cereal Chemistry*, 100(3), pp. 734–744. DOI: <https://doi.org/10.1002/cche.10650>.
- Nguyen, H., Le, Q. H., Pham, V. K. 2022. A review of drying methods assisted by infrared radiation, microwave and radio frequency. In *Comprehensive review of the versatile dehydration processes*. Monograph. Ed.: D. J. Jelena. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.108650>.
- Nguyen, T. K., Mondor, M., Ratti, C. 2018. Shrinkage of cellular food during air drying. *Journal of Food Engineering*, 230, pp. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.017>.
- Oduola, A. A., Callewaert, P., Devlieghere, F., Bluhm, B. H. et al. 2022. Growth and aflatoxin B1 biosynthesis rate of model *Aspergillus flavus* NRRL 3357 exposed to selected infrared wavelengths. *Food Control*, 141. Article number: 109204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109204>.
- Okonkwo, C. E., Moses, O. I., Nwonuma, C., Abiola, T. et al. 2022. Infrared and microwave as a dry blanching tool for Irish potato: Product quality, cell integrity, and artificial neural networks (ANNs) modeling of enzyme inactivation kinetic. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 78. Article number: 103010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103010>.
- Owusu-Apenten, R., Vieira, E. 2023. Quality of dried foods. In *Elementary Food Science. Food Science Text Series*. Monograph. Springer, Cham., pp. 335–351. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65433-7_15.
- Phyo, P., Gu, Y., Hong, M. 2019. Impact of acidic pH on plant cell wall polysaccharide structure and dynamics: Insights into the mechanism of acid growth in plants from solid-state NMR. *Cellulose*, 26, pp. 291–304. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2094-7>.
- Qu, W., Fan, W., Zhu, Y., Ma, H. et al. 2021. Nutritive quality of walnuddried by variable temperature drum catalytic infrared-hot air. *Science and Technology of Food Industry*, 42(24), pp. 205–215. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040298.
- Quayson, E. T., Ayernor, G. S., Johnson, P.-N. T., Ocloo, F. C. K. 2021. Effects of two pre-treatments, blanching and soaking, as processing modulation on non-enzymatic browning developments in three yam cultivars from Ghana. *Heliyon*, 7(6). Article number: e07224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07224>.
- Renard, C. M. G. C., Brick, H., Maingonnat, J.-F., Kadelka, C. et al. 2023. Relative role of leaching and chemical degradation in the loss of water-soluble vitamins C and B9 from frozen vegetables cooked in water. *LWT*, 180. Article number: 114694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114694>.
- Richter, Reis F. 2023. Blanching in the food industry. In *Thermal Processing of Food Products by Steam and Hot Water*. Monograph. Ed.: S. M. Jafari. Woodhead Publishing, pp. 211–246. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818616-9.00007-9>. (Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry).
- Rifna, E. J., Singh, S. K., Chakraborty, S., Dwivedi, M. 2019. Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: Recent advances. *Food Research International*, 126. Article number: 108654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108654>.
- Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R. et al. 2020. Infrared drying of food materials: Recent advances. *Food Engineering Reviews*, 12, pp. 381–398. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09237-w>.
- Salehi, F., Kashaninejad, M. 2018. Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying. *Information Processing in Agriculture*, 5(4), pp. 516–523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.05.006>.
- Salehi, F., Kashaninejad, M., Jafarianlari, A. 2017. Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices. *Heat Mass Transfer*, 53, pp. 1751–1759. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1931-1>.
- Sethi, S., Choudhary, P., Nath, P., Chauhan, O. P. 2022. Starch gelatinization and modification. In *Advances in Food Chemistry*. Ed.: O. P. Chauhan. Springer, Singapore, pp. 65–116. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4796-4_3.
- Sharma, P., Venugopal, A. P., Sutar, P. P., Xiao, H. et al. 2024. Mechanism of microbial spore inactivation through electromagnetic radiations: A review. *Journal of Future Foods*, 4(4), pp. 324–334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2023.11.004>.

- Sirohi, R., Tarafdar, A., Gaur, V. K., Singh, S. et al. 2021. Technologies for disinfection of food grains: Advances and way forward. *Food Research International*, 145. Article number: 110396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110396>.
- Song, X., Yu, X., Zhou, C., Xu, B. et al. 2021. Conveyor belt catalytic infrared as a novel apparatus for blanching processing applied to sweet potatoes in the industrial scale. *LWT*, 149. Article number: 111827. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111827>.
- Sui, X., Meng, Z., Dong, T., Fan, X. et al. 2023. Enzymatic browning and polyphenol oxidase control strategies. *Current Opinion in Biotechnology*, 81. Article number: 102921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.102921>.
- Thamkaew, G., Sjöholm, I., Galindo, F. G. 2021. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(11), pp. 1763–1786. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>.
- Tyagi, L., Sharma, G. P., Verma, R. C., Jain, S. K. et al. 2020. Infrared heating in food processing: An overview. *International Journal of Chemical Studies*, 8, pp. 327–336. DOI: <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i3e.9248>.
- Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H. et al. 2023a. Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review. *Oil Crop Science*, 8(1), pp. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2023.02.002>.
- Wang, J., Yang, X.-H., Mujumdar, A. S., Wang, D. et al. 2017. Effects of various blanching methods on weight loss, enzymes inactivation, phytochemical contents, antioxidant capacity, ultrastructure and drying kinetics of red bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *LWT*, 77, pp. 337–347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.070>.
- Wang, R., Liu, J., Zhang, J., Li, G. et al. 2023b. Effect of thermal blanching on the inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in lily bulb, and the functional properties of its flours. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17, pp. 615–626. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01658-x>.
- Wang, S., Chao, C., Xiang, F., Zhang, X. et al. 2018. New insights into gelatinization mechanisms of cereal endosperm starches. *Scientific Reports*, 8. Article number: 3011. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21451-5>.
- Wang, Y., Zhang, L., Yu, X., Zhou, C. et al. 2023. A catalytic infrared system as a hot water replacement strategy: A future approach for blanching fruits and vegetables to save energy and water. *Food Reviews International*, 40(2), pp. 641–657. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2187060>.
- Wu, B., Guo, Y., Wang, J., Pan, Z. et al. 2018a. Effect of thickness on non-fried potato chips subjected to infrared radiation blanching and drying. *Journal of Food Engineering*, 237, pp. 249–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.030>.
- Wu, B., Ma, Y., Guo, X., Guo, Y. et al. 2023. Catalytic infrared blanching and drying of carrot slices with different thicknesses: Effects on surface dynamic crusting and quality characterization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 88. Article number: 103444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103444>.
- Wu, B., Ma, Y., Guo, Y., Zielinska, M. et al. 2024. Research progress in the application of catalytic infrared technology in fruit and vegetable processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(1). Article number: e13291. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13291>.
- Wu, B., Pan, Z., Xu, B., Bai, J. et al. 2018b. Drying performance and product quality of sliced carrots by infrared blanching followed by different drying methods. *International Journal of Food Engineering*, 14(5–6). Article number: 20170384. DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0384>.
- Wu, X.-f., Zhang, M., Li, Z. 2019. Influence of infrared drying on the drying kinetics, bioactive compounds and flavor of *Cordyceps militaris*. *LWT*, 111, pp. 790–798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.108>.
- Xiao, H.-W., Pan, Z., Deng, L.-Z., El-Mashad, H. M. et al. 2017. Recent developments and trends in thermal blanching – A comprehensive review. *Information Processing in Agriculture*, 4(2), pp. 101–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.02.001>.
- Yan, X., McClements, D. J., Luo, S., Liu, C. et al. 2024. Recent advances in the impact of gelatinization degree on starch: Structure, properties and applications. *Carbohydrate Polymers*, 340. Article number: 122273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122273>.
- Yao, J., Chen, W., Fan, K. 2023. Novel efficient physical technologies for enhancing freeze drying of fruits and vegetables: A review. *Foods*, 12(23). Article number: 4321. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12234321>.
- Zahoor, I., Mir, T. A., Ayoub, W. S., Farooq, S. et al. 2023. Recent applications of microwave technology as novel drying of food – Review. *Food and Humanity*, 1, pp. 92–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.05.001>.
- Zeng, S., Li, M., Li, G., Lv, W. et al. 2022. Innovative applications, limitations and prospects of energy-carrying infrared radiation, microwave and radio frequency in agricultural products processing. *Trends in Food Science & Technology*, 121, pp. 76–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.032>.
- Zeng, Y., Liu, Y., Zhang, J., Xi, H. et al. 2019. Effects of far-infrared radiation temperature on drying characteristics, water status, microstructure and quality of kiwifruit slices. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, pp. 3086–3096. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00231-3>.

- Zhang, X., Shi, Q., Gao, T., Zhang, Z. et al. 2020a. Developing radio frequency blanching process of apple slice. *Journal of Food Engineering*, 273. Article number: 109832. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109832>.
- Zhang, Z., Yao, Y., Shi, Q., Zhao, J. et al. 2020b. Effects of radio-frequency-assisted blanching on the polyphenol oxidase, microstructure, physical characteristics, and starch content of potato. *LWT*, 125. Article number: 109357. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109357>.
- Zhao, K., Ye, F., Cheng, L., Yang, J. et al. 2023. An overview of ultra-high temperature ceramic for thermal insulation: Structure and composition design with thermal conductivity regulation. *Journal of the European Ceramic Society*, 43(16), pp. 7241–7262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.07.046>.

Сведения об авторе

Бурак Леонид Чеславович – ул. Пономаренко, 35А, г. Минск, Республика Беларусь, 220015;
Общество с ограниченной ответственностью "БЕЛПРОСАКВА", доктор философии в области пищевых наук (PhD), канд. техн. наук;
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Leonid Ch. Burak – 35A Ponomarenko Str., Minsk, Republic of Belarus, 220015;
Limited Liability Company "BELROSAKVA", PhD, Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: leonidburak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

УДК 637.33:576.852.4

Роль ферментов молочнокислых бактерий в формировании антиоксидантного потенциала кисломолочных продуктов

Т. С. Бычкова*, Е. М. Крутина, Ю. А. Дягилева

*Всероссийской научно-исследовательский институт молочной промышленности, г. Москва, Россия;
e-mail: t_bychkova@vnimi.org, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9539-1600>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
31.03.2025;

получена
после доработки
22.05.2025;

принята
к публикации
26.05.2025

Ключевые слова:

ферменты,
молочнокислые
микроорганизмы,
антиоксиданты,
ферментативная
активность,
Lactobacillus acidophilus,
Lactobacillus bulgaricus,
Streptococcus thermophilus

Ферменты молочнокислых микроорганизмов (МКМ) играют ключевую роль в процессах ферментации, определяя органолептические свойства и биологическую ценность молочных продуктов. Данные микроорганизмы синтезируют ферменты всех шести классов, включая оксидоредуктазы, трансферазы, гидролазы, лиазы, изомеразы и лигазы. Особое значение имеют лактатдегидрогеназа, НАДН-оксидаза и каталаза, регулирующие окислительно-восстановительные процессы. Гидролазы, такие как β -галактозидаза, протеазы и липазы, участвуют в расщеплении сложных молекул, влияя на вкус и питательные свойства продуктов. Ферменты МКМ также играют важную роль в антиоксидантной защите за счет выработки супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы, снижая уровень окислительного стресса. *Lactobacillus acidophilus* и другие пробиотические микроорганизмы обладают высокой ферментативной активностью, улучшая биодоступность питательных веществ и способствуя формированию функциональных продуктов. Антиоксидантный потенциал ферментированных молочных продуктов зависит от вида микроорганизмов, условий ферментации и состава молока.

Для цитирования

Бычкова Т. С. и др. Роль ферментов молочнокислых бактерий в формировании антиоксидантного потенциала кисломолочных продуктов. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 296–311. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-296-311>.

Role of lactic acid bacterial enzymes in forming antioxidant potential of fermented milk products

Tatyana S. Bychkova*, Ekaterina M. Krutina, Yulia A. Diaghileva

*All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia;
e-mail: t_bychkova@vnimi.org, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9539-1600>

Article info

Received
31.03.2025;

received
in revised form
22.05.2025;

accepted
26.05.2025

Key words:

enzymes, lactic acid
microorganisms,
antioxidants, enzymatic
activity, *Lactobacillus
acidophilus*,
Lactobacillus bulgaricus,
Streptococcus thermophilus

Abstract

Enzymes of lactic acid microorganisms (LAB) play a key role in fermentation processes determining the organoleptic properties and biological value of dairy products. These microorganisms synthesize enzymes of all six classes, including oxidoreductases, transferases, hydrolases, lyases, isomerases and ligases. Lactate dehydrogenase, NADH oxidase and catalase which regulate redox processes are of particular importance. Hydrolases such as β -galactosidase, proteases and lipases are involved in the breakdown of complex molecules, affecting the taste and nutritional properties of foods. MCM enzymes also play an important role in antioxidant protection by producing superoxide dismutase and glutathione peroxidase, reducing the level of oxidative stress. *Lactobacillus acidophilus* and other probiotic microorganisms have high enzymatic activity, improving the bioavailability of nutrients and contributing to the formation of functional products. The antioxidant potential of fermented dairy products depends on the type of microorganisms, fermentation conditions, and milk composition.

For citation

Bychkova, T. S. et al. 2025. Role of lactic acid bacterial enzymes in forming antioxidant potential of fermented milk products. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 296–311. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-296-311>.

Введение

Молочнокислые микроорганизмы (МКМ) играют центральную роль в пищевой промышленности, будучи главными участниками ферментации широкого спектра продуктов. Эта микробиологическая трансформация в значительной степени зависит от их сложной ферментативной активности, определяющей не только скорость и эффективность ферментации, но и сенсорные, текстурные и питательные характеристики конечного продукта (*Holzapfel, 2002*). Глубокое понимание ферментативных систем МКМ необходимо для оптимизации производственных процессов, контроля качества и разработки инновационных продуктов с улучшенными функциональными свойствами.

Антиоксидантный потенциал кисломолочной продукции характеризуется показателями антиоксидантной емкости и антиоксидантной активности, тесно связан с биологически активными веществами, синтезируемыми в процессе ферментации, и напрямую зависит от применяемых МКМ. Одним из важных показателей биологической активности заквасочных культур является их способность продуцировать ферменты, от природы которых зависит перечень образующихся в системе биологически активных веществ. Поэтому оценка ферментативной активности используемых в молочной промышленности МКМ позволит прогнозировать антиоксидантный эффект готовой продукции.

Ввиду отсутствия обобщающих данных установление зависимости антиоксидантного потенциала кисломолочной продукции от ферментативной активности применяемых в закваске МКМ и корреляция данных характеристик является перспективным для научных исследований.

Материалы и методы

Ферменты МКМ, подобно всем ферментам, классифицируются в соответствии с системой, разработанной Международным союзом биохимии и молекулярной биологии (IUBMB)¹. Эта система, основанная на типе катализируемой реакции, делит ферменты на шесть основных классов, каждый из которых подразделяется на подклассы, подподклассы и индивидуальные ферменты, идентифицируемые уникальным номером ЕС (Enzyme Commission).

МКМ синтезируют все группы ферментов, а именно: оксидоредуктазы, трансферазы, гидролазы, лиазы, изомеразы и лигазы. Из группы оксидоредуктаз наиболее значимыми являются лактатдегидрогеназы, НАДН-оксидазы и пероксидазы.

Лактатдегидрогеназа (LDH) – центральный фермент молочнокислого брожения, катализирующий обратимую реакцию восстановления пирувата в лактат, используя НАДН в качестве кофактора (*Kandler et al., 1983*). Схема данного превращения представлена на рис. 1. Различные изоформы LDH (L-LDH и D-LDH) определяют стереоизомерию образующегося лактата, что важно для вкуса и безопасности продукта. Гомоферментативные МКМ обладают преимущественно L-LDH, в то время как гетероферментативные имеют и другие LDH, приводя к образованию различных продуктов брожения (этанол, углекислый газ, ацетат).

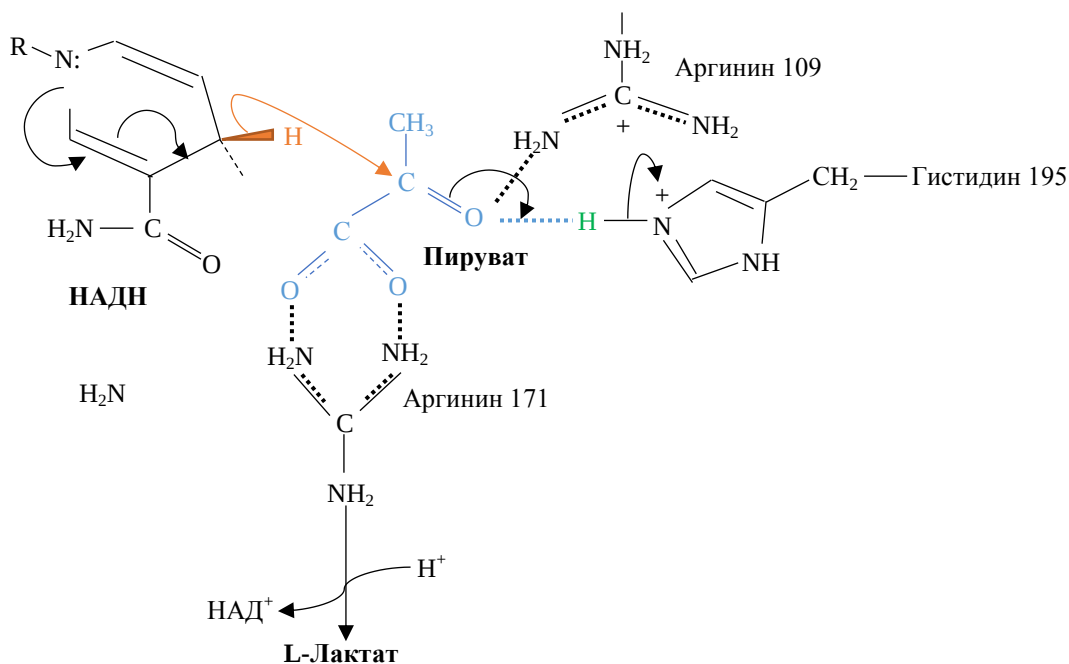


Рис. 1. Схема превращения пирувата в L-лактат
Fig. 1. Scheme for the conversion of pyruvate to L-lactate

¹ IUBMB. Nomenclature Committee. Enzyme Nomenclature. 2023. URL: <https://www.qmul.ac.uk/sbcs/iubmb/enzyme/>.

Также важным ферментом из группы оксидоредуктаз является НАДН-оксидаза, которая катализирует окисление НАДН молекулярным кислородом, регенерируя НАД⁺ и образуя воду или перекись водорода (Park et al., 2011). Она важна для поддержания окислительно-восстановительного баланса в клетке, особенно в условиях аэробного брожения. Некоторые МКМ используют ее для удаления кислорода, создавая более анаэробные условия, благоприятные для молочнокислого брожения. Каталаза, в свою очередь, интенсифицирует разложение перекиси водорода на воду и кислород, защищая клетки от ее токсичного воздействия. Не все МКМ могут синтезировать каталазу, что делает их более чувствительными к кислороду.

К группе трансфераз, синтезируемых МКМ, относятся ферменты фосфоглюкомутаза и гликозилтрансфераза. Фосфоглюкомутаза катализирует обратимое превращение глюкозо-1-фосфата в глюкозо-6-фосфат – ключевой шаг в метаболизме галактозы и других моносахаридов, обеспечивая их включение в путь гликолиза (Evert et al., 1998). Гликозилтрансферазы участвуют в синтезе экзополисахаридов (ЭПС) из сахаров и нуклеотидсахаров (Jurášková et al., 2002). ЭПС, продуцируемые некоторыми МКМ, вносят вклад в улучшение консистенции, вязкости и стабильности ферментированных продуктов. Разные гликозилтрансферазы отвечают за перенос разных гликозильных остатков, определяя структуру и свойства ЭПС.

β -галактозидаза относится к группе гидролаз, гидролизует β -1,4-гликозидную связь в лактозе, расщепляя ее на глюкозу и галактозу (Vasudha et al., 2023). Она критически важна для молочной промышленности, позволяя снизить содержание лактозы в продуктах для людей с лактазной недостаточностью и улучшить усвояемость компонентов молока. Также к этой группе ферментов относятся протеазы, которые расщепляют белки на пептиды и аминокислоты, играя важную роль в развитии вкуса и аромата сыров и других ферментированных продуктов (Savijoki et al., 2000). Внеклеточные протеазы расщепляют казеины, основные белки молока, в то время как внутриклеточные протеазы участвуют в дальнейшей деградации пептидов. Пептидазы, в свою очередь, действуют на пептиды, образуемые в результате протеолиза, расщепляя их на более короткие фрагменты и аминокислоты (Kunji et al., 1996). Они определяют финальный аминокислотный состав, внося вклад в специфический вкус и аромат продукта. Фосфатазы гидролизуют фосфоэфиры, высвобождая фосфат. Могут влиять на доступность фосфора для МКМ и участвовать в регуляции метаболических путей. Липазы как еще один фермент группы гидролаз гидролизуют триглицериды, высвобождая жирные кислоты, диглицериды и моноглицериды (Collins et al., 2003). Свободные жирные кислоты, особенно короткоцепочечные, вносят вклад в характерный аромат и вкус сыров. На рис. 2 представлены строение молекулы липазы и гидролиз триглицеридов, происходящий под действием липазы.

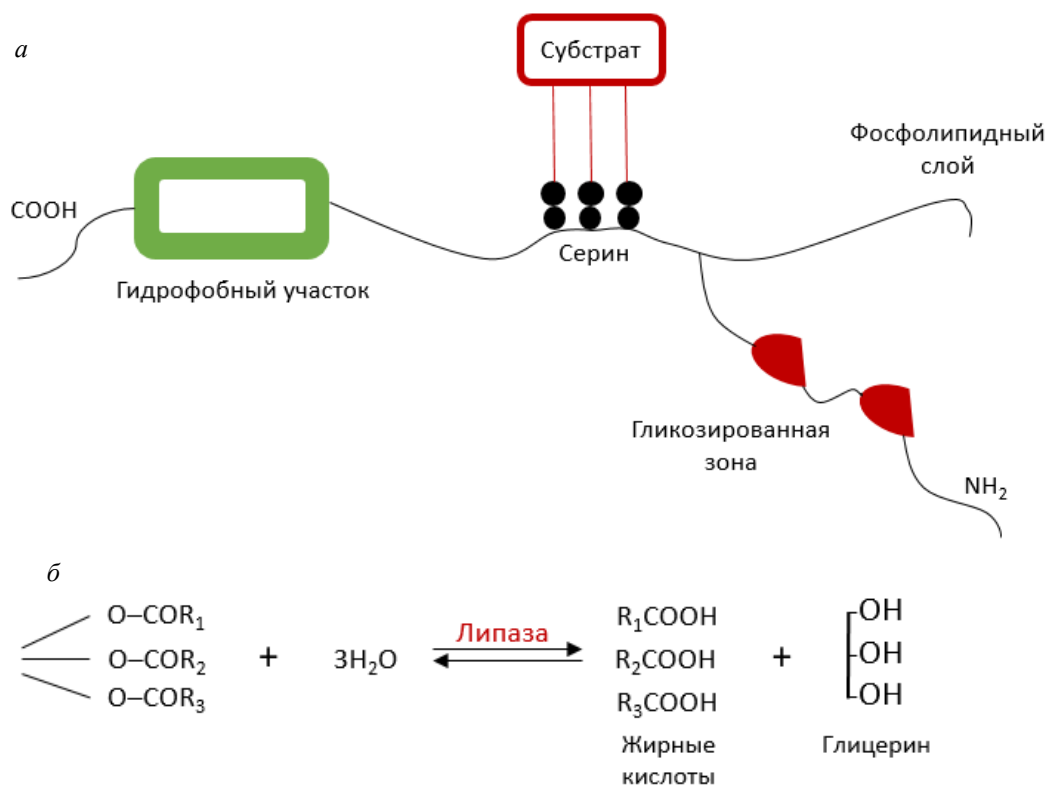


Рис. 2. а – молекула липазы; б – гидролиз триглицеридов (Chandra et al., 2020)

Fig. 2. а – lipase molecule; б – triglyceride hydrolysis (Chandra et al., 2020)

Из группы лиаз наиболее значимыми являются декарбоксилазы – отщепляют карбоксильную группу (COOH) от аминокислот, образуя амины, такие как гистамин, тирамин и кадаверин (Stratton et al., 1991). Некоторые амины могут быть токсичными (биогенные амины), особенно в высоких концентрациях. Также к лиазам относят альдозазы, катализирующие обратимое расщепление фруктозо-1,6-бисфосфата на глицеральдегид-3-фосфат и дигидроксиацетонфосфат, ключевой этап гликолиза (Gottschalk, 1986).

Фосфоглюкозоизомераза является представителем группы ферментов изомераз. Катализирует обратимое превращение глюкозо-6-фосфата во фруктозо-6-фосфат, необходимый шаг в гликолизе – процессе, лежащем в основе гомоферментативного молочнокислого брожения.

Лигазы (синтетазы) катализируют образование новых химических связей между двумя молекулами, обычно сопряженное с гидролизом АТФ или другого нуклеозидтрифосфата. Игрют роль в биосинтезе сложных молекул, таких как ДНК, РНК и белки.

Ферменты МКМ, как и все ферменты, обладают характерными свойствами, определяющими их эффективность и стабильность. Каждый фермент обладает высокой специфичностью к определенному субстрату или группе субстратов. Также активность ферментов сильно зависит от pH среды – оптимальный pH варьируется в зависимости от фермента и вида МКМ. Существует также температурная зависимость – активность ферментов увеличивается с повышением температуры до определенного предела, после которого происходит денатурация и потеря активности. Оптимальная температура также зависит от фермента и вида МКМ. Активность ферментов может быть ингибирована различными веществами, включая продукты реакции, тяжелые металлы, специфические ингибиторы и даже высокие концентрации субстрата. На рис. 3 представлены данные исследований коллектива ученых Университета Клода Бернара (Лион, Франция), где были изучены зависимость относительной активности протеиназ, вырабатываемых *Lactobacillus bulgaricus*, от температуры и кислотности среды (pH) (Laloi et al., 1991).

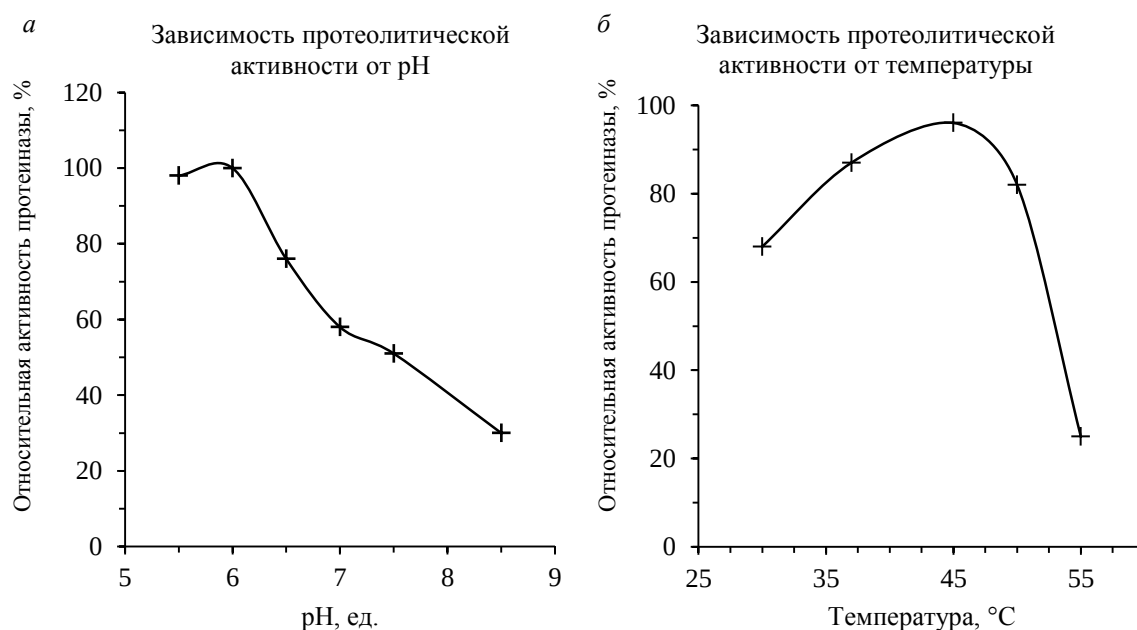


Рис. 3. Зависимость относительной активности протеазы от условий ферментации (Laloi et al., 1991)
Fig. 3. Dependence of relative protease activity on fermentation conditions (Laloi et al., 1991)

Результаты и обсуждение

Синтез ферментов МКМ – сложный процесс, регулируемый на различных уровнях, обеспечивая адаптацию метаболизма к изменяющимся условиям окружающей среды (Рожкова, 2020).

На рис. 4 представлена активность X-пролил-дипептидаминопептидазы бесклеточных внутриклеточных и внеклеточных ферментативных экстрактов отдельных культур бактерий (*S. thermophilus* St 1342, *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* Lb 1466, *L. acidophilus* L10, *B. lactis* B94 и *L. casei* L26, *L. acidophilus* La 4962, *B. longum* Bl 536 и *L. casei* Lc 279) с использованием Gly-Pro-pNA в качестве субстрата в 50 ммоль-л-1 буфере Трис-HCl pH 7,0 при 37 °C. Удельная активность аминопептидазы определяется как единицы (Ед) ферментативной активности на мг белка в сыром клеточном экстракте. Одна единица активности фермента определялась как количество фермента, необходимое для высвобождения 1 мкмоль п-нитроанилида в минуту в условиях

анализа (планки погрешностей представляют собой объединенную стандартную ошибку среднего значения) (Donkor et al., 2007).

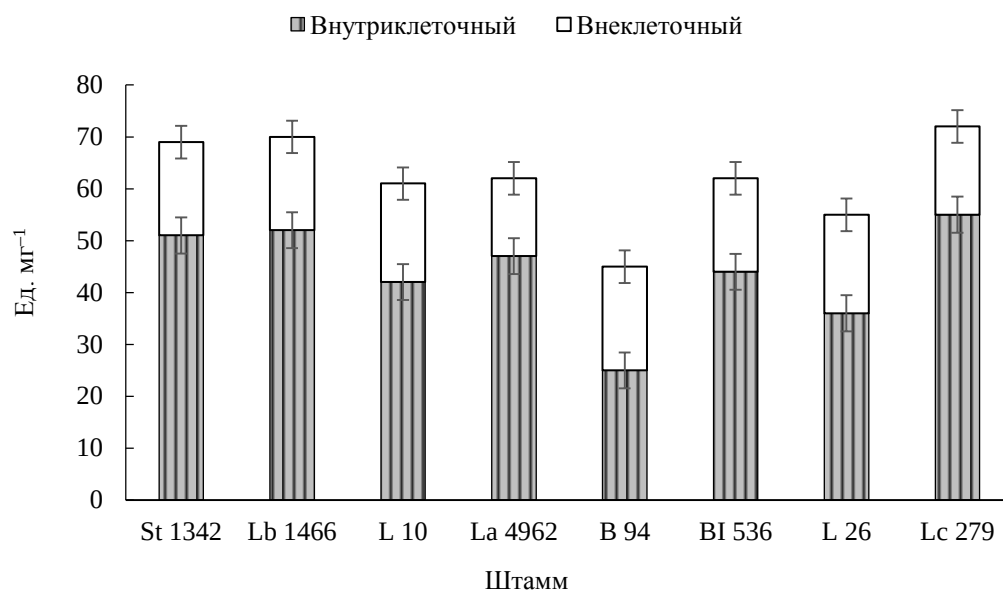


Рис. 4. Протеолитическая активность МКМ в зависимости от штаммов (Donkor et al., 2007)

Fig. 4. Proteolytic activity of MCM depending on strains (Donkor et al., 2007)

Экспрессия генов, кодирующих ферменты, контролируется сложными регуляторными механизмами, включающими транскрипционные факторы, промоторы и операторы. Индукция и репрессия генов под действием субстратов и продуктов метаболизма позволяют МКМ адаптироваться к доступным питательным веществам. Присутствие глюкозы, предпочтительного источника углерода для многих МКМ, может подавлять синтез ферментов, необходимых для метаболизма других сахаров, таких как лактоза. Различные транскрипционные факторы связываются со специфическими последовательностями ДНК, регулируя транскрипцию генов, кодирующих ферменты. Эффективность трансляции матричных РНК (мРНК), кодирующих ферменты, может регулироваться различными механизмами, влияющими на связывание рибосом и стабильность мРНК. Активность ферментов может регулироваться посттрансляционными модификациями, такими как фосфорилирование, гликозилирование и ацетилирование.

Ферментированные молочные продукты, такие как йогурты и кефиры, привлекли к себе внимание благодаря своим значительным антиоксидантным свойствам, которые во многом обусловлены их сложным составом и ферментативной активностью применяемых молочнокислых бактерий. Антиоксидантный потенциал ферментированных молочных продуктов может способствовать укреплению здоровья за счет снижения окислительного стресса, который связан с развитием различных хронических заболеваний, включая диабет второго типа и сердечно-сосудистые заболевания (Семенихина и др., 2018).

Исследования показывают, что регулярное употребление этих продуктов может повысить уровень иммунной защиты организма человека, что достигается увеличением количества необходимых ферментов в антиоксидантной системе организма (Консорциум..., 2010).

На антиоксидантную способность этих продуктов влияют различные факторы, в том числе происхождение молока, используемые штаммы бактерий и применяемые методы обработки (Padghan et al., 2018). Антиоксидантный потенциал ферментированных продуктов обусловлен множеством биоактивных соединений, включая белки (особенно казеин), пептиды, витамины (С, Е, А и D), каротиноиды и минералы. Примечательно, что наличие специфических ферментов, таких как супероксиддисмутаза (СОД), каталаза и глутатионпероксидаза, повышает антиоксидантную способность за счет нейтрализации активных форм кислорода (АФК) (Farhangi et al., 2016). СОД – группа основных антиоксидантных ферментов, отвечающих за защиту клеток от вредного воздействия АФК. Камбиалистические СОД являются специфичным подклассом супероксиддисмутаз. Эти белки активны как с Fe, так и с Mn в активном центре, в отличие от других СОД, которые строго специфичны к металлам. Некоторые молочнокислые бактерии обладают камбиалистической СОД (Russo Krauss et al., 2015). Известно, что *Streptococcus thermophilus* LMG 18311 содержит одну MnSOD,

которая не чувствительна к воздействию H_2O_2 в присутствии высокой концентрации Mn (*De Vendittis et al., 2012*). В исследованиях (*Serata et al., 2018*) обнаружена корреляция между активностью СОД и концентрацией марганца в *Lactobacillus casei Shirota*. Таким образом, можно сказать, что усиление экспрессии СОД является эффективным методом снижения окислительного стресса в живых клетках. На рис. 5 представлено действие СОД на АФК.

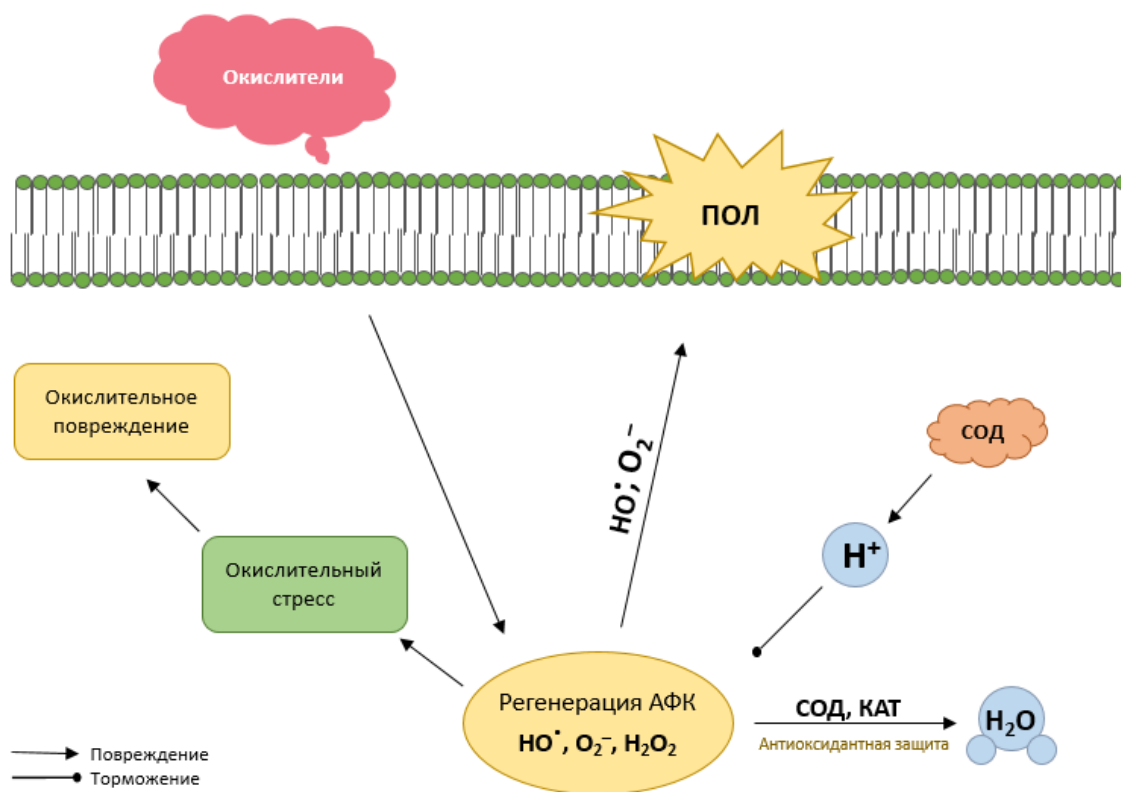


Рис. 5. Действие СОД против АФК (ПОЛ – перекисное окисление липидов) (*Kong et al., 2020*)
Fig. 5. SOD action against ROS (LPO – lipid peroxidation) (*Kong et al., 2020*)

Кроме того, сам процесс ферментации способствует высвобождению антиоксидантных пептидов, которые значительно повышают антиоксидантный потенциал по сравнению с неферментированным молоком (*Panchal et al., 2022*). Исследования показывают, что антиоксидантный потенциал зависит от используемого штамма бактерий: некоторые штаммы способствуют более высокому уровню поглощения радикалов по сравнению с другими (*Dayara et al., 2019*). При этом синергетическое действие различных антиоксидантов в молоке помогает сформировать эффективную антиоксидантную сеть, обеспечивающую надежную защиту от окисления как в молочной сыворотке, так и в организме человека (*Донская, 2020*).

В рамках направления научно-исследовательской работы лаборатории для изучения отобраны следующие культуры МКМ из коллекции Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (ВНИМИ): *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus bulgaricus* и *Streptococcus thermophiles*.

Lactobacillus acidophilus – важная пробиотическая бактерия, которая играет жизненно важную роль в ферментации молочных продуктов, улучшая их питательные и органолептические свойства. Эта бактерия сбраживает углеводы в молочную кислоту, как следствие, повышается его кислотность, что увеличивает срок хранения и безопасность ферментированных продуктов. На эффективность процесса ферментации влияют несколько факторов окружающей среды, в том числе температура и pH: *L. acidophilus* способна к развитию в диапазоне температур от 30 °C до 42 °C, при этом оптимальный рост наблюдается при 38 °C, а диапазон pH составляет от 5 до 7, с оптимумом около 5,5 (*Семенихина и др., 2016*).

Помимо выработки молочной кислоты, *L. acidophilus* выделяет гидролитические ферменты, в том числе липазы и протеазы, которые расщепляют макромолекулы, такие как жиры и белки, на более мелкие соединения, придающие продуктам вкус и аромат (*Боровик и др., 2014*). Ферментация не только повышает безопасность и стабильность, но и улучшает питательную ценность молочных продуктов. Активность *L. acidophilus* повышает биодоступность некоторых витаминов и минералов, способствуя общему оздоровлению, связанному с употреблением ферментированных продуктов (*Семенихина и др., 2009*). Этот вид микроорганизмов

примечателен своей ферментативной активностью, которая способствует не только расщеплению белков и углеводов, но и выработке антиоксидантов во время ферментации.

Ферментативная активность *L. acidophilus* включает выработку протеолитических ферментов, которые расщепляют белки на пептиды и аминокислоты. Этот процесс жизненно важен при ферментации молочных продуктов, где расщепление казеина, основного молочного белка, происходит в несколько этапов: расщепление белка, транспорт пептидов, расщепление пептидов и катаболизм аминокислот (Колмакова и др., 2014). Протеолитические ферменты клеточной стенки (СЕР) инициируют расщепление белков, образуя олигопептиды, которые дополнительно влияют на вкусовой профиль ферментированных продуктов. По мере расщепления этих белков высвобождаются свободные аминокислоты и другие соединения, улучшающие органолептические свойства, например, йогурта и сыра. Кроме того, метаболические побочные продукты ферментации *L. acidophilus* могут создавать среду, благоприятную для антиоксидантной активности, тем самым повышая пользу этих молочных продуктов для здоровья (Донская, 2020; Семенихина и др., 2016). Также известно, что ферментативная активность *L. acidophilus* повышает выработку антиоксидантных ферментов, таких как СОД и глутатионпероксидаза (GSHPx), которые играют важную роль в снижении окислительного стресса в организме. Учеными Индийского национального научно-исследовательского института молочных продуктов (Индия) было проведено исследование *in vivo*, в ходе которого у мышей, которых кормили кисломолочным продуктом Ласси, наблюдалось повышение уровня антиоксидантных ферментов, таких как СОД, каталаза и глутатионпероксидаза. Ласси с *L. acidophilus* показал более значительный эффект, доказав, что ферментативная активность *L. acidophilus* усиливает антиоксидантную активность *in vivo* (Padghan et al., 2018).

Антиоксидантный потенциал ферментированных молочных продуктов все чаще признается полезным для здоровья, особенно в борьбе с окислительным стрессом – фактором, связанным с различными хроническими заболеваниями, в том числе сердечно-сосудистыми и диабетом (Донская, 2020; Колмакова и др., 2014; Зобкова и др., 2019).

Многочисленные исследования подтверждают, что антиоксидантная способность различных ферментированных молочных продуктов варьируется в зависимости от таких факторов, как используемые штаммы *L. acidophilus*, вид молока и условия ферментации (Farhangi et al., 2016; Panchal et al., 2022). Данная вариативность привела к тому, что в настоящее время проводятся исследования, изучающие влияние антиоксидантных свойств, в частности, их потенциал в снижении окислительного стресса и улучшении общего состояния здоровья человека (Dayara et al., 2019). Наличие этих антиоксидантов необходимо для борьбы с окислительным стрессом, который связан с многочисленными хроническими заболеваниями. Также антиоксидантный потенциал кисломолочных продуктов может меняться в зависимости от условий ферментации, посредством которых можно направленно регулировать ферментативную активность микроорганизмов в системе. Кроме того, продолжительность ферментации может влиять на степень протеолиза и типы образующихся пептидов, которые, в свою очередь, влияют на антиоксидантный потенциал конечного продукта (Panchal et al., 2022). Вид молока, используемого в качестве субстрата для ферментации, также играет важную роль в определении антиоксидантного потенциала ферментированных молочных продуктов. Например, было установлено, что козье и буйволиное молоко обладают более высокой антиоксидантной активностью по сравнению с коровьим при ферментации с помощью *L. acidophilus* (Dayara et al., 2019).

Исследования показали, что молочные продукты, ферментированные *L. acidophilus*, обладают антиоксидантными свойствами, сравнимыми с другими продуктами, богатыми антиоксидантами, такими как фрукты и овощи. Сочетание гидрофильных (например, пептидов и белков) и липофильных (например, витаминов и жирных кислот) антиоксидантов, содержащихся в этих продуктах, повышает их общий антиоксидантный потенциал (Донская, 2020).

На базе ВНИМИ было проведено исследование с участием взрослых с избыточным весом, ожирением и метаболическим синдромом. У участников, соблюдавших диету с достаточным количеством молочных продуктов, установлено, что за 12 недель значительно снизились показатели окислительных процессов, такие как уровень малонового диальдегида в плазме и окисленных липопротеинов низкой плотности. Это говорит о том, что потребление молочных продуктов может благотворно повлиять на уровень антиоксидантов и степень воспалительных процессов в этой популяции (Семенихина и др., 2018).

L. acidophilus может взаимодействовать с полифенолами, например, из кожуры граната, для дальнейшего повышения антиоксидантной способности ферментированного молока. Это взаимодействие не подавляет рост *L. acidophilus*, что позволяет разрабатывать функциональные пищевые продукты с повышенной пользой для здоровья (Бегунова и др., 2020).

В целом, ферментативная активность *L. acidophilus* играет ключевую роль в повышении антиоксидантного потенциала ферментированных молочных продуктов, что делает ее предметом значительного интереса в области пищевых наук и исследований в области здравоохранения. Эта двойная роль – поддержание

здоровья кишечника и антиоксидантная активность – делает *L. acidophilus* важнейшим элементом в разработке функциональных продуктов питания, направленных на улучшение здоровья населения (Padghan et al., 2018; Донская, 2020; Зобкова и др., 2019). Ферментативная активность *Lactobacillus acidophilus* не только повышает антиоксидантный потенциал, но и проявляет другие функциональные свойства ферментированных молочных продуктов, такие как антигипертензивная и противомикробная активность. Способность микроорганизма расти в различных условиях ферментации и его совместимость с различными субстратами делают его универсальным для использования в молочной промышленности (Liu et al., 2024; Федорова и др., 2018). Кроме того, наличие других пробиотических штаммов и вспомогательных культур может дополнительно усиливать эти эффекты, предоставляя широкий спектр возможностей для разработки функциональных продуктов с определенными полезными свойствами.

Хотя ферментативная активность *L. acidophilus* вносит значительный вклад в антиоксидантный потенциал ферментированных молочных продуктов, существуют проблемы, связанные с крупномасштабным производством и коммерциализацией этих продуктов. Для обеспечения качества и приемлемости ферментированных молочных продуктов необходимо учитывать такие факторы, как стабильность биоактивных пептидов при хранении, постоянство ферментативной активности в разных партиях и возможность появления посторонних привкусов (Cruz-Casas et al., 2023). В табл. 1 представлена информация о ключевых факторах, влияющих на антиоксидантную и ферментативную активность *Lactobacillus acidophilus* (Panchal et al., 2022).

Таблица 1. Ключевые факторы, влияющие на антиоксидантную активность и ферментативную активность *Lactobacillus acidophilus*

Table 1. Key factors affecting antioxidant activity and enzymatic activity of *Lactobacillus acidophilus*

Фактор	Вклад в антиоксидантный потенциал	Ферментативная активность <i>Lactobacillus acidophilus</i>
Биоактивные пептиды	Образуются в результате протеолиза молочных белков и обладают антиоксидантными, противовоспалительными и другими полезными свойствами	<i>Lactobacillus acidophilus</i> вырабатывает биоактивные пептиды с повышенной антиоксидантной активностью с помощью своих протеолитических ферментов
Специфическая для штамма ферментативная активность	Разные штаммы демонстрируют различный уровень протеолитической активности, влияющей на выработку антиоксидантных соединений	Штаммы <i>Lactobacillus acidophilus</i> с более высокой протеолитической активностью вырабатывают больше биоактивных пептидов с антиоксидантными свойствами
Условия ферментации	Оптимальная температура, pH и время инкубации повышают ферментативную активность и выработку биоактивных пептидов	<i>Lactobacillus acidophilus</i> хорошо себя чувствует в определенных условиях ферментации, что приводит к повышению антиоксидантного потенциала
Субстрат и тип молока	Тип молока влияет на выработку биоактивных пептидов и антиоксидантных соединений	<i>Lactobacillus acidophilus</i> можно использовать с разными типами молока для производства ферментированных продуктов с разным антиоксидантным потенциалом
Синергетический эффект	Сочетание с другими соединениями повышает антиоксидантную активность за счет аддитивного или синергетического эффекта	<i>Lactobacillus acidophilus</i> можно сочетать с полифенолами для получения кисломолочных продуктов с повышенным антиоксидантным потенциалом
Антиоксидантная активность <i>in vivo</i>	Употребление в пищу усиливает механизмы антиоксидантной защиты в организме, предотвращая заболевания, связанные с окислительным стрессом	Кисломолочные продукты, ферментированные <i>Lactobacillus acidophilus</i> , повышают активность антиоксидантных ферментов, улучшая общее состояние здоровья и самочувствие
Технологическое применение	Универсальный микроорганизм для производства функциональных продуктов питания благодаря своей способности вырабатывать биологически активные соединения	<i>Lactobacillus acidophilus</i> является ценным штаммом для разработки высококачественных ферментированных молочных продуктов с повышенным содержанием питательных веществ

Проанализировав информацию из табл. 1, можно сделать вывод, что дальнейшие исследования лаборатории должны быть направлены на оптимизацию условий ферментации, изучение использования различных субстратов и разработку стратегий повышения стабильности и биодоступности биоактивных

пептидов. Вместе с тем следует дополнительно изучить способность *Lactobacillus acidophilus* вырабатывать новые биологически активные соединения с усиленными антиоксидантными и другими физиологически полезными свойствами.

Streptococcus thermophilus (термофильный стрептококк) является общепризнанным безопасным видом бактерий, применяемым в пищевой промышленности. Чаще всего он используется в качестве заквасок в молочной промышленности при ферментации йогуртов и сыров. Эта бактерия остается живой даже после прохождения через пищеварительный тракт человека (Галочкина и др., 2024). Кроме того, *S. thermophilus* в йогуртовых культурах может способствовать перевариванию лактозы, а также стимулировать иммунную систему (Savaiano, 2014).

Streptococcus thermophilus – важная пробиотическая молочнокислая бактерия, которая неизбежно подвергается окислительному стрессу во время ферментации молочных продуктов. В нормальных условиях клетки могут вырабатывать большое количество АФК в процессе метаболизма. *S. thermophilus* имеет специфическую систему защиты от последствий действия активных форм кислорода, которая взаимодействует с НАДН оксидазой, СОД, глутатионом, тиоредоксином и другими антиоксидантными системами в *S. thermophilus* (Roux et al., 2022).

Yue Wang и др. в своих исследованиях изучали положительное влияние штамма *S. thermophilus* CGMCC 7.179 с пероксидазой EfeV на активность антиоксидантных ферментов в эпителиальных клетках кишечника человека. Для этого была определена активность глутатионпероксидазы (GSH-px) в клетках кишечника, которые были обработаны штаммом CGMCC 7.179 при воздействии перекиси водорода. В клетках, обработанных чистым H₂O₂, уровень глутатионпероксидазы снизился примерно в 2 раза по сравнению с нормальными клетками, в то время как активность GSH-px в клетках, обработанных штаммом CGMCC 7.179, была повышена в 1,5 раза по сравнению с клетками, обработанными H₂O₂. Важно отметить, что в исследовании также принимал участие другой штамм *S. thermophilus* – ST1314, однако в клетках, обработанных им, уровень GSH-px не повысился. Кроме того, в исследовании была измерена активность каталазы. Результаты исследования показали, что инкубация клеток совместно с *S. thermophilus* CGMCC 7.179 повысила активность каталазы в 3 раза по сравнению с группой, обработанной H₂O₂. Активность каталазы в присутствии штамма ST1314 также не увеличилась. Таким образом, в ходе данного исследования было обнаружено, что пероксидаза EfeV, присутствующая у некоторых штаммов *S. thermophilus*, может стимулировать активность антиоксидантных ферментов в клетках кишечного эпителия человека и заметно снижать избыточную выработку внутриклеточных АФК (Wang et al., 2018).

В исследованиях Шанхайского университета инженерных наук установлено, что у *S. thermophilus* широко распространен биосинтез глутатиона с помощью фермента GshF, который является важным процессом, позволяя этому виду переносить окислительный и кислотный стресс (Wang et al., 2018).

β-галактозидазная активность культур микроорганизмов в составе заквасок обеспечивает снижение содержания молочного сахара. Фермент β-галактозидаза, вырабатываемый *S. thermophilus*, активно гидролизует лактозу молока, проявляя при этом высокую активность и стабильность (Бирюк и др., 2013).

Также известно, что *S. thermophilus* не способен метаболизировать галактозу, поэтому выделяет ее в среду во время ферментации лактозы. Таким образом, (Iyer et al., 2010) были получены данные об изоляции и технологической значимости штаммов *S. thermophilus*, ферментирующих галактозу. Например, *S. thermophilus* S-3 был выделен из традиционных молочных продуктов лабораторией Kong L. Он может использовать галактозу, что является идеальным свойством МКМ (Kong et al., 2020).

МКМ требовательны к питанию и нуждаются в экзогенном источнике аминокислот для начала роста. Протеолитическая система *S. thermophilus* включает более 20 ферментов и состоит из внеклеточной протеазы, прикрепленной к клетке и способной гидролизовать казеин, – набора транспортных систем для аминокислот и пептидов и набора внутриклеточных пептидаз, участвующих в гидролизе пептидов, полученных из казеина, которые необходимы для различных процессов жизнедеятельности (Галочкина и др., 2024).

Способность *S. thermophilus* удовлетворять потребность в аминокислотах во время роста в молоке отличается от способности других видов молочнокислых бактерий. Потребность в аминокислотах удовлетворяется за счет эффективности биосинтетических способностей и взаимодействия с другими видами бактерий, растущими совместно в молочной среде, такими как *Lb. delbrueckii subsp. bulgaricus*. Некоторые штаммы *S. thermophilus* являются ауксотрофными в отношении таких аминокислот, как глутамат, цистеин, гистидин и метионин, в то время как другие молочнокислые бактерии, как известно, более требовательны к аминокислотному составу субстрата (Галочкина и др., 2024).

Также известно исследование (Feng et al., 2020), когда *S. thermophilus*, экспрессирующий каталазу, повышал выживаемость *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* ATCC 11842, при воздействии H₂O₂, и оказывал защитное действие против окислительного повреждения во время ферментации молока.

В случае с *Lactobacillus bulgaricus* существует ряд исследований, посвященных изучению его ферментативной активности. В табл. 2 представлены ферменты, которые способны продуцировать различные штаммы *L. bulgaricus*, а также их функции.

Таблица 2. Ферментативная активность *L. bulgaricus*
Table 2. Enzymatic activity of *L. bulgaricus*

Тип фермента	Роль в ферментации
Протеиназы	Гидролизуют казеины до пептидов и аминокислот, улучшая текстуру и вкус (Shuang et al., 2019)
Пептидазы	Расщепляют пептиды до более мелких пептидов и аминокислот, высвобождая биоактивные соединения (Sasaki et al., 1995)
Эстеразы	Способствуют развитию вкуса, гидролизуя эфирные связи (Kalantzopoulos et al., 1990)
Треонинальдолаза	Превращает треонин в ацетальдегид, ключевое вкусовое соединение (Marshall, 1983)
Алкоголь-дегидрогеназа	Превращает ацетальдегид в этанол, регулируя баланс вкуса (Marshall, 1983)
Амилазы	Гидролизуют крахмал до более простых сахаров, что важно для продуктов, содержащих крахмал (Sasaki et al., 1995)

Так, Shuang Z. и др. установили, что штамм *Lb. delbrueckii subsp. bulgaricus* CH9-3 4.0 является хорошим продуцентом протеиназы. Причем этот штамм превосходит изученный ранее штамм болгарской палочки CNRZ 39 по количественному синтезу протеиназ (Shuang et al., 2019).

В исследованиях (Sasaki et al., 1995) проанализирована пептидазная активность более чем 100 видов лактобактерий, а также лактококков. Установлено, что способность к синтезу данной группы ферментов сильно зависит от штамма. Большая часть лактобактерий продемонстрировали умеренную или подобную *Lc. lactis* аминопептидазную активность. *Lb. bulgaricus* продемонстрировал значительную активность X-пролил-дипептидил аминопептидазы (Ala-Pro-pNA) и пролидазную активность (Ala-Pro). Отдельного внимания заслуживает штамм *Lb. bulgaricus* SBT 2115, который продемонстрировал высокую эффективность в гидролизе большинства пролинсодержащих пептидов. Также отмечено, что болгарская палочка смогла гидролизовать бензилоксикарбонил и ацетил.

В исследованиях (Kalantzopoulos et al., 1990) изучена активность протеиназы, пептидазы и эстеразы из диких штаммов *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*: ACA-DCC 231, ACA-DCC 232, ACA-DCC 233 и *Streptococcus salivarius subsp. thermophilus*: ACA-DCC 111, ACA-DCC 113, ACA-DCC 116 и ACA-DCC 117. Используя 2-нитрофенилбутират в качестве субстрата, была оценена внутриклеточная активность эстеразы-1 в экстрактах *L. bulgaricus* ACA-DCC 231 и 234 и в экстрактах из *S. thermophilus* ACA-DCC 111 и 113. Используя 4-нитрофенилбутират в качестве субстрата, была изучена внеклеточная и внутриклеточная активность эстеразы-2 тех же штаммов. Только внутриклеточная активность эстеразы-2 наблюдалась в экстрактах из лактобактерий ACA-DCC 232,233, CNRZ 398 и из стрептококка ACA-DCC 111, что также говорит о штаммовой специфичности при синтезе микроорганизмами ферментов. При этом имеет смысл провести дополнительные исследования о симбиотическом эффекте в проявлении ферментативной активности смешанных заквасок из указанных культур.

Исходя из проведенного теоретического анализа, можно сделать вывод, что на антиоксидантный потенциал ферментированных молочных продуктов в значительной степени влияет ферментативная активность молочнокислых бактерий, которая играет ключевую роль в выработке биоактивных пептидов и других антиоксидантных соединений. Специфическая для штамма ферментативная активность, условия ферментации, тип субстрата и синергетический эффект с другими соединениями – все это способствует повышению антиоксидантного потенциала этих продуктов.

Заключение

Ферменты МКМ являются основными биокатализаторами, определяющими эффективность и специфику процессов ферментации молочных продуктов. Их активность влияет на вкус, консистенцию, пищевую ценность и функциональные свойства конечного продукта. Различные ферменты, такие как лактатдегидрогеназа, β-галактозидаза, липазы и протеазы, обеспечивают расщепление углеводов, белков и жиров, формируя характерные органолептические свойства молочных продуктов.

Особый интерес представляет антиоксидантный потенциал ферментированных продуктов, обусловленный активностью супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы. Эти ферменты способствуют снижению окислительного стресса, что может оказывать благоприятное влияние на здоровье человека, снижая риск хронических заболеваний. Доказано, что ферментированные молочные продукты, содержащие *Lactobacillus acidophilus*, обладают выраженными антиоксидантными свойствами, зависящими от состава молока, условий ферментации и штамма микроорганизма.

При этом рассматриваемые культуры молочнокислых микроорганизмов продуцируют ряд протеолитических ферментов, которые позволяют направлять процесс ферментации молочного сырья

с высвобождением аминокислот как непосредственно характеризующихся антиоксидантной активностью, так и косвенно на нее влияющих, участвуя в биохимических процессах формирования антиоксидантного потенциала. Особый интерес представляют такие ферменты, как цистин-, валин- и лейцин-ариламидазы. Сведения о качественном и количественном содержании ферментов в пищевой системе с использованием различных штаммов молочнокислых микроорганизмов позволят в дальнейшем прогнозировать ее антиоксидантный потенциал.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Бегунова А. В., Рожкова И. В., Ширшова Т. И., Крысанова Ю. И. Антимикробные свойства *Lactobacillus* в кисломолочных продуктах // Молочная промышленность. 2020. № 6. С. 22–23. DOI: <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-06-22-23>. EDN: СТАQTN.
- Бирюк Е. Н., Фурик Н. Н., Асташонок М. М. Селекция изолятов заквасочных культур лактококков и термофильного стрептококка по ферментативной активности // материалы XVI междунар. науч.-практ. конф. "Современные технологии сельскохозяйственного производства", XIV междунар. студенческой науч. конф. "Технология хранения и переработки сельскохозяйственной продукции", Гродно, 16–17 мая 2013 г. Гродно, 2013. С. 7–9. EDN: JDHEAY.
- Боровик Т. Э., Ладодо К. С., Захарова И. Н., Рославцева Е. А. [и др.]. Кисломолочные продукты в питании детей раннего возраста // Вопросы современной педиатрии. 2014. Т. 13. № 1. С. 89–95. EDN: RXPVPX.
- Галочкина Н. А., Глотова И. А., Толкачева А. А. Термофильный стрептококк: технологическая функциональность в пищевых системах, полезные для здоровья продукты метаболизма, видовая идентификация // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2024. № 1. С. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2024-1-44-50>. EDN: VXYMUV.
- Донская Г. А. Антиоксидантные свойства молока и молочных продуктов: обзор // Пищевая промышленность. 2020. № 12. С. 86–91. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10150>. EDN: XNCFER.
- Зобкова З. С., Фурсова Т. П., Зенина Д. В., Гаврилина А. Д. [и др.]. Кисломолочные продукты как составляющая функционального питания // Молочная промышленность. 2019. № 2. С. 44–46. EDN: YYGBNJ.
- Колмакова Т. С., Белик С. Н., Чистяков В. А., Моргуль Е. В. [и др.]. Характеристика кефира как ценного пробиотического продукта и его биологических свойств // Медицинский вестник Юга России. 2014. № 3. С. 35–42. EDN: RGDCDF.
- Консорциум микроорганизмов, состоящий из штаммов *Bifidobacterium bifidum* 791, *Bifidobacterium iongum* в-379м, *Lactobacillus acidophilus* NK-1, *Sterptococcus thermophilus* 132, используемый для производства кисломолочных продуктов : пат. 2454460 Рос. Федерация / В. Ф. Семенихина, И. В. Рожкова, В. Д. Харитонов, Т. А. Раскошная ; № 2010146584/10 ; заявл. 17.11.2010 ; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18.
- Рожкова И. В. Кефир – пробиотик // Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством. 2020. Т. 1, № 1(1). С. 451–456. DOI: <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-451-456>. EDN: VRYYSR.
- Семенихина В. Ф., Рожкова И. В., Бегунова А. В. Технологические аспекты использования бифидобактерий при производстве кисломолочных продуктов // Молочная промышленность. 2009. № 12. С. 9–11. EDN: KZQJTF.
- Семенихина В. Ф., Рожкова И. В., Бегунова А. В., Федорова Т. В. [и др.]. Разработка биотехнологии кисломолочного продукта с *Lactobacillus reuteri* LR1 и исследование его функциональных свойств в эксперименте in vivo и in vitro // Вопросы питания. 2018. Т. 87, № 5. С. 52–62. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10053>. EDN: YPMKRN.
- Семенихина В. Ф., Рожкова И. В., Раскошная Т. А., Бегунова А. В. [и др.]. Разработка бактериальных концентратов с пробиотическими микроорганизмами и кисломолочных продуктов с их использованием // Инновационные технологии обогащения молочной продукции (теория и практика). М. : Франтера, 2016. С. 88–109. EDN: WEHNMV.
- Фёдорова Т. В., Васина Д. В., Бегунова А. В., Рожкова И. В. [и др.]. Антагонистическая активность молочнокислых бактерий *Lactobacillus* spp. в отношении клинических изолятов *Klebsiella pneumoniae* // Прикладная биохимия и микробиология. 2018. Т. 54, № 3. С. 264–276. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0555109918030054>. EDN: XOTZPV.
- Chandra P., Enespa Singh R., Arora P. K. Microbial lipases and their industrial applications: A comprehensive review // Microbial Cell Factories. 2020. Vol. 19. Article number: 169. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01428-8>.

- Collins Y. F., McSweeney P. L. H., Wilkinson M. G. Lipolysis and free fatty acid catabolism in cheese: A review of current knowledge // *International Dairy Journal*. 2003. Vol. 13, Iss. 11. P. 841–866. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(03\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(03)00109-2).
- Cruz-Casas D. E., Chávez-García S. N., García-Flores L. A., Martínez-Medina G. A. [et al.]. Bioactive peptides from fermented milk products // *Foundations and Frontiers in Enzymology. Enzymes beyond Traditional Applications in Dairy Science and Technology* / eds.: Y. S. Rajput, R. Sharma. Academic Press, 2023. P. 289–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96010-6.00010-2>. (Chapter 10).
- Dayara Álvarez-Rosales J., Ozuna C., Salcedo-Hernández R., Rodríguez-Hernández G. Comparison of antioxidant activity of cow and goat milk during fermentation with *Lactobacillus acidophilus* LA-5 // *Prebiotics and Probiotics – Potential Benefits in Nutrition and Health* / eds.: E. Franco-Robles, J. Ramírez-Emiliano. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.8821>.
- De Vendittis A., Marco S., Di Maro A., Chambery A. [et al.]. Properties of a putative cambialistic superoxide dismutase from the aerotolerant bacterium *Streptococcus thermophilus* strain LMG 18311 // *Protein & Peptide Letters*. 2012. Vol. 19, Iss. 3. P. 333–344. DOI: <https://doi.org/10.2174/092986612799363127>.
- Donkor O. N., Henriksson A., Vasiljevic T., Shah N. P. Proteolytic activity of dairy lactic acid bacteria and probiotics as determinant of growth and in vitro angiotensin – converting enzyme inhibitory activity in fermented milk // *Lait*. 2007. Vol. 87, N 1. P. 21–38. DOI: <https://doi.org/10.1051/lait:2006023>.
- Evert J. L., Oscar P. K., Willem M. V. Regulation of the carbohydrate metabolism in *Lactococcus lactis* and other lactic acid bacteria // *Lait*. 1998. Vol. 78. P. 69–76. URL: https://lait.dairy-journal.org/articles/lait/abs/1998/01/lait_78_1998_1_9/lait_78_1998_1_9.html.
- Farhangi M. A., Javid A. Z., Dehghan P. The effect of enriched chicory inulin on liver enzymes, calcium homeostasis and hematological parameters in patients with type 2 diabetes mellitus: A randomized placebo-controlled trial // *Primary Care Diabetes*. 2016. Vol. 10, Iss. 4. P. 265–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pcd.2015.10.009>.
- Feng T., Wang J. Oxidative stress tolerance and antioxidant capacity of lactic acid bacteria as probiotic: A systematic review // *Gut Microbes*. 2020. Vol. 12, Iss. 1. Article number: 1801944. DOI: <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1801944>.
- Gottschalk G. Bacterial metabolism. Springer New York, NY, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1072-6>. (Springer Series in Microbiology).
- Holzappel W. Appropriate starter culture technologies for small-scale fermentation in developing countries // *International journal of food microbiology*. 2002. Vol. 75. P. 197–212. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00707-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00707-3).
- Iyer R., Tomar S. K., Maheswari T. U., Singh R. *Streptococcus thermophilus* strains: Multifunctional lactic acid bacteria // *International Dairy Journal*. 2010. Vol. 20, Iss. 3. P. 133–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.10.005>.
- Jurášková D., Ribeiro S. C., Silva C. C. G. Exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria: From biosynthesis to health-promoting properties // *Foods*. 2022. Vol. 11(2). P. 156. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11020156>. PMID: 35053888; PMCID: PMC8774684.
- Kalantzopoulos G., Tsakalidou E., Manolopoulou E. Proteinase, peptidase and esterase activities of cell-free extracts from wild strains of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* isolated from traditional Greek yogurt // *Journal of Dairy Research*. 1990. Vol. 57, Iss. 4. P. 593–601. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0022029900029642>.
- Kandler O. Carbohydrate metabolism in lactic acid bacteria // *Antonie van Leeuwenhoek*. 1983. Vol. 49. P. 209–224. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00399499>.
- Kong L., Xiong Z., Song X., Xia Y. [et al.]. Enhanced antioxidant activity in *Streptococcus thermophilus* by high-level expression of superoxide dismutase // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. Article number: 579804. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.579804>.
- Kunji E. R. S., Mierau I., Hagting A., Poolman B. [et al.]. The proteolytic systems of lactic acid bacteria // *Antonie van Leeuwenhoek*. 1996. Vol. 70. P. 187–221. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00395933>.
- Laloi P., Atlan D., Blanc B., Gilbert C. [et al.]. Cell-wall-associated proteinase of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* CNRZ 397: Differential extraction, purification and properties of the enzyme // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1991. Vol. 36. P. 196–204. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00164419>.
- Liu Y., Nawazish H., Farid M. S., Abdul Qadoos K. [et al.]. Health-promoting effects of *Lactobacillus acidophilus* and its technological applications in fermented food products and beverages // *Fermentation*. 2024. Vol. 10, Iss. 8. Article number: 380. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation10080380>.
- Marshall V. M., Cole W. M. Threonine aldolase and alcohol dehydrogenase activities in *Lactobacillus bulgaricus* and *Lactobacillus acidophilus* and their contribution to flavour production in fermented milks // *Journal of Dairy Research*. 1983. Vol. 50, Iss. 3. P. 375–379. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0022029900023219>.

- Padghan P. V., Mann B., Hati S. Purification and characterization of antioxidative peptides derived from fermented milk (*Lassi*) by lactic cultures // *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*. 2018. Vol. 24. P. 235–249. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10989-017-9608-2>.
- Panchal G., Sakure A., Hati S. Peptidomic profiling of fermented goat milk: Considering the fermentation-time dependent proteolysis by *Lactobacillus* and characterization of novel peptides with antioxidative activity // *Journal of Food Science and Technology*. 2022. Vol. 59. P. 2295–2305. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05243-w>.
- Park J., Hirano J.-I., Thangavel V., Riebel B. [et al.]. NAD(P)H oxidase V from *Lactobacillus plantarum* (NoxV) displays enhanced operational stability even in absence of reducing agents // *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*. 2011. Vol. 71. P. 159–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2011.04.013>.
- Roux E., Nicolas A., Valence F., Siekaniec G. [et al.]. The genomic basis of the *Streptococcus thermophiles* health-promoting properties // *BMC Genomics*. 2022. Vol. 23. Article number: 210. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-022-08459-y>.
- Russo Krauss I., Merlino A., Pica A., Rullo R. [et al.]. Fine tuning of metal-specific activity in the Mn-like group of cambialistic superoxide dismutases // *RSC Advances*. 2015. N 5. P. 87876–87887. DOI: <https://doi.org/10.1039/c5ra13559a>.
- Sasaki M., Bosman B. W., Tan P. S. T. Comparison of proteolytic activities in various lactobacilli // *Journal of Dairy Research*. 1995. Vol. 62, Iss. 4. P. 601–610. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0022029900031332>.
- Savaiano D. A. Lactose digestion from yogurt: Mechanism and relevance // *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2014. Vol. 99, Iss. 5. P. 1251–1256. DOI: <https://doi.org/10.3945/ajcn.113.073023>.
- Savijoki K., Ingmer H., Varmanen P. Proteolytic systems of lactic acid bacteria // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2006. Vol. 71. P. 394–406. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0427-1>.
- Serata M., Yasuda E., Sako T. Effect of superoxide dismutase and manganese on superoxide tolerance in *Lactobacillus casei* strain Shirota and analysis of multiple manganese transporters // *Bioscience of Microbiota, Food and Health*. 2018. Vol. 37, Iss. 2. P. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.12938/bmfh.17-018>.
- Shuang Z., Yan Z., Meng L., Xue L. [et al.]. The effect of *Lactobacillus delbrueckii* subsp *bulgaricus* proteinase on properties of milk gel acidified with glucono- δ -lactone // *International Journal of Food Science and Technology*. 2019. Vol. 54, Iss. 6. P. 2094–2100. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14113>.
- Stratton J. E., Hutkins R. W., Taylor S. L. Biogenic amines in cheese and other fermented foods: A Review // *Journal of Food Protection*. 1991. № 54.1. P. 460–470. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028X-54.6.460>.
- Vasudha M., Prashantkumar C. S., Bellurkar M., Kaveeshwar V. [et al.]. Probiotic potential of β -galactosidase-producing lactic acid bacteria from fermented milk and their molecular characterization // *Biomed Rep*. 2023. Vol. 18, Iss. 3. P. 23. DOI: <https://doi.org/10.3892/br.2023.1605>. PMID: 36846619; PMCID: PMC9945298.
- Wang Y., Li H., Li T., He H. [et al.]. Cytoprotective effect of *Streptococcus thermophiles* against oxidative stress mediated by a novel peroxidase (EfeB) // *Journal of Dairy Science*. 2018. Vol. 101, Iss. 8. P. 6955–6963. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14601>.

References

- Begunova, A. V., Rozhkova, I. V., Shirshova, T. I., Krysanova, Yu. I. 2020. Antimicrobial properties of *Lactobacillus* in fermented dairy products. *Dairy Industry*, 6, pp. 22–23. DOI: <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-06-22-23>. EDN: CTAQTN. (In Russ.)
- Biryuk, E. N., Furik, N. N., Astashonok, M. M. 2013. Breeding isolates of starter cultures of lactococci and thermophilic streptococcus by enzymatic activity. Proceedings of the XVI Intern. scientific and practical conf. *Modern technologies of agricultural production*, Grodno, May 17, 2013. Grodno, pp. 7–9. EDN: JDHEAY. (In Russ.)
- Borovik, T. E., Ladodo, K. S., Zakharova, I. N., Roslavl'tseva, E. A. et al. 2014. Fermented dairy products in the diet of young children. *Current Pediatrics*, 13(1), pp. 89–95. EDN: RXPVPX. (In Russ.)
- Galochkina, N. A., Glotova, I. A., Tolkacheva, A. A. 2024. Thermophilic streptococcus: Technological functionality in food systems, metabolic products beneficial to health, and species identification. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*, 1, pp. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2024-1-44-50>. EDN: VXYMUV. (In Russ.)
- Donskaya, G. A. 2020. Antioxidant properties of milk and dairy products: An overview. *Food Industry*, 12, pp. 86–91. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10150>. EDN: XNCFER. (In Russ.)
- Zobkova, Z. S., Fursova, T. P., Zenina, D. V., Gavrilina, A. D. et al. 2019. Fermented milk products as a component of functional nutrition. *Dairy Industry*, 2, pp. 44–46. EDN: YYGBNJ. (In Russ.)
- Kolmakova, T. S., Belik, S. N., Chistyakov, V. A., Morgul, E. V. et al. 2014. Characteristics of kefir as a valuable probiotic product and its biological properties. *Medical Herald of the South of Russia*, 3, pp. 35–42. EDN: RGDCDF. (In Russ.)

- Semenikhina, V. F., Rozhkova, I. V., Kharitonov, V. D., Raskoshnaya, T. A. 2010. Consortium of microorganisms consisting of *Bifidobacterium bifidum* 791, *Bifidobacterium iongum* b-379m, *Lactobacillus acidophilus* NK-1, *Sterptococcus thermophilus* 132 strains used for the production of fermented dairy products, Russian Federation, Pat. 2454460. (In Russ.)
- Rozhkova, I. V. 2020. Kefir – probiotic. *Actual issues of the dairy industry, intersectoral technologies and quality management systems*, 1(1(1)), pp. 451–456. DOI: <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-451-456>. EDN: VRYYRS. (In Russ.)
- Semenikhina, V. F., Rozhkova, I. V., Begunova, A. V. 2009. Technological aspects of the use of bifidobacteria in the production of fermented dairy products. *Dairy Industry*, 12, pp. 9–11. EDN: KZQJTF. (In Russ.)
- Semenikhina, V. F., Rozhkova, I. V., Begunova, A. V., Fedorova, T. V. et al. 2018. Development of biotechnology of a fermented milk product with *Lactobacillus reuteri* LR1 and investigation of its functional properties in vivo and in vitro experiment. *Problems of Nutrition*, 87(5), pp. 52–62. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2018-10053>. EDN: YPMKRN. (In Russ.)
- Semenikhina, V. F., Rozhkova, I. V., Raskoshnaya, T. A., Begunova, A. V. et al. 2016. Development of bacterial concentrates with probiotic microorganisms and fermented milk products using them. In *Innovative technologies for fortification of dairy products (theory and practice)*, pp. 88–109. Moscow. EDN: WEHNMV. (In Russ.)
- Fedorova, T. V., Vasina, D. V., Begunova, A. V., Rozhkova, I. V. et al. 2018. Antagonistic activity of lactic acid bacteria *Lactobacillus* spp. concerning clinical isolates of *Klebsiella pneumonia*. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 54(3), pp. 264–276. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0555109918030054>. EDN: XOTZPV. (In Russ.)
- Chandra, P., Enespa Singh, R., Arora, P. K. 2020. Microbial lipases and their industrial applications: A comprehensive review. *Microbial Cell Factories*, 19. Article number: 169. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01428-8>.
- Collins, Y. F., McSweeney, P. L. H., Wilkinson, M. G. 2003. Lipolysis and free fatty acid catabolism in cheese: A review of current knowledge. *International Dairy Journal*, 13(11), pp. 841–866. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(03\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(03)00109-2).
- Cruz-Casas, D. E., Chávez-García, S. N., García-Flores, L. A., Martínez-Medina, G. A. et al. 2023. Bioactive peptides from fermented milk products. In *Foundations and Frontiers in Enzymology. Enzymes beyond Traditional Applications in Dairy Science and Technology*. Eds.: Y. S. Rajput, R. Sharma, pp. 289–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96010-6.00010-2>. (Chapter 10).
- Dayara Álvarez-Rosales, J., Ozuna, C., Salcedo-Hernández, R., Rodríguez-Hernández, G. 2020. Comparison of antioxidant activity of cow and goat milk during fermentation with *Lactobacillus acidophilus* LA-5. In *Prebiotics and Probiotics – Potential Benefits in Nutrition and Health*. Eds.: E. Franco-Robles, J. Ramírez-Emiliano. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.8821>.
- De Vendittis, A., Marco, S., Di Maro, A., Chambery, A. et al. 2012. Properties of a putative cambialistic superoxide dismutase from the aerotolerant bacterium *Streptococcus thermophilus* strain LMG 18311. *Protein & Peptide Letters*, 19(3), pp. 333–344. DOI: <https://doi.org/10.2174/092986612799363127>.
- Donkor, O. N., Henriksson, A., Vasiljevic, T., Shah, N. P. 2007. Proteolytic activity of dairy lactic acid bacteria and probiotics as determinant of growth and in vitro angiotensin – converting enzyme inhibitory activity in fermented milk. *Lait*, 87(1), pp. 21–38. DOI: <https://doi.org/10.1051/lait:2006023>.
- Evert, J. L., Oscar, P. K., Willem, M. V. 1998. Regulation of the carbohydrate metabolism in *Lactococcus lactis* and other lactic acid bacteria. *Lait*, 78, pp. 69–76. URL: https://lait.dairy-journal.org/articles/lait/abs/1998/01/lait_78_1998_1_9/lait_78_1998_1_9.html.
- Farhangi, M. A., Javid, A. Z., Dehghan, P. 2016. The effect of enriched chicory inulin on liver enzymes, calcium homeostasis and hematological parameters in patients with type 2 diabetes mellitus: A randomized placebo-controlled trial. *Primary Care Diabetes*, 10(4), pp. 265–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pcd.2015.10.009>.
- Feng, T., Wang, J. 2020. Oxidative stress tolerance and antioxidant capacity of lactic acid bacteria as probiotic: A systematic review. *Gut Microbes*, 12(1). Article number: 1801944. DOI: <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1801944>.
- Gottschalk, G. 1986. Bacterial metabolism. Springer New York, NY. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1072-6>. (Springer Series in Microbiology).
- Holzapfel, W. 2002. Appropriate starter culture technologies for small-scale fermentation in developing countries. *International Journal of Food Microbiology*, 75, pp. 197–212. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00707-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00707-3).
- Iyer, R., Tomar, S. K., Maheswari, T. U., Singh, R. 2010. *Streptococcus thermophilus* strains: Multifunctional lactic acid bacteria. *International Dairy Journal*, 20(3), pp. 133–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.10.005>.

- Jurášková, D., Ribeiro, S. C., Silva, C. C. G. 2022. Exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria: From biosynthesis to health-promoting properties. *Foods*, 11(2), pp. 156. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11020156>. PMID: 35053888; PMCID: PMC8774684.
- Kalantzopoulos, G., Tsakalidou, E., Manolopoulou, E. 1990. Proteinase, peptidase and esterase activities of cell-free extracts from wild strains of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* isolated from traditional Greek yogurt. *Journal of Dairy Research*, 57(4), pp. 593–601. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0022029900029642>.
- Kandler, O. 1983. Carbohydrate metabolism in lactic acid bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 49, pp. 209–224. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00399499>.
- Kong, L., Xiong, Z., Song, X., Xia, Y. et al. 2020. Enhanced antioxidant activity in *Streptococcus thermophilus* by high-level expression of superoxide dismutase. *Frontiers in Microbiology*, 11. Article number: 579804. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.579804>.
- Kunji, E. R. S., Mierau, I., Hagting, A., Poolman, B. et al. 1996. The proteolytic systems of lactic acid bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 70, pp. 187–221. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00395933>.
- Laloi, P., Atlan, D., Blanc, B., Gilbert, C. et al. 1991. Cell-wall-associated proteinase of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* CNRZ 397: Differential extraction, purification and properties of the enzyme. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 36, pp. 196–204. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00164419>.
- Liu, Y., Nawazish, H., Farid, M. S., Abdul Qadoos, K. et al. 2024. Health-promoting effects of *Lactobacillus acidophilus* and its technological applications in fermented food products and beverages. *Fermentation*, 10(8). Article number: 380. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation10080380>.
- Marshall, V. M., Cole, W. M. 1983. Threonine aldolase and alcohol dehydrogenase activities in *Lactobacillus bulgaricus* and *Lactobacillus acidophilus* and their contribution to flavour production in fermented milks. *Journal of Dairy Research*, 50(3), pp. 375–379. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0022029900023219>.
- Padghan, P. V., Mann, B., Hati, S. 2018. Purification and characterization of antioxidative peptides derived from fermented milk (*Lassi*) by lactic cultures. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 24, pp. 235–249. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10989-017-9608-2>.
- Panchal, G., Sakure, A., Hati, S. 2022. Peptidomic profiling of fermented goat milk: Considering the fermentation-time dependent proteolysis by *Lactobacillus* and characterization of novel peptides with antioxidative activity. *Journal of Food Science and Technology*, 59, pp. 2295–2305. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05243-w>.
- Park, J., Hirano, J.-I., Thangavel, V., Riebel, B. et al. 2011. NAD(P)H oxidase V from *Lactobacillus plantarum* (NoxV) displays enhanced operational stability even in absence of reducing agents. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 71, pp. 159–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2011.04.013>.
- Roux, E., Nicolas, A., Valence, F., Siekaniec, G. et al. 2022. The genomic basis of the *Streptococcus thermophilus* health-promoting properties. *BMC Genomics*, 23. Article number: 210. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-022-08459-y>.
- Russo Krauss, I., Merlino, A., Pica, A., Rullo, R. et al. 2015. Fine tuning of metal-specific activity in the Mn-like group of cambialistic superoxide dismutases. *RSC Advances*, 5, pp. 87876–87887. DOI: <https://doi.org/10.1039/c5ra13559a>.
- Sasaki, M., Bosman, B. W., Tan, P. S. T. 1995. Comparison of proteolytic activities in various lactobacilli. *Journal of Dairy Research*, 62(4), pp. 601–610. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0022029900031332>.
- Savaiano, D. A. 2014. Lactose digestion from yogurt: Mechanism and relevance. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 99(5), pp. 1251–1256. DOI: <https://doi.org/10.3945/ajcn.113.073023>.
- Savijoki, K., Ingmer, H., Varmanen, P. 2006. Proteolytic systems of lactic acid bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 71, pp. 394–406. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0427-1>.
- Serata, M., Yasuda, E., Sako, T. 2018. Effect of superoxide dismutase and manganese on superoxide tolerance in *Lactobacillus casei* strain Shirota and analysis of multiple manganese transporters. *Bioscience of Microbiota, Food and Health*, 37(2), pp. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.12938/bmfh.17-018>.
- Shuang, Z., Yan, Z., Meng, L., Xue, L. et al. 2019. The effect of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* proteinase on properties of milk gel acidified with glucono- δ -lactone. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(6), pp. 2094–2100. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14113>.
- Stratton, J. E., Hutkins, R. W., Taylor, S. L. 1991. Biogenic amines in cheese and other fermented foods: A Review. *Journal of Food Protection*, 54.1, pp. 460–470. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028X-54.6.460>.
- Vasudha, M., Prashantkumar, C. S., Bellurkar, M., Kaveeshwar, V. et al. 2023. Probiotic potential of β -galactosidase-producing lactic acid bacteria from fermented milk and their molecular characterization. *Biomed Rep.*, 18(3), pp. 23. DOI: <https://doi.org/10.3892/br.2023.1605>. PMID: 36846619; PMCID: PMC9945298.
- Wang, Y., Li, H., Li, T., He, H. et al. 2018. Cytoprotective effect of *Streptococcus thermophilus* against oxidative stress mediated by a novel peroxidase (EfeB). *Journal of Dairy Science*, 101(8), pp. 6955–6963. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14601>.

Сведения об авторах

Бычкова Татьяна Сергеевна – Люсиновская ул., 35/7, г. Москва, Россия, 115093;
Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, канд. техн. наук,
доцент; e-mail: t_bychkova@vnimi.org, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9539-1600>

Tatyana S. Bychkova – 35/7 Lyusinovskaya Str., Moscow, Russia, 115093;
All-Russian Dairy Research Institute, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: t_bychkova@vnimi.org, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9539-1600>

Крутина Екатерина Михайловна – Люсиновская ул., 35/7, г. Москва, Россия, 115093;
Всероссийской научно-исследовательский институт молочной промышленности, мл. науч. сотрудник;
e-mail: e_krutina@vnimi.org, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9066-2078>

Ekaterina M. Krutina – 35/7 Lyusinovskaya Str., Moscow, Russia, 115093;
All-Russian Dairy Research Institute, Junior Research Assistant;
e-mail: e_krutina@vnimi.org, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9066-2078>

Дягилева Юлия Алексеевна – Люсиновская ул., 35/7, г. Москва, Россия, 115093;
Всероссийской научно-исследовательский институт молочной промышленности, инженер;
e-mail: yu_diaghileva@vnimi.org, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8255-7702>

Yulia A. Diaghileva – 35/7 Lyusinovskaya Str., Moscow, Russia, 115093;
All-Russian Dairy Research Institute, Engineer;
e-mail: yu_diaghileva@vnimi.org, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8255-7702>

УДК 612.396.144

Перспективы использования инулина и его модификаций в пищевой, косметической и фармацевтической отраслях промышленности

А. С. Скородумов, Е. Д. Нестеров*, Д. С. Горн, А. В. Барканов, Е. Ф. Шаненко

*Общество с ограниченной ответственностью "Бавар+", Москва, Россия;
e-mail: eg0r.nesterov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3442-7024>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
03.04.2025;

принята
к публикации
28.04.2025

Ключевые слова:

инулин,
фруктоолигосахариды,
полисахариды,
реология,
загустители,
эмульгаторы,
топинамбур,
цикорий

Статья представляет собой обзор современных данных об использовании полисахарида инулина и его модификаций в различных отраслях промышленности. Приведены данные по использованию нативного инулина в различных пищевых технологиях. Показано его использование в производстве хлебобулочных изделий, злаковых продуктов, различных видов молочной продукции, в мясных и пищевкусовых продуктах. В данных категориях продуктов инулин используется в качестве стабилизатора, текстурообразователя, влагоудерживающего агента, эмульгатора и пребиотического компонента рецептуры. В хлебобулочных изделиях инулин положительно влияет на реологические свойства теста, увеличивает количество связанной влаги, понижает активность воды, замедляет процессы черствления, что позволяет увеличить сроки хранения готовой продукции. В злаковых продуктах и батончиках инулин активно используется при производстве пребиотических продуктов, поскольку выступает в качестве пищевого волокна. В молочных продуктах инулин позволяет снизить содержание жира, так как обладает способностью придавать сливочный вкус продуктам, улучшает реологические свойства молочных продуктов, в пребиотических молочных продуктах инулин улучшает состояние микробной культуры пробиотика. В мясных и пищевкусовых продуктах инулин увеличивает выход готовой продукции за счет влагоудерживающей способности, улучшает стабильность эмульсий и позволяет получать продукты с пониженной жирностью за счет частичной замены жиров в рецептурах. Показана перспектива использования инулина для получения модификаций с различными свойствами, таких как поперечно-сшитый инулин, гидрофобный инулин, эфиры инулина, циклоинулин. Приведено описание примеров модификаций инулина и возможности их применения в пищевой, косметической, фармакологической отраслях промышленности и в нанотехнологиях.

Для цитирования

Скородумов А. С. и др. Перспективы использования инулина и его модификаций в пищевой, косметической и фармацевтической отраслях промышленности. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 2. С. 312–324. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-312-324>.

Prospects for the use of inulin and its modifications in the food, cosmetic and pharmaceutical industries

Alexander S. Skorodumov, Egor D. Nesterov*, Dmitry S. Gorn,
Alexander V. Barkanov, Elena F. Shanenko

Limited Liability Company "Bavar+", Moscow, Russia;
e-mail: eg0r.nesterov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3442-7024>

Article info

Received
03.04.2025;

accepted
28.04.2025

Key words:

inulin,
fructooligosaccharides,
polysaccharides,
rheology,
thickeners,
emulsifiers,
Jerusalem artichoke,
chicory

Abstract

The paper contains a review of modern data on the use of the polysaccharide inulin and its modifications in various industries. Data on the use of native inulin in various food technologies have been presented. Its use in the production of bakery products, cereal products, various types of dairy products, meat and flavoring products has been shown. In these product categories, inulin is used as a stabilizer, texturizer, water-retaining agent, emulsifier and prebiotic component of the recipe. In bakery products, inulin has a positive effect on the rheological properties of the dough, increases the amount of bound moisture, reduces water activity, slows down the staling process, which allows to increase the shelf life of finished products. In cereal products and bars, inulin is actively used in the production of prebiotic products, since it acts as a dietary fiber. In dairy products, inulin allows to reduce fat content, since it has the ability to impart a creamy taste to products, improves the rheological properties of dairy products, in prebiotic dairy products, inulin improves the state of the probiotic microbial culture. In meat and flavoring products, inulin increases the yield of finished products due to the water-holding capacity, improves the stability of emulsions and allows to obtain products with reduced fat content due to partial replacement of fats in recipes. The prospect of using inulin to obtain modifications with various properties, such as cross-linked inulin, hydrophobic inulin, inulin esters, and cycloinulin has been shown. A description of examples of inulin modifications and the possibility of their application in the food, cosmetic, pharmacological industries and in nanotechnology has been given.

For citation

Skorodumov, A. S. et al. 2025. Prospects for the use of inulin and its modifications in the food, cosmetic and pharmaceutical industries. *Vestnik of MSTU*, 28(2), pp. 312–324. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-312-324>.

Введение

Инулин – полисахарид с относительно низкой степенью полимеризации, водорастворимый, состоящий из остатков фруктозы. Интерес к инулину возник в последние десятилетия в связи с его пребиотическими свойствами. Многочисленные исследования показали, что инулин не расщепляется пищеварительными ферментами, но ферментируется микробиотой кишечника, и образующиеся при ферментации метаболиты нормализуют состав микробного сообщества и благотворно влияют на метаболические процессы организма человека в целом. Развитие технологий инулина в течение длительного периода тормозилось отсутствием сырьевой базы, однако в последние годы в России и за рубежом растения инулиноносы – топинамбур и цикорий – стали возделывать как сельскохозяйственные культуры. Производство препаратов инулина из цикория и топинамбура привело к расширению направлений исследований этого полисахарида, и в результате был выявлен целый ряд новых технологических свойств. Показана способность инулина придавать обезжиренным продуктам сливочный вкус, способность к гелеобразованию позволила использовать его для улучшения реологических свойств продуктов питания. Благодаря своей структуре инулин может быть модифицирован аналогично другим гидроколлоидами (крахмал, пектин, целлюлоза), что позволяет получать его модификации с различными физико-химическими и технологическими свойствами.

Цель обзора – обобщение сведений об использовании инулина и его модификаций в пищевой, косметической, фармацевтической отраслях промышленности.

Материалы и методы

Полисахарид инулин является легкогидролизуемым полисахаридом и при гидролизе дает фруктоолигосахариды (ФОС), обладающие пребиотической активностью и являющиеся бифидофакторами. Молекула инулина благодаря многочисленным гидроксильным группам в щелочной среде легко протонируется и способна образовывать через эфирные связи с карбоксильными группами различных лигандов сложные структуры. Свойства образующихся соединений зависят от природы лиганда и условий проведения реакции модификации.

Результаты и обсуждение

Инулин – линейный полисахарид, состоящий из остатков фруктозы, соединенных $\beta(2-1)$ гликозидными связями, является нередуцирующим углеводом, поскольку на конце молекулы находится глюкоза, присоединенная связью $\beta(2-1)$ (рис. 1). Степень полимеризации инулина варьируется в широких пределах – от 10 до 60 фруктозных остатков и зависит от стадии вегетации и вида растения. Основные источники инулина – топинамбур, цикорий, агава, девясил, одуванчик, лопух, батат, георгины, чеснок, артишок и другие растения.

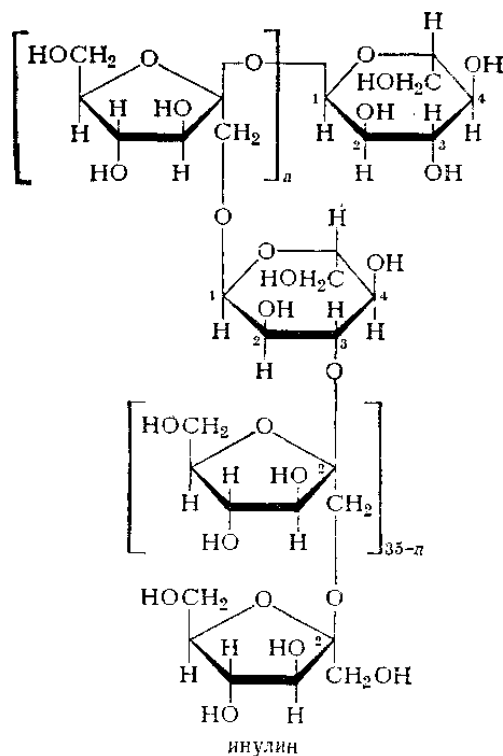


Рис. 1. Структурная формула инулина
Fig. 1. Structural formula of inulin

Инулин накапливается в растениях – инулиноносцах (Lunawat et al., 2025; Zhang et al., 2024b). Он выполняет в основном резервную функцию, а также криопротекторную и аналогично пектину может участвовать в транспорте ионов металлов.

Промышленным способом инулин получают, используя в качестве сырья в основном топинамбур и цикорий (Badawy et al., 2023; Diaz et al., 2022; Kardamanidis et al., 2024; Sağcan et al., 2024). Основные сферы применения инулина – это пищевая промышленность и производство биологически активных добавок (Khetu et al., 2023; Mohammadi et al., 2023; Du et al., 2023). Промышленно получаемый инулин представляет собой смесь полифруктанов с различной степенью полимеризации. В основном на рынке инулин представлен полисахаридами со средней степенью полимеризации 10–23, также можно выделить высокомолекулярный инулин со степенью полимеризации свыше 23 остатков фруктозы (Hamdi et al., 2022; Melilli, 2024). В качестве БАД инулин используется благодаря своим пребиотическим свойствам. Он не расщепляется ферментами желудочно-кишечного тракта, но согласно многочисленным исследованиям полностью ферментируется микробиотой кишечника. Инулин является источником фруктоолигосахаридов, стимулирующих рост бифидобактерий, поэтому инулин используется для нормализации микроэкологии кишечника (Hughes et al., 2022; Qin et al., 2023; De Giani et al., 2022; Tao et al., 2021; Teferra, 2021).

В пищевой промышленности инулин используется в качестве загустителя, влагоудерживающего агента, текстурообразователя и заменителя жира в продуктах с пониженной жирностью (Liang et al., 2024; Shams et al., 2021; Deylaghian et al., 2024; Mishra et al., 2025). Инулин находит широкое применение в молочной промышленности, поскольку помимо текстуры он придает продукту сливочный вкус. Инулин используют при приготовлении молочных десертов, мороженого, ферментированных молочных продуктов, кефира, айрана, йогуртов, сыров и т. д. Следует отметить, что использование инулина в ферментированных продуктах позволяет не только снизить их жирность и улучшить органолептические характеристики, но и продлить срок хранения за счет повышения выживаемости пробиотических микроорганизмов.

В мучных изделиях инулин повышает влагоудерживающую способность, замедляя тем самым процесс черствения, увеличивает объем изделий, улучшает текстуру и реологические характеристики теста.

Использование инулина в рецептурах зерновых злаковых хлопьев, снековых батончиков позволяет в течение длительного времени сохранять текстуру и хрусткость при размачивании в жидкости (молоке), а также придает им пребиотические свойства.

В технологии мясных полуфабрикатов инулин используется для повышения влагоудерживающей способности изделий и повышения органолептических характеристик изделий с пониженным содержанием жира.

Инулин также находит применение на предприятиях общественного питания, где его используют в качестве загустителя и эмульгатора при получении соусов и десертов.

Примеры использования инулина в пищевых технологиях представлены в таблице.

Таблица. Использование инулина в пищевой промышленности
Table. Use of inulin in the food industry

Область применения	Вид продукции	Эффект от применения инулина	Ссылка на источник
Мучные изделия	Хлеб	Улучшение реологических свойств	Mohammadi et al., 2023
	Замороженное тесто	Улучшение структуры замороженной воды, улучшение реологии полуфабрикатов после дефростации	Peng et al., 2024
	Безглютеновое тесто	Улучшение реологических свойств теста	Juszczak et al., 2012
	Мягкое и крепкое пшеничное тесто	Улучшение механических свойств клейковины, улучшение стойкости к замешиванию мягкого теста, уменьшение растяжимости теста, повышение газоудерживающей способности теста	Juszczak et al., 2012
	Рисовое тесто и хлеб	Увеличение удельного объема батона, смягчение панировочных сухарей, увеличение пористости мякиша, улучшение структуры мякиша	Burešová et al., 2024
	Слойки с пониженным содержанием жира	Внесение инулина в комбинации с концентратом сывороточного белка позволило снизить калорийность изделий и увеличить содержание пищевых волокон и белка	Onsri et al., 2022

Злаковая продукция и батончики	Злаковые продукты	Формирование гелей с белком	<i>Nieto-Nieto et al., 2015</i>
		Проявление пребиотической активности продуктов	<i>Melilli et al., 2024</i>
	Пребиотический батончик	Проявление пребиотической активности у полученных батончиков	<i>Reimer et al., 2020</i>
Молочная продукция	Обезжиренный йогурт	Улучшение физико-химических показателей продуктов	<i>El-Khair et al., 2024</i>
	Йогурт	Улучшение органолептических характеристик йогуртов	<i>Fikriyah et al., 2024</i>
	Синбиотический йогурт	Улучшение органолептических характеристик	<i>Jora et al., 2021</i>
	Низкожирный сыр Чеддер	Плавкость и текучесть снижались с повышением уровня и увеличением твердости, проявлялась способность стабилизировать структуру водной фазы, что создает улучшенную кремообразность	<i>Murtaza et al., 2022</i>
	Мягкий сыр	Сохранение органолептических характеристик во время хранения, стимуляция роста микробиоты сыра	<i>Melilli et al., 2021</i>
	Низкожирный пробиотический сыр Тулум	Добавление инулина усиливало рост и жизнеспособность пробиотических бактерий	<i>Albay, 2022</i>
	Синбиотическое мороженое	Добавление инулина приводило к заметному увеличению взбитости, вязкости и твердости составов, скорость плавления и дестабилизация жира были снижены в образцах, обогащенных инулином	<i>Falah et al., 2021</i>
	Мороженое с пониженной жирностью	Улучшение реологических характеристик мороженого, улучшение формирования жировых частиц, снижение скорости таяния и улучшение хранения в замороженном виде, повышение стабильности продукта при хранении в замороженном виде, улучшение органолептических характеристик мороженого	<i>El-Safety et al., 2021</i>
	Функциональное мороженое с пониженной жирностью	Уменьшение скорости таяния, увеличение процента вздутия, улучшение органолептических показателей	<i>El-Safety et al., 2021</i>
	Веганское мороженое	Благодаря внесению инулина удалось снизить количество вносимого растительного жира	<i>Narala et al., 2022</i>
Мясная продукция	Фарш с пониженным содержанием жира	Уменьшение оттока жира из эмульсии, улучшение консистенции	<i>López et al., 2022</i>
	Ветчина с пониженным содержанием соли и жира	Снижение содержания жира в рецептуре	<i>Darlan Leal de Araujo et al., 2022</i>
	Куриные колбасы болонского типа	Улучшение реологических свойств куриных колбас, формирование рецептур с повышенной биологической активностью	<i>Ferjančič et al., 2021</i>
	Нежирные колбасы из мяса утки	Снижение содержания жира с улучшением органолептических характеристик	<i>Moirangthem et al., 2022</i>
	Ферментированные колбасы, обогащенные ПНЖК	Снижение содержания жира без ухудшения органолептических характеристик, стабилизация полиненасыщенных жирных кислот	<i>Glišić et al., 2019</i>

Соусовая продукция	Белый соус с низким содержанием жира, глютена и лактозы	Улучшение диффузионной способности соевого белка, снижение вязкости соусов	<i>Guardeño Expósito et al., 2013</i>
	Горчичный соус с пониженным содержанием жира	Улучшение влагоудерживающей способности, активности воды, снижение содержания жира без потери органолептических характеристик	<i>Hosseinvand, et al., 2016</i>
	Майонез с пониженным содержанием жира	Снижение содержания масла и яичного желтка без потери органолептических характеристик	<i>Canuto et al., 2024</i>
	Обезжиренный майонез	Улучшение реологических и органолептических характеристик	<i>Alimi et al., 2013</i>

Таким образом, приведенные данные показывают, что инулин находит широкое применение в различных отраслях пищевой промышленности.

Несмотря на кажущуюся инертность полисахаридов, они являются весьма пластичными соединениями и легко вступают в реакции с биополимерами, растительными метаболитами, белками, липидами, что позволяет получать широкий спектр новых веществ с улучшенными технологическими свойствами (*Chang et al., 2025; Vereyken et al., 2003; Rahnema et al., 2021; Li et al., 2021*). Эта способность полисахаридов позволяет модифицировать их молекулы, получая производные с различными свойствами. Широкое применение в пищевой промышленности находят производные крахмала, пектина и целлюлозы (*Wang et al., 2020; Xie et al., 2005; Yazid et al., 2018; Singhal et al., 2022; Ishwarya et al., 2021; Rahnema et al., 2021*). Пектин и его модификации используются в качестве загустителей, гелеобразователей, эмульгаторов (*Singhal et al., 2022; Song et al., 2024; Chen et al., 2015; Würfel et al., 2021; Freitas et al., 2021; Fan et al., 2024*). Крахмал и его модификации также используются в качестве загустителей и гелеобразователей, влагоудерживающих агентов и текстурообразователей в кондитерской, молочной промышленности, в мясных продуктах, полуфабрикатах, детском питании, продуктах длительного хранения, соусах, пищевкусных продуктах (*Chakraborty et al., 2022; Chen et al., 2024; Lagunes-Delgado et al., 2024; Saedi et al., 2021; Jiang et al., 2022*). Целлюлоза и ее гидрофильные модификации используются в качестве текстурообразователей, структурообразователей, загустителей, заменителей жира, стабилизаторов эмульсий в продуктах с пониженным содержанием жира в молочных, мясных, кондитерских продуктах, напитках, улучшают стабильность эмульсий (*Gibis et al., 2015; Himashree et al., 2022*).

Модификацию полисахаридов проводят с целью придания им заданных технологических свойств, модификации пектина увеличивают его способность к гелеобразованию, улучшают желирующие свойства и способствуют загущению джемов, также полимеры на основе пектина используются для инкапсулирования биологически активных веществ и микроорганизмов (*Cui et al., 2023; Wang et al., 2022; Sun et al., 2021; Islam et al., 2022; Wu et al., 2022*). Многочисленные модификации крахмала позволили получить более ста модификаций и значительно расширить спектр его применения. На примере крахмала можно наблюдать, что основные модификации направлены на изменение структуры и молекулярной массы, как в случае со "сшитым" крахмалом, изменение и введение функциональных группировок, таких как метильные, ацетильные, эфирные, придают ему амфифильные и гидрофобные свойства за счет получения эфиров с жирными кислотами, получение циклических форм позволяет использовать их в качестве носителя биологически активных веществ в нанотехнологии, пищевой, косметической и фармацевтической отраслях промышленности (*Mi et al., 2022; Liu et al., 2023; Zhang et al., 2023; Xu et al., 2025; Punia et al., 2024; Verma et al., 2021*).

При модификации крахмала используют реакции окисления, фосфорилирования, катионизации, также имеет место модификация с участием ангидридов. Эти способы применимы и к инулину, однако до настоящего времени модифицированный инулин практически не выпускался и не использовался в пищевой промышленности. Из литературных источников известно о широком перечне возможных к получению модификаций инулина, при этом данные модификации практически отсутствуют на рынке. Одной из возможных причин этого является небольшой объем выпуска инулина в мире и низкая его популярность до недавнего времени. На сегодняшний день растущая в России сырьевая база позволяет считать инулин перспективным сырьем для пищевой промышленности, что дает возможность расширить выпуск функциональных продуктов питания. Известны такие вариации модифицированного инулина, используемые в пищевой, косметической и фармацевтической отраслях промышленности, как поперечно-сшитый инулин, эфиры инулина, гидрофобный инулин, циклоинулин, но в настоящее время в нашей стране производство инулина и его модификаций отсутствует. На рынке существует преимущественно продукция в виде сухих порошков и сиропов растительного сырья с высоким содержанием инулина.

Модификация инулина проводится аналогично модификации других полисахаридов. Так, например, модификацию инулина, известную как поперечно-сшитый инулин, получают путем проведения реакции между нативным инулином и гексаметафосфатом натрия, в результате реакции образуются эфирные

связи между фосфатом и молекулами инулина, что приводит к получению полимера с более высокой молекулярной массой (рис. 2). Основные компоненты данной модификации являются пищевыми ингредиентами и признаны абсолютно безопасными. В результате сшивки образующийся высокомолекулярный инулин приобретает способность формировать более устойчивые гели по сравнению с нативным инулином, что делает его более перспективным при производстве молочных продуктов с повышенной вязкостью и сниженным содержанием жира, мучных изделий с улучшенными реологическими свойствами и пребиотических продуктов (Tang et al., 2024; Zhao et al., 2023; Zhang et al., 2024a; Chen et al., 2024; Pei et al., 2024; Akal, 2023; Li et al., 2019).

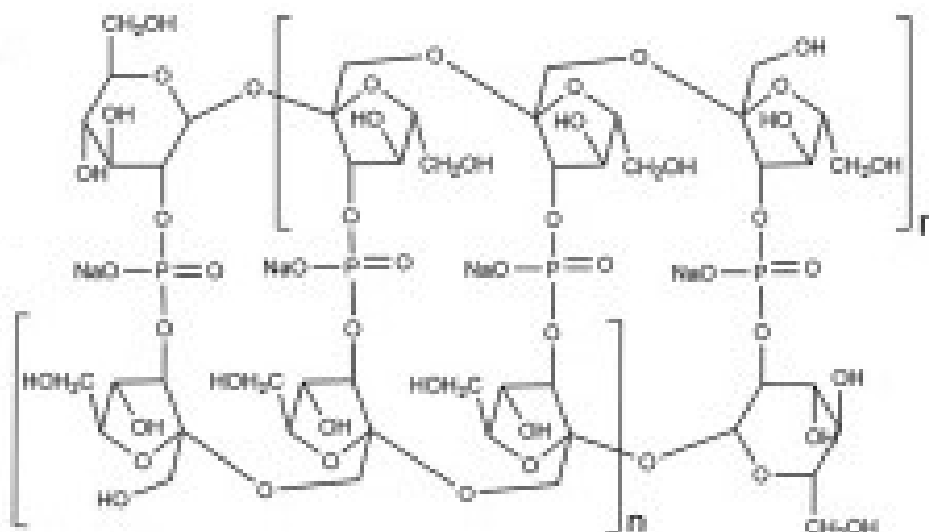


Рис. 2. Структура поперечно-сшитого инулина (Li et al., 2019)
Fig. 2. Structure of cross-linked inulin (Li et al., 2019)

Одним из перспективных направлений в модификации полисахаридов, в том числе инулина, является получение гидрофобных или амфифильных соединений, что обусловлено популяризацией "зеленых" пищевых эмульгаторов и замены на натуральные и частично натуральные. Многочисленные модификации гидрофобного инулина находят применение в качестве эмульгаторов в пищевой, косметической и фармацевтической отраслях промышленности. Гидрофобно модифицированный инулин применяется для инкапсулирования биологически активных веществ в косметической промышленности и фармакологии (рис. 3) (Exerowa et al., 2009; Han et al., 2020; Kokubun et al., 2018; Morros et al., 2010; Muley et al., 2016; Kesharwani et al., 2019; Han et al., 2022).

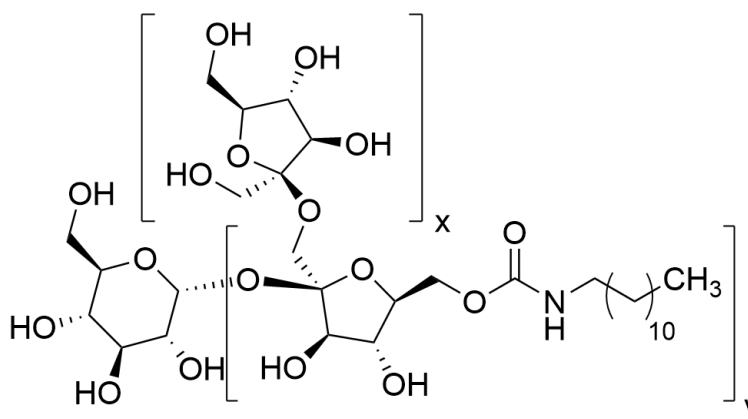


Рис. 3. Структурная формула инулин лаурил карбамата
Fig. 3. Structural formula of inulin lauryl carbamate

Получение циклических форм полисахаридов также является одним из перспективных направлений. Циклодекстрины, получаемые из крахмала, широко используются в нанотехнологии для инкапсулирования и доставки лекарственных препаратов, используются в качестве сорбентов, косметических средств. Однако для циклизации может быть использован не только крахмал, но и инулин, поскольку инулодекстрины обладают близкой к декстринам крахмала структурой. В последние годы появились данные о получении

и использовании циклоинулина в качестве сорбента для жидкостной и газовой хроматографии и пребиотической добавки в функциональном питании (рис. 4) (Liu et al., 2021; Li et al., 2024; Santos et al., 2022; Ishikawa et al., 2009).

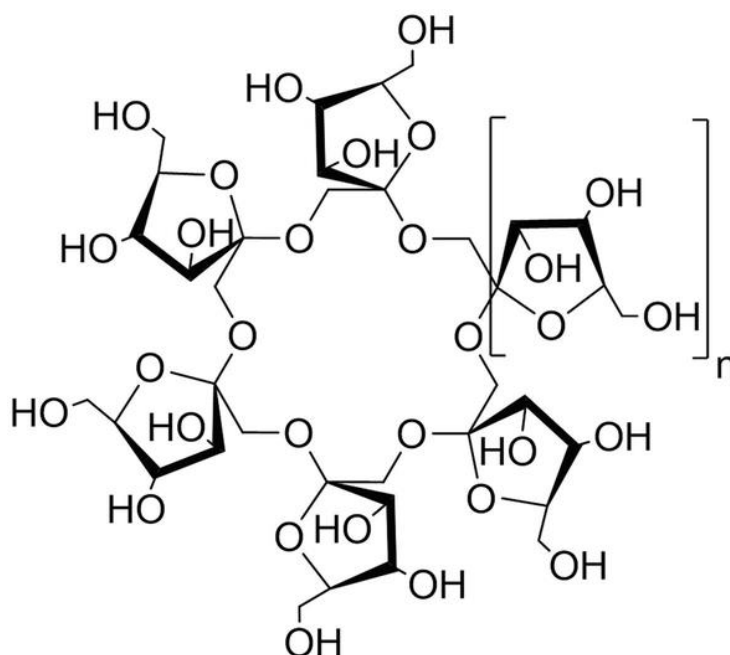


Рис. 4. Структурная формула циклофруктана (Li et al., 2024)

Fig. 4. Structural formula of cyclofructan (Li et al., 2024)

В отличие от крахмала, пектина или целлюлозы, преимуществом инулина является его способность к нормализации микроэкологии желудочно-кишечного тракта за счет того, что инулин выступает пребиотиком и не расщепляется пищеварительными ферментами человека, что обеспечивает ему низкий гликемический индекс.

Заключение

Таким образом, приведенные данные показывают большой потенциал применения инулина и его модификаций в различных сферах народного хозяйства. В настоящее время использование модифицированных форм инулина ограничено практически полным отсутствием их промышленного выпуска. Разработка и реализация технологий различных модификаций инулина позволит получить дополнительный инструмент при производстве пищевых продуктов и косметических средств, создании технологий инкапсулированных биологических активных веществ и фармацевтических препаратов. В целом, развитие технологий инулина и его модификаций позволит значительно расширить возможности производителей инновационной продукции.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

References

- Akal, C. 2023. Rheological properties of cross-linked inulin solutions as a function of cross-linker concentration and temperature. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 44(12), pp. 2219–2230. DOI: <https://doi.org/10.1080/01932691.2023.2225578>.
- Albay, Z., Şimşek, B. 2022. The effect of inulin addition on probiotic bacteria viability and volatile components in low fat probiotic Tulum cheese. *Mljekarstvo*, 72(4), pp. 237–249. DOI: <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2022.0405>.
- Alimi, M., Mizani, M., Naderi, G., Mortazavian, A. et al. 2013. Development of low-fat mayonnaise containing combined mixtures of different types of inulin. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 11(1), pp. 99–104.
- Badawy, W. Z., Bakr, E., Mohamed, A. 2023. Improvement of chips quality using Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) tuber as a source of inulin. *Journal of Sustainable Agricultural Sciences*, 49(3), pp. 31–39. DOI: 10.21608/jsas.2023.210484.1412.
- Burešová, I., Šebestíková, R., Šebela, J., Adámková, A. et al. 2024. The effect of inulin addition on rice dough and bread characteristics. *Applied Sciences*, 14(7). Article number: 2882. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14072882>.

- Canuto, J. M. P., Batista, R. A., Meza, S. L. R., Sinnecker, J. P. et al. 2024. Effects of adding inulin and chia mucilage in the production of mayonnaise with reduced fat and cholesterol: Technological, nutritional, and sensory aspects. *Observatório de La Economía Latinoamericana*, 22(2), pp. e3246. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n2-101>.
- Chakraborty, I., Pooja, N., Mal, S. S., Paul, U. C. et al. 2022. An insight into the gelatinization properties influencing the modified starches used in food industry: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 15, pp. 1195–1223. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02761-z>.
- Chang, Y., Lin, T., Zhu, M., Yu, S. 2025. Complexation of inulin with proteins, polysaccharides and polyphenols: Their interactions, applications and health benefits. *Food Reviews International*, pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2025.2456544>.
- Chen, J., Liu, W., Liu, C. M., Li, T. et al. 2015. Pectin modifications: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(12), pp. 1684–1698. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.718722>.
- Chen, K., Wei, P., Jia, M., Wang, L. et al. 2024a. Research progress in modifications, bioactivities, and applications of medicine and food homologous plant starch. *Foods*, 13(4). Article number: 558. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13040558>.
- Chen, Q., Luo, D., Yue, C., Bai, Z. et al. 2024b. Effect of phosphorylated modification on natural inulin: structural characterisation and gel properties. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(12), pp. 9020–9028. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.17434>.
- Cui, Y., Chen, J., Zhang, S. 2023. The effect of degree of esterification of pectin on the interaction between pectin and wheat gluten protein. *Food Hydrocolloids*, 136, Part A. Article number: 108272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108272>.
- Darlan Leal de Araujo, C., Freire da Costa, G., Luiz Nunes de Oliveira, F., Alves Azeredo de Oliveira, G. 2022. Physico-chemical and microbiological quality of sausages with reduced fat and sodium chloride formulated with inulin and oregano essential oil. *Journal of Culinary Science & Technology*, 22(6), pp. 1315–1326. DOI: <https://doi.org/10.1080/15428052.2022.2131671>.
- De Giani, A., Sandionigi, A., Zampolli, J., Michelotti, A. et al. 2022. Effects of inulin-based prebiotics alone or in combination with probiotics on human gut microbiota and markers of immune system: A randomized, double-blind, placebo-controlled study in healthy subjects. *Microorganisms*, 10(6). Article number: 1256. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061256>.
- Deylaghian, S., Nikoosaei, E., Habibagahi, G., Nagel, T. 2024. Inulin biopolymer as a novel material for sustainable soil stabilization. *Scientific Reports*, 14. Article number: 31078. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82289-8>.
- Díaz, A., García, M. A., Dini, C. 2022. Jerusalem artichoke flour as food ingredient and as source of fructooligosaccharides and inulin. *Journal of Food Composition and Analysis*, 114. Article number: 104863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104863>.
- Du, M., Cheng, X., Qian, L., Huo, A. et al. 2023. Extraction, physicochemical properties, functional activities and applications of inulin polysaccharide: A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78, pp. 243–252. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01066-6>.
- El-Khair, A. A. A., Ahmah, A. G., Abdalla, A. A. 2024. Physicochemical, rheological and microbiological characteristics of fat-free yoghurt enriched with inulin and various milk protein sources. *Egyptian Journal of Food Science*, 52(1), pp. 93–105. DOI: <https://doi.org/10.21608/ejfs.2024.297075.1187>.
- El-Safety, M. S., Khalil, R. A. M., Aly, H. A., Mohamed Shimaa, S. 2021. Functional low fat ice cream with using inulin or β -glucan. *Egyptian Journal of Dairy Science*, 49(2), pp. 83. DOI: <https://doi.org/10.21608/ejds.2021.253541>.
- Exerowa, D., Gotchev, G., Kolarov, T., Kristov, Khr. et al. 2009. Oil-in-water emulsion films stabilized by polymeric surfactants based on inulin with different degree of hydrophobic modification. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 334(1–3), pp. 87–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.10.003>.
- Falah, F., Zareie, Z., Vasiee, A., Yazdi, F. T. et al. 2021. Production of synbiotic ice-creams with *Lactobacillus brevis* PML1 and inulin: Functional characteristics, probiotic viability, and sensory properties. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, pp. 5537–5546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01119-x>.
- Fan, J., Li, Y., Yao, Y., Wang, L. et al. 2024. Tailoring the high-protein texture-modified foods for the dysphagia elderly by heating whey protein isolate-pectin complexes. *Food Hydrocolloids*, 154. Article number: 110070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110070>.
- Ferjančič, B., Kugler, S., Korošec, M., Polak, T. et al. 2021. Development of low-fat chicken bologna sausages enriched with inulin, oat fibre or psyllium. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(4), pp. 1818–1828. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14808>.
- Fikriyah, H., Habibi, N., Ismanilda, I., Darmingsih, S. et al. 2024. Pengaruh penambahan inulin terhadap mutu sensorik, kandungan serat dan daya terima yoghurt. *Jurnal Sehat Mandiri*, 19(1), pp. 369–379. DOI: <https://doi.org/10.33761/jsm.v19i1.1389>.

- Freitas, C. M. P., Coimbra, J. S. R., Souza, V. G.L., Sousa, R. C. S. 2021. Structure and applications of pectin in food, biomedical, and pharmaceutical industry: A review. *Coatings*, 11(8). Article number: 922. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11080922>.
- Gibis, M., Schuh, V., Weiss, J. 2015. Effects of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) as fat replacers on the microstructure and sensory characteristics of fried beef patties. *Food Hydrocolloids*, 45, pp. 236–246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.021>.
- Glisic, M., Baltic, M., Glisic, M., Trbovic, D. et al. 2019. Inulin-based emulsion-filled gel as a fat replacer in prebiotic- and PUFA-enriched dry fermented sausages. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(3), pp. 787–797. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13996>.
- Guardaño, L. M., Vázquez-Gutiérrez, J. L., Hernando, I., Quiles, A. 2013. Effect of different rice starches, inulin, and soy protein on microstructural, physical, and sensory properties of low-fat, gluten, and lactose free white sauces. *Czech Journal of Food Sciences*, 31(6), pp. 575–580. DOI: <https://doi.org/10.17221/483/2012-cjfs>.
- Hamdi, A., Viera-Alcaide, I., Guillén-Bejarano, R., Rodríguez-Arcos, R. et al. 2023. Asparagus fructans as emerging prebiotics. *Foods*, 12(1). Article number: 81. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12010081>.
- Han, L., Hu, B., Ratcliffe, I., Senan, C. et al. 2020. Octenyl-succinylated inulin for the encapsulation and release of hydrophobic compounds. *Carbohydrate Polymers*, 238. Article number: 116199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116199>.
- Han, L., Sun, J., Williams, P. A., Yang, J. et al. 2022. Octenyl-succinylated inulins for the delivery of hydrophobic drug. *International Journal of Biological Macromolecules*, 221, pp. 1112–1120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.068>.
- Himashree, P., Sengar, A. S., Sunil, C. K. 2022. Food thickening agents: Sources, chemistry, properties and applications – A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 27. Article number: 100468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100468>.
- Hosseinvand, A., Sohrabvandi, S. 2016. Physicochemical, textural and sensory evaluation of reduced-fat mustard sauce formulation prepared with Inulin, Pectin and β -glucan. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 8(2), pp. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.17508/cjfst.2016.8.2.01>.
- Hughes, R. L., Alvarado, D. A., Swanson, K. S., Holscher, H. D. 2022. The prebiotic potential of inulin-type fructans: A systematic review. *Advances in Nutrition*, 13(2), pp. 492–529. DOI: <https://doi.org/10.1093/advances/nmab119>.
- Ishikawa, T., Nanjo, F. 2009. Dietary cycloinulooligosaccharides enhance intestinal immunoglobulin a production in mice. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 73(3), pp. 677–682. DOI: <https://doi.org/10.1271/bbb.80733>.
- Ishwarya, S. P., Sandhya, S., Nisha, P. 2021. Advances and prospects in the food applications of pectin hydrogels. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(16), pp. 4393–4417. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1875394>.
- Islam, F., Wong, S. Y., Li, X., Arafat, M. T. 2022. Pectin and mucin modified cellulose-based superabsorbent hydrogel for controlled curcumin release. *Cellulose*, 29, pp. 5207–5222. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04600-y>.
- Jiang, Z., Ngai, T. 2022. Recent advances in chemically modified cellulose and its derivatives for food packaging applications: A review. *Polymers*, 14(8). Article number: 1533. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14081533>.
- Jora, F., Azhar, M., Nasra, E. 2021. Pengaruh penambahan prebiotik inulin dari bengkoang (*Pachyrhizus erosus*) terhadap organoleptik sinbiotik set yoghurt. *Periodic*, 10(1), pp. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.24036/p.v10i1.110315>.
- Juszczak, L., Witczak, T., Ziobro, R., Korus, J. et al. 2012. Effect of inulin on rheological and thermal properties of gluten-free dough. *Carbohydrate Polymers*, 90(1), pp. 353–360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.04.071>.
- Kardamanidis, A., Misailidis, N., Da Gama Ferreira, R., Petrides, D. 2024. Inulin production from chicory roots. process modeling and cost analysis using SuperPro designer. URL: https://www.researchgate.net/publication/378141057_Inulin_Production_from_Chicory_Roots_-_Process_Modeling_and_Techno-Economic_Assessment_TEA_using_SuperPro_Designer?channel=doi&linkId=65c9431334bbff5ba7fe2e66&showFulltext=true.
- Kesharwani, S. S., Dachineni, R., Jayarama Bhat, G., Tummala, H. 2019. Hydrophobically modified inulin-based micelles: Transport mechanisms and drug delivery applications for breast cancer. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 54. Article number: 101254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.101254>.
- Kheto, A., Bist, Y., Awana, A., Kaur, S. et al. 2023. Utilization of inulin as a functional ingredient in food: Processing, physicochemical characteristics, food applications, and future research directions. *Food Chemistry Advances*, 3. Article number: 100443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100443>.

- Kokubun, S., Ratcliffe, I., Williams, P. A. 2018. The interfacial, emulsification and encapsulation properties of hydrophobically modified inulin. *Carbohydrate Polymers*, 194, pp. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.018>.
- Lagunes-Delgado, C., Agama-Acevedo, E., Bello-Pérez, L. A. 2024. Dual starch modifications to expand its end-uses: A review. *Starch-Stärke*, 76(11–12). Article number: 2300153. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.202300153>.
- Li, S., Lei, D., Zhu, Z., Cai, J. et al. 2021. Complexation of maltodextrin-based inulin and green tea polyphenols via different ultrasonic pretreatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 74. Article number: 105568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105568>.
- Li, Y., Liu, F., Abdiryim, T., Liu, X. 2024. Cyclodextrin-derived materials: From design to promising applications in water treatment. *Coordination Chemistry Reviews*, 502. Article number: 215613. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.21>.
- Li, Y., Ma, X., Liu, X. 2019a. Physicochemical and rheological properties of cross-linked inulin with different degree of polymerization. *Food Hydrocolloids*, 95, pp. 318–325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.026>.
- Li, Y., Shabani, K. I., Qin, X., Yang, R. et al. 2019b. Effects of cross-linked inulin with different polymerisation degrees on physicochemical and sensory properties of set-style yoghurt. *International Dairy Journal*, 94, pp. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.02.009>.
- Liang, X., Lin, D., Zhang, W., Chen, S. et al. 2024. Progress in the preparation and application of inulin-based hydrogels. *Polymers*, 16(11). Article number: 1492. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16111492>.
- Liu, X. L., Xu, S. Y., Yang, J., Li, S. J. et al. 2023. Synthesis and characterization of glyceryl starch and determination of molar substitution. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 28(4), pp. 396–406. DOI: <https://doi.org/10.1080/1023666X.2023.2221873>.
- Liu, Z., Ye, L., Xi, J., Wang, J. et al. 2021. Cyclodextrin polymers: Structure, synthesis, and use as drug carriers. *Progress in Polymer Science*, 118. Article number: 101408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101408>.
- López, Z. G., Gonzalez, U., Rodriguez Furlán, L. T. 2022. Use of Stevia and inulin in combination with bovine plasma proteins as sugar substitute for the development of a sugar-free and low-fat muffins formulation. *Journal of Food Science and Technology*, 59, pp. 2643–2654. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05284-1>.
- Lunawat, A. K., Vishwakarma, N., Raikwar, S. 2025. Future prospects in inulin research. In Akram W., Mishra N., Haider T. (eds) Monograph. *Inulin for pharmaceutical applications*. Springer, Singapore, pp. 325–341. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-9056-2_15.
- Melilli, M. G., Buzzanca, C., Di Stefano, V. 2024. Quality characteristics of cereal-based foods enriched with different degree of polymerization inulin: A review. *Carbohydrate Polymers*, 332. Article number: 121918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121918>.
- Melilli, M. G., Costa, C., Lucera, A., Padalino, L. et al. 2021. Fiordilatte cheese fortified with inulin from *Cichorium intybus* or *Cynara cardunculus*. *Foods*, 10(6). Article number: 1215. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10061215>.
- Mi, J., Zhao, X., Huang, P., Hong, J. et al. 2022. Effect of hydroxypropyl distarch phosphate on the physicochemical characteristics and structure of shrimp myofibrillar protein. *Food Hydrocolloids*, 125. Article number: 107417. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107417>.
- Mishra, S., Sahu, A., Anakha, S., Choubey, M. 2025. Inulin as a coating agent. In Akram W., Mishra N., Haider, T. (eds) Monograph. *Inulin for pharmaceutical applications*. Springer, Singapore, pp. 91–111. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-9056-2_5.
- Mohammadi, F., Shiri, A., Tahmouzi, S., Mollakhalili-Meybodi, N. 2023. Application of inulin in bread: A review of technological properties and factors affecting its stability. *Food Science & Nutrition*, 11(2), pp. 639–650. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3141>.
- Moirangthem, S., Laskar, S. K., Das, A., Upadhyay, S. et al. 2022. Effects of soy protein isolate and inulin on physico-chemical and organoleptic qualities of low-fat duck meat sausages. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 41(3), pp. 346–350. DOI: <https://doi.org/10.18805/ajdfr.dr-1828>.
- Morros, J., Leveck, B., Infante, M. R. 2010. Chemical hydrophobic modification of inulin in aqueous media: Synthesis of β -hydroxyalkyl ethers of inulin. *Carbohydrate Polymers*, 81(3), pp. 681–686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.039>.
- Muley, P., Kumar, S., El Kourati, F., Kesharwani, S. S. et al. 2016. Hydrophobically modified inulin as an amphiphilic carbohydrate polymer for micellar delivery of paclitaxel for intravenous route. *International Journal of Pharmaceutics*, 500(1–2), pp. 32–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.01.005>.
- Murtaza, M. S., Sameen, A., Rafique, S., Shahbaz, M. et al. 2022. Impact of dietary fiber (inulin and resistant starch) on the quality parameters of low fat cheddar cheese from buffalo milk. *Pakistan Journal of Zoology*, 55(2). DOI: <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/20200630120620>.
- Narala, V. R., Orlovs, I., Jugbarde, M. A., Masin, M. 2022. Inulin as a fat replacer in pea protein vegan ice cream and its influence on textural properties and sensory attributes. *Applied Food Research*, 2(1). Article number: 100066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100066>.

- Nieto-Nieto, T. V., Wang, Y. X., Ozimek, L., Chen, L. 2015. Inulin at low concentrations significantly improves the gelling properties of oat protein – A molecular mechanism study. *Food Hydrocolloids*, 50, pp. 116–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.03.031>.
- Onsri, N., Hudthagosol, C., Sanporkha, P. 2022. Effect of inulin and whey protein concentrate on the physicochemical properties and shelf life of reduced-fat cream puffs. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(12). Article number: e16955. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.16955>.
- Pei, L., Luo, D., Wei, Y., Li, P. et al. 2024. Effect of phosphorylation of long-chain inulin on the rheological properties of wheat flour doughs with different gluten. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(4), pp. 2349–2360. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.16963>.
- Peng, H., Wang, X., Chen, K., Yue, C. et al. 2024. Effect of long-chain inulin on the rheological properties, water state, gluten structure, and microstructure of frozen dough. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(12), pp. 9117–9130. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.17493>.
- Punia Bangar, S., Sunooj, K. V., Navaf, M., Phimolsiripo, I. Y. et al. 2024. Recent advancements in cross-linked starches for food applications – A review. *International Journal of Food Properties*, 27(1), pp. 411–430. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2024.23184>.
- Qin, Y.-Q., Wang, L.-Y., Yang, X.-Y., Xu, Y.-J. et al. 2023. Inulin: Properties and health benefits. *Food & function*, 14(7), pp. 2948–2968. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2fo01096h>.
- Rahnama, H., Khorasani, S. N., Aminoroaya, A., Molavian, M. R. et al. 2021. Facile preparation of chitosan-dopamine-inulin aldehyde hydrogel for drug delivery application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 185, pp. 716–724. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.199>.
- Reimer, R. A., Soto-Vaca, A., Nicolucci, A. C., Mayengbam, S. et al. 2020. Effect of chicory inulin-type fructan-containing snack bars on the human gut microbiota in low dietary fiber consumers in a randomized crossover trial. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 111(6), pp. 1286–1296. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqaa074>.
- Saedi, S., Garcia, C. V., Kim, J. T., Shin, G. H. 2021. Physical and chemical modifications of cellulose fibers for food packaging applications. *Cellulose*, 28, pp. 8877–8897. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04086-0>.
- Sağcan, N., Sağcan, H., Bozkurt, F., Bulut Güneş, A. N. et al. 2024. Optimization of inulin extraction from chicory roots and an ultrafiltration application to obtain purified inulin and hydrolyzed fructooligosaccharides. *Journal of Agricultural Sciences*, 30(1), pp. 166–178. DOI: <https://doi.org/10.15832/ankutbd.1338572>.
- Santos, J. S., Barradas, T. N., Tavares, G. D. 2022. Advances in nanotechnology-based hair care products applied to hair shaft and hair scalp disorders. *International Journal of Cosmetic Science*, 44(3), pp. 320–332. DOI: <https://doi.org/10.1111/ics.12780>.
- Shams, Z. A., Wadhawan, N. 2021. Inulin a crucial component in food industry: A review. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)*, 5(3), pp. 742–745. URL: www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd38768.pdf.
- Singhal, S., Hulle, N. R. S. 2022. Citrus pectins: Structural properties, extraction methods, modifications and applications in food systems – A review. *Applied Food Research*, 2(2). Article number: 100215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.1002150215>.
- Song, H., Chen, F., Cao, Y., Wang, F. 2024. Innovative applications of pectin in lipid management: Mechanisms, modifications, synergies, nanocarrier systems, and safety considerations. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(37), pp. 20261–20272. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c06586>.
- Sun, Q., Wicker, L. 2021. Hydrogel encapsulation of lactobacillus casei by block charge modified pectin and improved gastric and storage stability. *Foods*, 10(6). Article number: 1337. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10061337>.
- Tang, Y., Zhu, Y., Wang, X., Peng, H. et al. 2024. Study of the structural characterization, physicochemical properties and antioxidant activities of phosphorylated long-chain inulin with different degrees of substitution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, Part 1. Article number: 130139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130139>.
- Tao, C., Zeng, W., Zhang, Q., Liu, G. et al. 2021. Effects of the prebiotic inulin-type fructans on post-antibiotic reconstitution of the gut microbiome. *Journal of Applied Microbiology*, 130(3), pp. 634–649. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.14827>.
- Teferra, T. F. 2021. Possible actions of inulin as prebiotic polysaccharide: A review. *Food Frontiers*, 2(4), pp. 407–416. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.92>.
- Vereyken, I. J., van Kuik, J. A., Evers, T. H., Rijken, P. J. et al. 2003. Structural requirements of the fructan-lipid interaction. *Biophysical Journal*, 84(5), pp. 3147–3154. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(03\)70039-3](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(03)70039-3).
- Verma, D. K., Srivastav, P. P. 2021. Isolation, modification, and characterization of rice starch with emphasis on functional properties and industrial application: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(24), pp. 6577–6604. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1903383>.

- Wang, S., Wang, J., Liu, Y., Liu, X. 2020. Starch modification and application. In Wang S. (ed.) Monograph. *Starch structure, functionality and application in foods*. Springer, Singapore, pp. 131–149. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0622-2_8.
- Wang, X., Wang, Z., Shen, M., Yi, C. et al. 2022. Acetylated polysaccharides: Synthesis, physicochemical properties, bioactivities, and food applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(15), pp. 4849–4864. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2146046>.
- Wu, B., Li, Y., Li, Y., Li, H. et al. 2022. Encapsulation of resveratrol-loaded Pickering emulsions in alginate/pectin hydrogel beads: Improved stability and modification of digestive behavior in the gastrointestinal tract. *International Journal of Biological Macromolecules*, 222, Part A, pp. 337–347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.175>.
- Würfel, H., Geitel, K., Qi, H., Heinze, T. 2021. Chemical modification of pectin and polygalacturonic acid: A critical review. *BioResources*, 16(4), pp. 8457–8488.
- Xie, S. X., Liu, Q., Cui, S. W. 2005. Starch modification and applications. In Cui S. W. (ed.) Monograph. *Food carbohydrates: Chemistry, physical properties, and applications*. Taylor & Francis Group, LLC.
- Xu, L., Wang, J., Zhao, Y., Wu, N. et al. 2025. Facile fabrication of stable O/W high internal phase emulsions with egg yolk fractions and hydroxypropyl distarch phosphate. *International Journal of Biological Macromolecules*, 288. Article number: 138599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138599>.
- Yazid, N. S. M., Abdullah, N., Muhammad, N., Matias-Peralta, H. M. 2018. Application of starch and starch-based products in food industry. *Journal of Science and Technology*, 10(2), pp. 144–174. DOI: <https://doi.org/10.30880/jst.2018.10.02.023>.
- Zhang, R., Luo, D., Yue, C., Bai, Z. et al. 2024a. Effects of phosphorylation-modified long-chain inulin on wheat starch: Physicochemical properties and retrogradation behaviors. *Food Chemistry: X*, 24. Article number: 101860. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101860>.
- Zhang, X., Liu, Z., Wang, L., Lan, X. et al. 2023. Effect of hydroxypropyl distarch phosphate on the retrogradation properties of sterilized pea starch jelly and its possible mechanism. *International Journal of Biological Macromolecules*, 247. Article number: 125629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125629>.
- Zhang, Y., Liu, R., Song, B., Li, L. et al. 2024b. Recent advances in inulin polysaccharides research: Extraction, purification, structure, and bioactivities. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 11. Article number: 136. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00667-w>.
- Zhao, Y., Luo, D., Yue, C., Wang, L. et al. 2023. Effect of phosphorylated long-chain inulin on the dough rheology and steamed bread quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(2), pp. 730–740. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.16223>.

Сведения об авторах

Скородумов Александр Сергеевич – 2-я Мытищинская ул., 2, стр. 1, г. Москва, Россия, 129626;
Общество с ограниченной ответственностью "Бавар+", генеральный директор;
e-mail: asskorodumov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8905-255X>

Alexander S. Skorodumov – 2nd Mytishchinskaya Str., 2/1, Moscow, Russia, 129626;
Limited Liability Company "Bavar+", General Director;
e-mail: asskorodumov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8905-255X>

Нестеров Егор Дмитриевич – 2-я Мытищинская ул., 2, стр. 1, г. Москва, Россия, 129626;
Общество с ограниченной ответственностью "Бавар+", мл. науч. сотрудник;
Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), аспирант;
e-mail: eg0r.nesterov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3442-7024>

Egor D. Nesterov – 2nd Mytishchinskaya Str., 2/1, Moscow, Russia, 129626;
Limited Liability Company "Bavar+", Junior Researcher;
11 Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH), PhD Student;
e-mail: eg0r.nesterov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3442-7024>

Горн Дмитрий Сергеевич – ул. 2-я Мытищинская, 2, стр. 1, г. Москва, Россия, 129626;
Общество с ограниченной ответственностью "Бавар+", технолог-разработчик;
Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), аспирант;
e-mail: dmitry_gorn@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6792-8669>

Dmitry S. Gorn – 2nd Mytishchinskaya Str., 2/1, Moscow, Russia, 129626;
Limited Liability Company "Bavar+", Technologist-Developer;
11 Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH), PhD Student;
e-mail: dmitry_gorn@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6792-8669>

Барканов Александр Сергеевич – ул. 2-я Мытищинская, 2, стр. 1, г. Москва, Россия, 129626;
Общество с ограниченной ответственностью "Бавар+", микробиолог;
Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, Россия, 125080;
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), аспирант;
e-mail: hhhebeck@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9929-6646>

Alexander S. Barkanov – 2nd Mytishchinskaya Str., 2/1, Moscow, Russia, 129626;
Limited Liability Company "Bavar+", Microbiologist;
11 Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125080;
Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH), PhD Student;
e-mail: hhhebeck@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9929-6646>

Шаненко Елена Феликсовна – ул. 2-я Мытищинская, 2, стр. 1, г. Москва, Россия, 129626;
Общество с ограниченной ответственностью "Бавар+", ст. науч. сотрудник, канд. биол. наук, доцент;
e-mail: eshanenko@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0875-9292>

Elena F. Shanenko – 2nd Mytishchinskaya Str., 2/1, Moscow, Russia, 129626;
Limited Liability Company "Bavar+", Senior Researcher, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor;
e-mail: eshanenko@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0875-9292>

Требования к рукописи статьи

Общие требования

Оригинальность текста	В статьях допускается не более 20 % заимствованного текста из открытых источников.
Объем статьи	Максимальный объем статьи – 10 страниц (включая библиографический список).
Формат файла	Электронный вариант статьи выполняется в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением *.doc, *.docx. В имени файла указывается фамилия и инициалы автора.
Параметры страницы	Формат А4. Поля: левое – 2,5 см, правое – 2,5 см, верхнее – 2,5 см, нижнее – 2,5 см.
Форматирование текста	Шрифт: Times New Roman. Размер шрифта – 10, абзацный отступ – 1,0, выравнивание по ширине. Межстрочный интервал – одинарный. Переносы слов не допускаются. Заголовки разделов помещают отдельной строкой через один межстрочный интервал после текста, печатают с прописной буквы. Шрифт полужирный, размер шрифта – 10, выравнивание по левому краю.

Требования к содержанию и оформлению структурных элементов рукописи

Индекс УДК	Индекс УДК помещают перед инициалами и фамилией автора отдельной строкой. Шрифт обычный, размер шрифта – 12, выравнивание по левому краю.
Автор (авторы)	Инициалы и фамилию автора(ов) на русском языке помещают после индекса УДК. Шрифт обычный, размер шрифта – 12, выравнивание по центру.
Заглавие	Заглавие помещают через один межстрочный интервал после инициалов и фамилии автора(ов), печатают с прописной буквы без точки в конце. Перевод инициалов, фамилии автора(ов) и заглавия на английский язык помещают соответственно после инициалов, фамилии авторов и заглавия на русском языке. Шрифт полужирный, размер шрифта – 12, выравнивание по центру.
Реферат	Рекомендуемый объем текста реферата 200–250 слов. Реферат на русском языке помещают через один межстрочный интервал после заглавия на английском языке. Перевод реферата на английский язык помещают через один межстрочный интервал после реферата на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, выравнивание по ширине.
Ключевые слова	Ключевые слова на русском языке помещают через один межстрочный интервал после аннотации на английском языке и разделяются запятой. Перевод ключевых слов на английский язык помещают на следующей строке после ключевых на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 8, выравнивание по левому краю.
Основной текст	Рекомендуемая структура основного текста статьи: введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, благодарности. Иллюстрации и таблицы помещаются в тексте статьи по месту их первого упоминания. Иллюстрации, таблицы и формулы нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией.
Библиографический список, библиографические ссылки	Библиографический список помещают через один межстрочный интервал после текста статьи. Перевод библиографического списка на английский язык помещают через один межстрочный интервал после библиографического списка на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, без абзацного отступа, выравнивание по ширине.
Сведения об авторе(ах)	Сведения об авторе(ах) помещают через один межстрочный интервал после библиографического списка. Фамилия Имя Отчество – шрифт полужирный, размер шрифта – 10. Почтовый адрес, наименование организации, ученая степень, звание, академический статус, должность, e-mail. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, выравнивание по левому краю.

Журнал зарегистрирован

Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-26674 от 22 декабря 2006 г.

Оформить подписку на журнал «Вестник МГТУ» можно:

– по Объединенному каталогу «ПРЕССА РОССИИ». Подписной индекс – 41212

URL: <https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/i41212/>

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых
должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание
ученых степеней доктора и кандидата наук:

https://vak.minobrnauki.gov.ru/documents#tab=_tab:editions~

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования.

Журнал включен в базы данных: Zoological Record на платформе Web of Science (WoS),
Food Science and Technology Abstracts (FSTA), GeoRef.

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
95 2000 ОК 005-93

ВЕСТНИК МГТУ

Том 28, № 2 (апрель – июнь) 2025 г.



Подписано в печать 17.06.2025
Дата выхода в свет 30.06.2025
Формат 60×84/8. Бумага типографская
Печать ризографическая
Усл. печ. л. 21.86. Тираж 500 экз. Заказ № 123.
Цена 2 507 р. 00 коп.

Адрес издателя:
ФГАОУ ВО «МАУ»
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13

Отпечатано в редакционно-издательском отделе МАУ :
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13