



# FOOD METAENGINEERING

Пищевая Метаинженерия

Volume 3 | Issue 1 | 2025



### ■ FOOD METAENGINEERING

Научный рецензируемый журнал  
№ 3 | 2024  
Периодичность издания — 4 номера в год  
Основан в 2023 г.

### ■ Учредитель:

Федеральное государственное автономное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (ФГАНУ «ВНИМИ»)

### ■ Главный редактор

**Галстян Арам Генрихович** — доктор технических наук, академик РАН, профессор РАН, директор Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (Москва, Россия) (ORCID)

### ■ РЕДАКЦИОННЫЙ ОФИС

**Заведующий редакцией журнала, академический редактор**

**Тихонова Елена Викторовна** — кандидат исторических наук, доцент, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности (Москва, Россия) (ORCID)

**Ответственный секретарь**

**Рябова Анастасия Евгеньевна** — доктор технических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности (Москва, Россия) (ORCID)

**Туровская Светлана Николаевна** — Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности. Технический секретарь. (ORCID 0000-0002-5875-9875)

**Редактор по этике**

**Косычева Марина Александровна** — доцент, кандидат филологических наук, доцент Российского биотехнологического университета (Москва, Россия) (ORCID)

- Рецензируемый научный журнал FOOD METAENGINEERING («ПИЩЕВАЯ МЕТАИНЖЕНЕРИЯ») зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 13 марта 2023 года (Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-84878 — сетевое издание).

### ■ Адрес:

115093, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35, корп. 7, к. 406  
Тел. +7 (499) 236-32-23  
E-mail: fme@vnimi.org  
Официальный сайт учредителя: vnimi.org  
Официальный сайт редакции: fme-journal.org

© ФГАНУ «ВНИМИ», 2024

### ■ FOOD METAENGINEERING

Scientific peer-reviewed journal  
No 3 | 2024  
Periodicity of publication — Quarterly  
Published since 2023

### ■ Founder:

All-Russian Dairy Research Institute (VNIMI), Moscow, Russian Federation

### ■ Editor-in-Chief

**Aram G. Galstyan** — Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering, Professor, Director of the All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation

### ■ EDITORIAL OFFICE

**Head of the Editorial Team, Academic Editor**

**Elena V. Tikhonova** — Cand. Sci. (History), Assistant professor, All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation

**Executive Secretary**

**Anastasiia Riabova** — Doctor of Engineering, All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation

**Svetlana N. Turovskaya** — All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation. Technical Secretary

**Ethics Editor**

**Marina A. Kosycheva** — Cand. Sci. (Philology), Assistant professor, Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow, Russian Federation

- The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communication, Information Technologies and Mass Media. The Mass Media Registration Certificate EL No FS77-84878 dated March 13, 2023.

### ■ Address:

406 room, 35/7, Lyusinovskaya st., Moscow, Russian Federation, 115093  
Tel. +7 (499) 236-32-23  
E-mail: fme@vnimi.org  
Official web site of Founder: vnimi.org  
Official web site of the Editorial Office: fme-journal.org

© VNIMI, 2024

- **Бабич Ольга Олеговна** —  
доцент, доктор технических наук, директор Научно-образовательного центра «Промышленные биотехнологии» Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта», г. Калининград, Российская Федерация
- **Багиров Вугар Алинияз оглы** —  
член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, директор Департамента координации деятельности организаций в сфере сельскохозяйственных наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация
- **Будрик Владислав Глебович** —  
кандидат технических наук, директор Всероссийского научно-исследовательского института птицеперерабатывающей промышленности — филиала Всероссийского научно-исследовательского и технологического института птицеводства РАН, г. Ржавки, Российская Федерация
- **Донник Ирина Михайловна** —  
академик РАН, профессор, доктор биологических наук, помощник президента НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация
- **Евдокимов Иван Алексеевич** —  
член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук, заведующий базовой кафедрой технологии молока и молочных продуктов Северо-Кавказского федерального университета, г. Ставрополь, Российская Федерация
- **Линденбек Марио** —  
доктор сельскохозяйственных наук, Business consulting Lindenbeck, г. Берлин, Германия
- **Лобачевский Яков Петрович** —  
академик РАН, профессор, доктор технических наук, директор Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, г. Москва, Российская Федерация
- **Мартиросян Владимир Викторович** —  
профессор РАН, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе Научно-исследовательского института хлебопекарной промышленности, г. Москва, Российская Федерация
- **Мельникова Елена Ивановна** — профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технологии продуктов животного происхождения Воронежского государственного университета инженерных технологий г. Воронеж, Российская Федерация
- **Петров Андрей Николаевич** —  
академик РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности, г. Москва, Российская Федерация
- **Просеков Александр Юрьевич** —  
член-корреспондент РАН, профессор РАН, профессор, доктор технических наук, доктор биологических наук, ректор Кемеровского государственного университета, г. Москва, Российская Федерация
- **Семипятный Владислав Константинович** — доктор технических наук, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности, г. Москва, Российская Федерация
- **Серба Елена Михайловна** —  
член-корреспондент РАН, профессор РАН, доцент, доктор биологических наук, заместитель директора по научной работе Всероссийского научно-исследовательского института пищевой биотехнологии филиала Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, г. Москва, Российская Федерация
- **Сложенкина Марина Ивановна** —  
член-корреспондент РАН, профессор РАН, профессор, доктор биологических наук, директор Поволжского научно-исследовательского института производства и переработки мясомолочной продукции, г. Волгоград, Российская Федерация
- **Федотова Ольга Борисовна** —  
старший научный сотрудник, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник/ученый секретарь Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности, г. Москва, Российская Федерация
- **Чернуха Ирина Михайловна** —  
академик РАН, профессор, доктор технических наук, руководитель отдела координации международных и инициативных проектов Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, г. Москва, Российская Федерация



■ **Olga O. Babich** —

Associate Professor, Doctor of Engineering, Director of the Scientific and Educational Center «Industrial Biotechnologies», Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

■ **Vugar A. Bagirov** —

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Director of the Department for Coordinating the Activities of Organizations in the Field of Agricultural Sciences, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

■ **Vladislav G. Budrik** —

Cand. Sci. (Engineering), Director of the All-Russian Research Institute of the Poultry Processing Industry, All-Russian Research and Technological Institute of Poultry Farming of the Russian Academy of Sciences, Rzhavki, Russian Federation

■ **Irina M. Donnik** —

Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Biological Sciences, presidential aide, National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

■ **Ivan A. Evdokimov** —

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Engineering, Head of the Basic Department of Technology of Milk and Dairy Products, North Caucasian Federal University, Stavropol, Russian Federation

■ **Mario Lindenbeck** —

Doctor of Agricultural Sciences, Business Consulting Lindenbeck, Berlin, Germany

■ **Yakov P. Lobachevsky** —

Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Engineering, First Deputy Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

■ **Vladimir V. Martirosyan** —

Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering, Deputy Director for Research, Scientific Research Institute of the Baking Industry (Moscow, Russia) (ORCID)

■ **Elena I. Melnikova** —

Professor, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Technology of Animal Origin Products, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation

■ **Andrey N. Petrov** —

Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering, Chief Researcher, All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation

■ **Alexander Yu. Prosekov** —

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Engineering, Doctor of Biological Sciences, Rector of Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation

■ **Vladislav K. Semipyatny** —

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russian Federation

■ **Elena M. Serba** —

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Associate Professor, Doctor of Biological Sciences, Deputy Director for Research, All-Russian Research Institute of Food Biotechnology, Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russian Federation

■ **Marina I. Slozhenkina** —

Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Biological Sciences, Director of the Volga Research Institute for the Production and Processing of Meat and Dairy Products (Volgograd, Russia) (ORCID)

■ **Olga B. Fedotova** —

Senior Researcher, Doctor of Engineering, Leading Researcher / Scientific Secretary of the All-Russian Dairy Research Institut, Moscow, Russian Federation

■ **Irina M. Chernukha** —

Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Engineering, Head of the Department for Coordinating International and Initiative Projects, Federal Scientific Center for Food Systems named after V. M. Gorbатов, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

## РЕДАКТОРСКАЯ СТАТЬЯ

**Е.В. Тихонова**

От обоснованного предположения к доказательству: зачем эмпирическому исследованию гипотеза? ..... 7

## ОРИГИНАЛЬНОЕ ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

**Осама И.А. Солтан**

Биоинформатический анализ изменений пептидного профиля молочных белков  
при хранении ..... 17

**Ш. М. Велямов, М. Т. Велямов, Ж. З. Уразбаев, Т. Н. Бакытжан, А. У. Абитбекова**

Функциональные компоненты питания: технология получения концентрата, содержащего ликопин,  
из томатного сырья ..... 33

**С. А. Кишилова, В. А. Леонова**

Сравнительная оценка антимикробной активности штаммов молочнокислых бактерий по отношению  
к *Pseudomonas aeruginosa* ..... 42

## ОРИГИНАЛЬНОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

**Е. А. Большакова, С. В. Мотылев, В. К. Семипятный, А. Г. Кручинин, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова**

Моделирование процесса теплообмена с окружающей средой сгущенного молока с сахаром ..... 56

## EDITORIA

**Elena V. Tikhonova**

From a Reasoned Assumption to Evidence: Why Empirical Research Needs a Hypothesis? ..... 8

## ORIGINAL EMPIRICAL RESEARCH18

**Osama I.A. Soltan**

Bioinformatic Analysis of Changes in the Peptide Profile of Dairy Proteins During Storage .....18

**Shukhrat M. Velyamov, Masimzhan T. Velyamov, Zhumatay Z. Urazbayev, Turar N. Bakytzhan,  
Aelina U. Abitbekova**

Functional Components in Nutrition: Technology for Producing a Lycopene-Containing Concentrate  
from Tomato Raw Materials .....34

**Svetlana A. Kishilova, Victoria A. Leonova**

Comparative Study of the Antimicrobial Activity of Lactic Acid Bacteria Strains against *Pseudomonas aeruginosa* .....43

## ORIGINAL THEORETICAL RESEARCH

**Ekaterina I. Bolshakova, Sergey V. Motylev, Vladislav K. Semipyatny, Aleksandr G. Kruchinin,  
Svetlana N. Turovskaya, Elena E. Illarionova**

Heat Transfer Modeling in Sweetened Condensed Milk Under Ambient Conditions .....57

# От обоснованного предположения к доказательству: зачем эмпирическому исследованию гипотеза?

Е.В. Тихонова

МГИМО Университет, г. Москва,  
Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

Формулирование исследовательской гипотезы представляет собой концептуальный фундамент научного исследования и играет ключевую роль в организации его логико-методологической структуры. В настоящей статье рассматривается значение четко сформулированной, проверяемой гипотезы как необходимого условия для обеспечения внутренней согласованности, воспроизводимости и обоснованности научного дизайна. Особое внимание уделено анализу различных типов гипотез (нулевой, альтернативной, направленной, ненаправленной, описательной и объяснительной) с приведением примеров их применения в контексте прикладных исследований в области пищевых технологий. Кроме того, в статье анализируются сильные и слабые стороны формулировок гипотез, представлены типичные ошибки, допускаемые при их построении, и предложен алгоритм, обеспечивающий методологически корректное формирование гипотезы, ориентированной на эмпирическую верификацию.

**Ключевые слова:** исследовательская гипотеза; дизайн исследования; проверяемость гипотезы; фальсифицируемость гипотезы; воспроизводимость гипотезы; типы гипотез; ошибки формулировки гипотез

## Корреспонденция:

Елена Викторовна Тихонова  
E-mail: [etihonova@gmail.com](mailto:etihonova@gmail.com)

## Конфликт интересов:

автор сообщает  
об отсутствии конфликта  
интересов.

**Поступила:** 03.02.2025

**Принята:** 15.03.2025

**Опубликована:** 31.03.2025

**Copyright:** © 2025 Автор



Для цитирования: Тихонова, Е.В. (2025). От обоснованного предположения к доказательству: зачем эмпирическому исследованию гипотеза? *FOOD METAENGINEERING*, 3(1), 7-16. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.80>

# From a Reasoned Assumption to Evidence: Why Empirical Research Needs a Hypothesis?

Elena V. Tikhonova

MGIMO University, Moscow,  
Russian Federation

## ABSTRACT

The formulation of a research hypothesis constitutes the conceptual foundation of scientific inquiry and plays a pivotal role in shaping its logical and methodological structure. This article explores the significance of a clearly articulated, testable hypothesis as a prerequisite for ensuring internal coherence, reproducibility, and methodological rigor in research design. Particular attention is given to the classification of hypothesis types (null, alternative, directional, non-directional, descriptive, and explanatory) with examples of their application in the context of applied research in food technology. Additionally, the article examines the strengths and weaknesses of hypothesis formulation, outlines common errors encountered in this process, and presents an algorithm for constructing methodologically sound hypotheses aimed at empirical verification.

**Keywords:** research hypothesis; research design; hypothesis testability; hypothesis falsifiability; reproducibility; types of hypotheses; hypothesis formulation errors

## Correspondence:

Elena V. Tikhonova

E-mail: [etihonova@gmail.com](mailto:etihonova@gmail.com)

## Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

**Received:** 03.02.2025

**Accepted:** 15.03.2025

**Published:** 31.03.2025

**Copyright:** © 2025 The Author



**To cite:** Tikhonova, E. (2025). From a reasoned assumption to evidence: Why empirical research needs a hypothesis? *FOOD METAENGINEERING*, 3(1), 7-16.  
<https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.80>



В научных исследованиях гипотеза выступает в роли компаса, который направляет ученого через сложный лабиринт экспериментов, данных и интерпретаций. Как отмечал К.Поппер, научное знание продвигается вперед через опровержение или подтверждение четко сформулированных предположений (Popper, 1959). В контексте разработки новых пищевых продуктов, улучшения их питательной ценности или оптимизации процессов производства гипотеза не просто задает фокус исследования, но и определяет рамки, в которых этот вопрос будет исследован.

## Почему гипотеза критически важна для качественного дизайна исследований?

В научных исследованиях четкое формулирование гипотезы играет решающую роль в планировании и проведении экспериментов. Как указывают Kumar et al. (2021), гипотеза является логическим фундаментом, на котором строится вся исследовательская деятельность, определяя цели, задачи и направления работы. Гипотеза представляет собой конкретное предположение, проверяемое посредством методически выверенных шагов, и именно это предположение задает четкость и фокус исследовательской работе (Creswell, 2014).

Проблемы, возникающие при недостаточно четкой или вообще отсутствующей гипотезе, приводят к неопределенности на этапах планирования эксперимента и интерпретации результатов, увеличивает риск ошибочных выводов и затрудняет воспроизведение исследований другими учеными (Platt, 1964; Fanelli, 2010). В исследованиях, связанных с пищевой метаинженерией, где многие факторы (от температурных условий до биохимических взаимодействий ингредиентов) оказывают влияние на конечный результат, подобные ошибки могут привести к значительным ресурсным и временным затратам.

Гипотеза, как эмпирически проверяемое утверждение, основанное на совокупности существующих теоретических представлений и предварительных наблюдений, представляет собой рациональное предположение о наиболее вероятном (а не исключительном) сценарии развития исследуемого явления и выполняет ряд фундаментальных функций в структуре научного исследования:

- (1) Фокусировка исследования: без гипотезы эксперимент рискует стать бесцельным сбором данных,

что особенно опасно в пищевой метаинженерии, где ресурсы (например, сырье или время ферментации) ограничены. Например, ненаправленная гипотеза в формулировке «*Ферменты влияют на сыр*» может привести к тому, что исследователь будет вынужден замерить десятки параметров (цвет, вкус, запах) без ясного понимания, что важно, тратя время и ресурсы впустую.

- (2) Определение переменных: гипотеза помогает четко обозначить независимые, зависимые и контролируемые переменные, что упрощает разработку методологии.
- (3) Обеспечение воспроизводимости: эффективная корректно сформулированная гипотеза позволяет другим исследователям повторить эксперимент, что является основой научной достоверности (Ioannidis, 2005).

## Типы гипотез и их функции

Гипотезы в научных исследованиях классифицируются по различным критериям в зависимости от их цели, структуры и применения. Чтобы создать единую и логичную систему, важно объединить основные подходы, избегая избыточной сложности, и сделать классификацию понятной для использования в любой области, включая пищевую метаинженерию. Предлагаемая классификация основана на трех ключевых аспектах: цель гипотезы, форма выражения и направленность эффекта.

### I. По форме выражения

#### (1) Нулевая гипотеза ( $H_0$ )

Нулевая гипотеза утверждает, что между переменными нет связи или эффекта. Она служит отправной точкой для статистического анализа. Функция – служит базой для статистической проверки. Проверяется с помощью статистических тестов (например, t-тест), чтобы либо отвергнуть, либо принять  $H_0$ .

Эффективный пример:

В исследовании влияния добавления пробиотиков в йогурт на содержание короткоцепочечных жирных кислот (SCFA) нулевая гипотеза могла бы звучать так: «*Добавление штамма *Lactobacillus reuteri* не влияет на концентрацию SCFA в йогурте после 14 дней ферментации*». Это удачная гипотеза, потому что она конкрет-

на, проверяема и позволяет использовать статистические методы (например, t-тест) для ее опровержения или подтверждения.

Неэффективный пример: «Пробиотики не влияют на йогурт». Эта гипотеза слишком общая, не указывает конкретные переменные (какие пробиотики? какой аспект йогурта?) и не поддается точной проверке, что делает дизайн исследования расплывчатым и бесполезным.

## (2) Альтернативная гипотеза ( $H_1$ )

Альтернативная гипотеза утверждает наличие эффекта или связи, противоположной нулевой гипотезе. Подтверждается, если  $H_0$  отвергается на основе данных. Может быть направленной или ненаправленной. Функция – указывает конкретный ожидаемый результат.

Эффективный пример: «Замена сахара стевией в шоколадных батончиках снижает гликемический индекс на 20% по сравнению с контрольным образцом». Эта гипотеза конкретна, измерима и направляет исследователя к выбору подходящего метода (например, измерение глюкозы в крови у испытуемых).

Неэффективный пример: «Стевия делает шоколад лучше». Здесь отсутствует измеримый критерий («лучше» — субъективно), что затрудняет выбор методологии и интерпретацию результатов.

## II. По направленности эффекта

Этот критерий определяет, предсказывает ли гипотеза конкретное направление изменения или только наличие эффекта.

### (1) Направленная гипотеза

Направленная гипотеза предсказывает не только наличие эффекта, но и его направление (увеличение, уменьшение). Указывают конкретное направление эффекта (увеличение, уменьшение), основываясь на предварительных данных или теории. Подходит, когда есть основания ожидать определенного результата (например, влияние ферментации на аромат доказано в литературе). Требуется сильной теоретической базы.

Эффективный пример: «Увеличение содержания клетчатки в хлебе на 5% повышает чувство сытости у потребителей на 30%». Эта гипотеза основана на предварительных данных о роли клетчатки в пищеварении

и задает четкие параметры для эксперимента (опросы потребителей, измерение массы клетчатки). Результаты могут быть статистически проверены.

Неэффективный пример: «Клетчатка влияет на сытость». Отсутствие направления и конкретных показателей делает гипотезу бесполезной для дизайна исследования, так как неясно, что именно измерять и в какую сторону ожидать эффект.

### (2) Ненаправленная гипотеза

Ненаправленная гипотеза утверждает наличие эффекта, но не указывает его направление.

Эффективный пример: «Использование фермента трансглутаминазы в производстве сыра изменяет его текстуру». Такая гипотеза работает, если эффект фермента еще не изучен. Исследование может включать измерение твердости и эластичности сыра, а гипотеза оставляет простор для интерпретации.

Неэффективный пример: «Ферменты влияют на сыр». Слишком широкая формулировка не дает исследователю фокуса, что приводит к хаотичному сбору данных без ясной цели.

## III. По цели гипотезы

Этот критерий отражает, что гипотеза пытается достичь: описать явление или объяснить его причину.

### (1) Описательная гипотеза

Описывают характеристики явления или связь между переменными без указания причин. Используются для сбора данных и выявления закономерностей. Такая гипотеза не предполагает причинно-следственной связи, лишь описывает наблюдаемые явления или различия, не дает глубокого понимания причин, поэтому часто требует дальнейшего развития в объяснительную гипотезу.

Эффективный пример: «Содержание антиоксидантов в черном чае варьируется в зависимости от времени заваривания (2, 5 и 10 минут)» (гипотеза описывает, что концентрация антиоксидантов изменяется, но не утверждает, почему или как это происходит. Она направляет исследователя на измерение антиоксидантов (например, с помощью спектрофотометрии) без предположений о механизме).

## (2) Объяснительная гипотеза

Объяснительная гипотеза идет дальше описания и стремится установить причинно-следственную связь между переменными. Она отвечает на вопрос «Почему это происходит?» или «Что вызывает этот эффект?» и предполагает выявление механизма или причину наблюдаемого явления. Утверждает причинно-следственную связь, основана на предварительных данных, теориях или наблюдениях. Используются когда есть достаточно данных или теоретическая основа для предположения о причине.

### Пример

Формулировка: «Увеличение времени заваривания черного чая с 2 до 10 минут повышает содержание антиоксидантов на 30 %, потому что длительная экстракция усиливает выделение полифенолов из листьев» (гипотеза не только описывает изменение (рост антиоксидантов), но и объясняет причину (экстракция полифенолов). Это требует проверки как измерением антиоксидантов, так и анализом полифенолов (например, методом HPLC).

### Взаимосвязь категорий

Эти три аспекта классификации гипотез научного исследования не исключают друг друга, а пересекаются, создавая гибкую систему.

Например:

Гипотеза может быть *описательной ненаправленной*: «Концентрация сахара в сиропе влияет на его вязкость».

Или *объяснительной направленной*: «Увеличение концентрации сахара с 50 % до 70 % повышает вязкость сиропа на 40 %, потому что усиливает межмолекулярные взаимодействия».

В статистическом анализе любая из них *может быть* выражена как *нулевая* («Сахар не влияет на вязкость») или *альтернативная* («Сахар влияет на вязкость»).

## Иллюстрация классификации на примере

Предположим, исследование посвящено влиянию температуры на экстракцию кофеина из кофе. Возможные гипотезы:

(1) Описательная + ненаправленная:

«Температура воды влияет на содержание кофеина в кофейном напитке».

Цель: описать связь, без указания направления.

(2) Описательная + нулевая ( $H_0$ ):

«Температура воды (80°C или 90°C) не влияет на содержание кофеина».

Цель: установить базовую точку для статистической проверки.

(3) Объяснительная + направленная + альтернативная ( $H_1$ ):

«Повышение температуры воды с 80°C до 90°C увеличивает содержание кофеина на 15 %, потому что высокая температура усиливает растворимость алкалоидов».

Цель: объяснить причину и предсказать эффект.

## Сильная гипотеза

Сильная гипотеза — это не просто предположение, а тщательно продуманное утверждение, которое служит надежной основой для научного исследования. Она должна обладать рядом параметров, которые делают ее конкретной, проверяемой и полезной для дизайна эксперимента. Ниже приведены ключевые параметры сильной гипотезы с подробными пояснениями, примерами из области пищевой метаинженерии и формулировками, демонстрирующими их применение

(1) Конкретность: сильная гипотеза четко определяет, какие переменные исследуются, как они связаны и в каком контексте. Такая гипотеза избегает обобщений и субъективных терминов. Конкретность позволяет исследователю точно знать, что измерять и как интерпретировать результаты.

Удачная формулировка: «Добавление 2 % пектина в яблочный сок снижает мутность на 30 % через 24 часа хранения при 4°C» (указаны независимая переменная (2 % пектина), зависимая (мутность, измеряемая в процентах), условия (24 часа, 4°C). Такой подход дает четкое понимание сути эксперимента).

Неудачная формулировка: «Пектин улучшает сок» (неясно, что значит «улучшает» (вкус? прозрачность?), нет измеримых параметров, гипотеза слишком общая).

(2) Проверимость: гипотеза должна быть сформулирована так, чтобы ее можно было подтвердить или опровергнуть с помощью объективных данных, собранных в эксперименте. Если гипотезу нельзя проверить, она теряет научную ценность, так как не поддается фальсификации<sup>1</sup> (Popper, 1959).

Удачная формулировка: «Замена 50 % пшеничной муки на овсяную в кексах увеличивает содержание бета-глюканов до 3 г на 100 г продукта» (зависимая переменная (содержание бета-глюканов) измерима с помощью химического анализа (например, спектрофотометрии), а независимая (замена муки) легко контролируется).

Неудачная формулировка: «Овсяная мука делает кексы полезнее» («полезнее» — субъективный термин, который нельзя измерить напрямую без конкретных критериев).

(3) Обоснованность: гипотеза должна опираться на существующие научные данные, теории или наблюдения, чтобы быть правдоподобной. Обоснованность связывает гипотезу с реальным миром и предотвращает формулировку произвольных предположений.

Удачная формулировка: «Увеличение концентрации фермента липазы с 0,5 % до 1 % в процессе производства сыра ускоряет высвобождение летучих ароматических соединений на 25 % за 30 дней созревания» (литература подтверждает, что липаза влияет на ароматообразование (Collins et al., 2003), а гипотеза уточняет эффект и условия, основываясь на этом).

Неудачная формулировка: «Липаза делает сыр вкуснее» (нет связи с научными данными, «вкуснее» — субъективно, отсутствует измеримая основа).

(4) Измеримость: переменные в гипотезе должны быть количественно или качественно измеримыми с помощью доступных методов: без измеримости невозможно собрать данные для подтверждения или опровержения гипотезы.

Удачная формулировка: «Добавление 10 % белкового гидролизата в мясные полуфабрикаты увеличивает влагоудерживающую способность на 15 % при нагревании до 70°C» (влагоудерживающая способность измеряется в процентах потери массы, а условия (10 % гидролизата, 70°C) конкретны и воспроизводимы).

Неудачная формулировка: «Белковый гидролизат улучшает мясо» («улучшает» не имеет числового или объективного показателя, что делает гипотезу непроверяемой).

(5) Направленность (при необходимости): если гипотеза предсказывает направление эффекта (увеличение, уменьшение), это должно быть четко указано. Направленность необязательна, но усиливает гипотезу, если есть предварительные данные. Направленность помогает сузить фокус исследования и выбрать подходящие статистические тесты.

Удачная формулировка: «Увеличение времени экстракции кофе с 2 до 4 минут повышает содержание кофеина в напитке на 20 %» (указано направление (повышение), измеримый показатель (кофеин в мг/л), конкретные условия (2–4 минуты). Это облегчает выбор метода анализа (например, HPLC).

Неудачная формулировка: «Время экстракции влияет на кофе» (нет направления эффекта, что делает гипотезу менее информативной и затрудняет интерпретацию результатов).

<sup>1</sup> Фальсифицируемость (возможность опровержения) является ключевым критерием научности. Если гипотеза сформулирована так, что её нельзя опровергнуть на основании данных, она не считается научной, потому что: нельзя провести эксперимент, который бы показал, верна она или нет; она не допускает строгой проверки методом проб и ошибок; её «истинность» становится недоказуемой, превращаясь в догму или утверждение веры, а не в научное знание. Пример непроверяемой (нефальсифицируемой) гипотезы: «Пищевой продукт X обладает энергетической аурой, которая делает его полезным для всех людей в любое время» (это утверждение невозможно проверить научными методами — оно неоперационализируемо, не измеряется и не допускает опровержения). Пример фальсифицируемой гипотезы: «Добавление 2 % клетчатки в печенье снижает уровень глюкозы в крови у взрослых испытуемых с предиабетом» (эта гипотеза может быть проверена с помощью контролируемого эксперимента. Если уровень глюкозы не изменяется — гипотеза опровергнута).

- (6) Лаконичность: гипотеза должна быть лаконичной, избегая ненужных деталей или сложных конструкций, при этом сохраняя ясность. Сложные формулировки могут запутать исследователя и усложнить дизайн эксперимента.

Удачная формулировка: *«Добавление 0,1 % ксантановой камеди в соус увеличивает вязкость на 50 % при 25°C»* (все параметры четко обозначены, нет лишней информации).

Неудачная формулировка: *«Если мы добавим ксантановую камедь, а потом измерим вязкость, а еще учтем температуру и время хранения, то соус станет гуще»* (избыточные детали размывают фокус, гипотеза становится громоздкой и менее проверяемой).

- (7) Воспроизводимость: гипотеза должна быть сформулирована так, чтобы другие исследователи могли повторить эксперимент с теми же условиями и получить сопоставимые результаты.

Удачная формулировка: *«Использование штамма *Saccharomyces cerevisiae* при 30°C в течение 48 часов увеличивает содержание этанола в хлебном квасе на 1,5 %»* (указаны точные условия (штамм, температура, время), что позволяет повторить эксперимент).

Неудачная формулировка: *«Дрожжи увеличивают алкоголь в квасе»* (нет деталей о штамме, условиях или измерениях, что делает повторение невозможным).

Итоговый пример сильной гипотезы

*«Если увеличить концентрацию лимонной кислоты с 0,2 % до 0,5 % в жележных конфетах, то время застывания сократится с 60 до 45 минут при 20°C».*

Анализ параметров:

- (1) Конкретность: указаны переменные (лимонная кислота, время застывания) и условия (20°C).
- (2) Проверяемость: время застывания измеряется секундомером.
- (3) Обоснованность: кислота ускоряет гелеобразование.
- (4) Измеримость: 60 → 45 минут — четкий показатель.
- (5) Направленность: предсказано сокращение времени.
- (6) Лаконичность: формулировка лаконична.
- (7) Воспроизводимость: условия четко определены.

## Типичные ошибки при формулировании гипотезы

Формулирование гипотезы — это критически важный этап научного исследования, и ошибки на этом этапе могут подорвать весь процесс, начиная от дизайна эксперимента и заканчивая интерпретацией результатов. Ниже описаны наиболее распространенные ошибки, каждая из которых сопровождается комментарием о причинах и последствиях, а также примерами (неудачным и исправленным) из контекста пищевой метаинженерии:

- (1) **Слишком общая или расплывчатая формулировка:** гипотеза не уточняет переменные, эффект или условия, оставляя ее слишком абстрактной. Подобная проблема возникает вследствие недостаточного анализа проблемы или желания исследователей охватить слишком многое в рамках одного исследования. В результате теряется фокус, а эксперимент становится бесцельным.

Неудачная гипотеза: *«Добавление ферментов улучшает сыр»* (неясно, какие ферменты, что улучшает (текстура? вкус?), как измерять эффект. Исследователь в такой ситуации может хаотично тестировать разные параметры без конкретной цели).

Доработанная гипотеза: *«Добавление 0,5 % липазы в сыр увеличивает концентрацию летучих ароматических соединений на 20 % за 30 дней созревания»* (указаны конкретный фермент, измеримый эффект и условия, что дает четкое направление).

- (2) **Невозможность проверить:** гипотеза не может быть подтверждена или опровергнута из-за субъективности формулировки или отсутствия методов измерения. Ошибка возникает, если игнорировать необходимость объективных данных. Это делает гипотезу ненаучной, так как она не поддается фальсификации (Popper, 1959).

Неудачная гипотеза: *«Пробиотики делают йогурт вкуснее»* («вкуснее» — субъективное понятие, зависящее от личных предпочтений, а не измерений. Нет способа измерить объективно).

Доработанная гипотеза: *«Добавление *Lactobacillus reuteri* в йогурт увеличивает кислотность на 0,3 pH за 12 часов при 40°C»* (кислотность измеряется pH-метром, что делает гипотезу проверяемой).



- (3) **Отсутствие обоснования:** гипотеза не опирается на научные данные, теории или наблюдения, что делает ее произвольной как результат недостаточно-го изучения литературы или предположений «наугад». Такая гипотеза может быть нереалистичной или повторять известное, компрометируя новизну исследования.

Неудачная гипотеза: «Увеличение сахара в тесте ускоряет рост дрожжей» (литература свидетельствует, что избыток сахара замедляет дрожжи из-за осмотического стресса, соответственно, гипотеза противоречит фактам).

Доработанная гипотеза: «Увеличение сахара с 5 % до 15 % в тесте замедляет рост дрожжей на 20 % за 1 час» (гипотеза опирается на известные данные и предсказывает логичный эффект).

- (4) **Избыточная сложность:** гипотеза включает слишком много переменных или условий, что затрудняет ее проверку. Желание учесть все аспекты сразу приводит к перегруженности гипотезы, что усложняет контроль эксперимента и интерпретацию данных).

Неудачная гипотеза: «Если добавить инулин, повысить температуру и увеличить время хранения, то хлеб станет мягче, вкуснее и полезнее» (множество переменных (инулин, температура, время) и эффектов (мягкость, вкус, польза) делают эксперимент громоздким и запутанным).

Доработанная гипотеза: «Добавление 5 % инулина в тесто увеличивает мягкость хлеба на 15 % при выпечке на 200°C» (одна переменная и один измеримый эффект упрощают проверку).

- (5) **Игнорирование контролируемых условий:** гипотеза не учитывает внешние факторы, которые могут повлиять на результат. Ошибка возникает из-за невнимания к контексту эксперимента. Без контроля условий результаты могут быть искажены, а воспроизводимость окажется под вопросом).

Неудачная гипотеза: «Увеличение концентрации кофеина улучшает вкус кофе» (не указаны температура, время экстракции или тип кофе, что влияет на вкус и кофеин, полученные результаты будут непредсказуемыми).

Доработанная гипотеза: «Увеличение концентрации кофеина с 1 % до 2 % в эспрессо, приготовленном при 90°C

за 25 секунд, повышает интенсивность вкуса на 10 % по оценке дегустаторов» (указаны условия, что обеспечивает воспроизводимость результатов).

- (6) **Отсутствие измеримого результата:** гипотеза не содержит конкретных показателей для оценки эффекта вследствие невнимания к количественным методам. Без измерений невозможно определить, подтвердилась гипотеза или нет).

Неудачная гипотеза: «Добавление клетчатки улучшает хлеб» («улучшает» — неопределенный термин, нет критерия успеха).

Доработанная гипотеза: «Добавление 5 % овсяной клетчатки в хлеб увеличивает влагоудерживающую способность на 10 %» (добавлен измеримый показатель: влагоудерживающая способность в процентах).

- (7) **Неверное предсказание направления эффекта:** гипотеза предсказывает эффект, противоположный логике или данным. Ошибка связана с неправильным пониманием явления, что может привести к некорректному дизайну и ложным выводам.

Неудачная гипотеза: «Увеличение температуры с 30°C до 50°C ускоряет рост пробиотиков в йогурте» (высокая температура (выше 40°C) обычно убивает пробиотики, а не ускоряет их рост).

Доработанная гипотеза: «Увеличение температуры с 30°C до 37°C ускоряет рост *Lactobacillus* в йогурте на 15 %» (учтена оптимальная температура для пробиотиков).

- (8) **Повторение известного факта:** гипотеза формулирует уже доказанное утверждение вместо исследования нового аспекта, как правило, в результате низкой экспертности исследовательского коллектива, отсутствия систематической работы с публикуемыми статьями. Как результат, исследование теряет новизну и значимость).

Доработанная гипотеза: «Добавление сахара в сироп увеличивает его сладость» (это очевидный факт, не требующий проверки).

Исправленная гипотеза: «Замена 50 % сахара стевией в сиропе снижает калорийность на 30 %, сохраняя сладость на уровне 90 % от оригинала» (исследуется новый аспект (замена сахара) с измеримым эффектом).



## Алгоритм формулирования гипотезы

Формулирование эффективной гипотезы — ключевой этап научного процесса, который требует внимания к деталям, опоры на существующие знания и четкого понимания целей исследования.

Шаг 1. Определите исследовательскую проблему: начните с четкого описания проблемы или вопроса, который вы хотите решить. Это основа, на которой будет строиться гипотеза. Задайте себе вопросы: «Что я хочу узнать?» и «Почему это важно?». Проблема должна быть достаточно узкой, чтобы исследование было выполнимо, но значимой для науки или практики.

Например:

Проблема: «Как добавление растительных волокон влияет на текстуру хлеба?».

Почему важно: улучшение текстуры может повысить потребительский спрос на хлеб с высоким содержанием клетчатки. Ошибка: слишком общий вопрос, который не дает фокуса для гипотезы.

Шаг 2. Изучите существующие данные и теории: проведите обзор литературы, чтобы понять, что уже известно об этой проблеме, чтобы иметь возможность обосновать гипотезу и избежать повторения очевидного в своем исследовании. Ищите пробелы в существующем знании на тему или противоречия в данных — это идеальная основа для гипотезы. Например: согласно существующим исследованиям, добавление инулина (растительного волокна) увеличивает вязкость теста, но его влияние на мягкость готового хлеба изучено недостаточно. Пробел в существующем знании: неясно, улучшает ли инулин мягкость хлеба после выпечки. Ошибка: игнорирование уже опубликованных исследований может привести к гипотезе, которая уже доказана или опровергнута. Например, «Инулин делает тесто вязким» — это уже факт, а не гипотеза.

Шаг 3. Определите переменные: выделите независимую переменную (то, что вы изменяете), зависимую переменную (то, что вы измеряете) и контролируемые переменные (то, что остается постоянным). Переменные должны быть измеримыми и конкретными.

Например:

Независимая переменная: концентрация инулина в тесте (0 %, 5 %, 10 %).

Зависимая переменная: мягкость хлеба (измеряется с помощью текстурного анализа, Н/мм<sup>2</sup>).

Контролируемые переменные: температура выпечки (200°C), время (30 мин), тип муки (пшеничная высшего сорта).

Ошибка: нечеткие переменные, например, «качество хлеба» вместо «мягкость», делают гипотезу расплывчатой и непроверяемой.

Шаг 4. Выберите тип гипотезы: решите, какой тип гипотезы подходит вашему исследованию. Используйте нулевую гипотезу для строгих статистических тестов, а направленную — если у вас есть основания предсказать результат.

Например:

Нулевая гипотеза ( $H_0$ ): «Добавление инулина не влияет на мягкость хлеба».

Альтернативная гипотеза ( $H_1$ ): «Добавление инулина изменяет мягкость хлеба».

Направленная гипотеза: «Добавление 5 % инулина увеличивает мягкость хлеба на 20 %».

Ненаправленная гипотеза: «Концентрация инулина влияет на мягкость хлеба».

Ошибка: выбор гипотезы неподходящего типа, например, ненаправленная гипотеза в исследовании с четким ожидаемым эффектом, снижает точность и эффективность дизайна исследования.

Шаг 5. Сформулируйте гипотезу: запишите утверждение, которое связывает переменные и отвечает требованиям: конкретность (указывает, что и как измеряется), проверяемость (можно подтвердить или опровергнуть с помощью данных), простота (избегает лишних деталей). Используйте формулу: «Если [независимая переменная], то [зависимая переменная]».

Пример: «Если добавить 5 % инулина в тесто, то мягкость хлеба увеличится на 20 % по сравнению с контрольным образцом» (конкретно указаны переменные, измеримый результат и основа для эксперимента).

Шаг 6. Проверьте гипотезу на выполнимость: убедитесь, что в наличии все необходимые ресурсы (оборудование, время, образцы), методы для проверки гипотезы реализуемы, ответив на вопросы: «Возможно ли измерить зависимую переменную?» и «Возможно ли контролировать условия проведения исследования?».

Например: для проверки гипотезы про инулин необходимо провести текстурный анализатор для измерения мягкости хлеба и иметь доступ к инулину. Если оборудования нет, гипотезу нужно переформулировать, на-

пример, заменить мягкость на субъективную оценку потребителей.

Ошибка: Формулирование гипотезы, проверка которой требует недоступных исследователю методов, например, «Инулин меняет молекулярную структуру хлеба», если нет доступа к спектрометру.

Шаг 7. Протестируйте и уточните гипотезу: проведите пилотное исследование или мысленный эксперимент, чтобы проверить, работает ли гипотеза. При необходимости уточните формулировку.

Совет: если результаты пилотного теста неоднозначны, добавьте больше специфики.

Например: пилотный тест показал, что добавление 5 % инулина в тесто увеличивает мягкость хлеба, но эффект зависит от влажности теста. Уточненная гипотеза: «Если добавить 5 % инулина в тесто с влажностью 60 %, то мягкость хлеба увеличится на 20 %».

Ошибка: игнорирование пилотных данных может привести к гипотезе, которая не учитывает важные факторы, снижая достоверность исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формулирование гипотезы — не просто формальный этап научного исследования, но фундаментальный процесс, определяющий его успех. Четко сформулированная гипотеза направляет исследователя, обеспечивая фокус, проверяемость и воспроизводимость результатов. Однако типичные ошибки в процессе ее формирования (расплывчатость формулировок, непроверяемость гипотезы, отсутствие обоснования и новизны, или избыточная сложность) могут привести к методологическим тупикам и неоднозначным выводам. В контексте пищевой метаинженерии, где точность и инновации играют ключевую роль в создании новых продуктов и технологий, избежание этих ошибок становится особенно важным. Опираясь на конкретность, измеримость и научную базу, исследователи могут превращать гипотезы в мощный инструмент для открытий, прокладывая путь к решению глобальных вызовов (от повышения питательной ценности продуктов до устойчивого их производства). Искусство формулирования гипотезы требует не только знаний, но и дисциплины, чтобы каждое предположение становилось шагом к новому знанию, а не препятствием на этом пути.

---

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Fanelli, D. (2010). Do pressures to publish increase scientists' bias? An empirical support from US states data. *PLoS ONE*, 5(4), e10271. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010271>
- Ioannidis, J. P. A. (2005). Why most published research findings are false. *PLoS Medicine*, 2(8), e124. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0020124>
- Platt, J. R. (1964). Strong inference. *Science*, 146, 347–353. <https://doi.org/10.1126/science.146.3642.347>
- Popper, K. (1959). *The logic of scientific discovery*. Hutchinson.
- Saunders, M. N. K., Lewis, P., & Thornhill, A. (2021). *Research methods for business students* (8th ed.). Pearson Education Limited.

# Биоинформатический анализ изменений пептидного профиля молочных белков при хранении

Осама И.А. Солтан

Университет Мины,  
г. Мина, Египет

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** Ферментативные процессы, происходящие в молочных продуктах при хранении, могут приводить к изменениям белкового состава, что влияет на их качество. Ключевую роль в этих изменениях играют как эндогенные ферменты, такие как плазмин, так и бактериальные протеазы. Применение биоинформатических методов позволяет моделировать гидролиз белков и прогнозировать образование пептидов со специфическими свойствами (с конкретными органолептическими характеристиками, биологической активностью, молекулярной массой, аминокислотной последовательностью и др.).

**Цель:** Оценить изменения пептидного профиля казеинов  $\beta$ -CN,  $\alpha$ s1-CN,  $\alpha$ s2-CN и  $\kappa$ -CN при моделировании их гидролиза плазмином и термостабильной бактериальной протеазой *Pseudomonas* LBSA1.

**Материалы и методы:** Анализ последовательностей казеинов проводили с использованием базы данных UniProt. Гидролиз моделировали в BIOPEP-UWM (для плазмينا) и с помощью регулярных выражений в RStudio (для *Pseudomonas* LBSA1). Степень гидролиза (DH) рассчитывали на основе количества разорванных пептидных связей в отношении к общему числу возможных связей в белковой молекуле. Для анализа пептидных последовательностей применяли библиотеку "stringr" в RStudio. Горькие и антиоксидантные пептиды выявляли с использованием базы данных BIOPEP-UWM. Данные о молекулярной массе и изоэлектрической точке полученных пептидов извлекали с помощью библиотеки "Peptides" в RStudio.

**Результаты:** Результаты 2D-диаграмм показали различия в распределении пептидов по молекулярной массе и изоэлектрической точке в зависимости от специфичности ферментов. В комбинированной модели гидролиза идентифицировано 4 горьких пептида и 3 вида горьких аминокислот, а также 6 антиоксидантных пептидов.

**Выводы:** Биоинформатическое моделирование позволяет прогнозировать ферментативные изменения белков в молочных продуктах, их влияние на качество, а также повышать эффективность проводимых в этом поле экспериментов. Полученные данные могут использоваться для разработки подходов к оценке хранения молочных продуктов и идентификации маркеров качества.

**Ключевые слова:** биоинформатика; молочные белки; пептидный профиль; хранение молочных продуктов; ферментативная порча

## Корреспонденция:

Осама И.А. Солтан

E-mail: usama.soultan@mu.edu.eg

## Конфликт интересов:

автор сообщает  
об отсутствии конфликта  
интересов.

**Поступила:** 09.10.2024

**Принята:** 15.03.2025

**Опубликована:** 31.03.2025

**Copyright:** © 2025 Автор



Для цитирования: Солтан, О.И. (2025). Биоинформатический анализ изменений пептидного профиля молочных белков при хранении. FOOD METAENGINEERING, 3(1), 17-32. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.79>

# Bioinformatic Analysis of Changes in the Peptide Profile of Dairy Proteins During Storage

Osama I.A. Soltan

Minia University, Minia, Egypt

## ABSTRACT

**Introduction:** Enzymatic processes occurring in dairy products during storage can lead to changes in protein composition, affecting products' quality. Key players in these changes include endogenous enzymes, such as plasmin, and bacterial proteases like the heat stable protease from *Pseudomonas* LBSA1. The application of bioinformatic methods enables the modeling of protein hydrolysis and prediction of peptide formation with specific properties (e.g., organoleptic characteristics, bioactivity, molecular weight, amino acid sequence).

**Purpose:** To evaluate changes in the peptide profiles of  $\beta$ -CN,  $\alpha$ s1-CN,  $\alpha$ s2-CN, and  $\kappa$ -CN caseins during simulated hydrolysis by plasmin and the heat stable bacterial protease *Pseudomonas* LBSA1.

**Materials and Methods:** Casein sequences were analyzed using the UniProt database. Hydrolysis was modeled using BIOPEP-UWM (for plasmin) and regular expressions in RStudio (for *Pseudomonas* LBSA1). The degree of hydrolysis (DH) was calculated as the ratio of cleaved peptide bonds to the total possible bonds in the protein. Peptide sequences were analyzed using the "stringr" library in RStudio. Bitter and antioxidant peptides were identified using the BIOPEP-UWM database. Molecular weight and isoelectric point data were obtained via the "Peptides" library in RStudio.

**Results:** 2D diagrams revealed distinct distributions of peptides based on molecular weight and isoelectric point, dependent on enzyme specificity. In the combined hydrolysis model, 4 bitter peptides, 3 types of bitter amino acids, and 6 antioxidant peptides were identified.

**Conclusion:** Bioinformatic modeling enables the prediction of enzymatic changes in milk proteins during storage, their impact on quality, and enhances the efficiency of related experiments. These findings may support the development of approaches for assessing dairy product storage conditions and identifying quality markers.

**Keywords:** bioinformatics; milk proteins; peptide profile; storage of dairy products; enzymatic spoilage

## Correspondence:

Osama I.A. Soltan

E-mail: [usama.soultan@mu.edu.eg](mailto:usama.soultan@mu.edu.eg)

## Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

**Received:** 09.10.2024

**Accepted:** 15.03.2024

**Published:** 31.03.2025

**Copyright:** © 2025 The Author



**To cite:** Soltan, O.I. (2025). Bioinformatic analysis of changes in the peptide profile of dairy proteins during storage. *FOOD METAENGINEERING*, 3(1), 17-32. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.79>

## ВВЕДЕНИЕ

Сохранение качества молочных продуктов в течение длительного срока остаётся актуальной задачей науки и промышленности (Muir, 2011; Fan et al., 2023). Различные факторы, такие как химические, биохимические и микробиологические процессы, могут приводить к деградации компонентов молочных продуктов и формированию пороков вкуса, консистенции и др. Так, Crudden et al. (2005) отмечают, что только активность плазмينا в молоке-сырье влияет на ухудшение последующей свертываемости сычужным ферментом при производстве сыра и творога; снижение выхода сыра; загустевание УВТ молока, что также подтверждается в исследовании Chavan et al., 2011. Химическая и биохимическая порча чаще всего активируется при повышенных температурах хранения, ускоряется окисление липидов, реакция Майяра и ферментативные процессы (Fox et al., 2015; Lu & Wang, 2017; Fan et al., 2023). Микробиологическая порча может быть инициирована даже при низких температурах, поскольку психротрофные микроорганизмы способны сохранять жизнедеятельность и продуцировать внеклеточные термостабильные ферменты. Эти ферменты, как и плазмин, остаются активными даже после пастеризации и ультрапастеризации, что делает их ключевым фактором порчи молока при хранении в результате протеолиза белков, в основном казеинов (Muir, 2011; Fox et al., 2015). При этом эндогенные ферменты, такие как плазмин, изначально присутствуют в молоке и их активность регулируется балансом активаторов (сериновые протеазы, такие как тканевой и урокиназный активаторы плазминогена) и ингибиторов (белки плазмы, такие как ингибиторы активаторов плазминогена PAI-1 и PAI-2, а также  $\alpha$ 2-антиплазмин, специфически связывающий плазмин), тогда как экзогенные ферменты, продуцируемые микроорганизмами, обладают большей устойчивостью к термической обработке и часто имеют более широкий спектр специфичности (Fox et al., 2015). В аспекте негативного действия плазмينا на качество молока Chavan et al. (2011) также подчеркнули, что температурная обработка изменяет баланс активаторов и ингибиторов фермента в пользу увеличения активаторов, инициируя деградационные процессы.

Современные методы протеомики и биоинформатики дают возможность эффективно моделировать протеолиз и анализировать его влияние на свойства белков. Такие инструменты как BIOPEP UWM, PeptideRanker,

AllerTOP, ToxinPred и др., используются для моделирования гидролиза белков различными ферментами, прогнозирования образования биологически активных пептидов, а также оценки их органолептических характеристик, аллергенности и токсичности (Pooja et al., 2017; Zhang et al., 2020; Kruchinin & Bolshakova, 2022). Эти методы оптимизируют планирование экспериментов и сокращают трудозатраты, что делает проверку гипотез более эффективной. Так, в работе Kruchinin et al., 2023 применение *in silico* подходов позволило спрогнозировать и оптимизировать процесс получения биоактивных пептидов из молочной сыворотки без необходимости проведения обширных лабораторных экспериментов на первоначальных этапах исследования. Схожее решение было реализовано и другими учеными для широкого круга субстратов получения биоактивных пептидов (Panjaitan et al., 2018; Kartal et al., 2020; Iram et al., 2022). В обзорном исследовании Barati et al. (2024) изучен вопрос применения *in silico* в качестве инструмента для решения задач, связанных с иммобилизацией ферментов, и отдельно выделены следующие биоинформатические приложения: ПО для моделирования молекулярной динамики, сервер предсказания сайтов связывания ионов металлов, метод анализа структуры и поверхности ферментов и др. При анализе литературы также выявлено, что *in silico* методы мало используются для прогнозирования порчи продуктов и оценки их безопасности. Выявленные немногочисленные исследования в данном аспекте были направлены на анализ бактериальных сообществ и их метаболической активности с использованием геномных и метабеномных данных *in silico* (Remenant et al., 2015); поиск ферментов, позволяющих разрушить афлатоксины в продуктах питания, являющихся угрозой безопасности продуктов питания и кормов (Dellaflora et al., 2017); оценку связывания веществ упаковки молока, способных к миграции, с пищеварительными ферментами (Xiong et al., 2024); изучение и прогнозирование механизмов бактериальной порчи молока *Pseudomonas* spp., а также на рассмотрение стратегий ее предотвращения с помощью ингибиторов кворум-сенсинга посредством *in silico* в том числе (Quintieri et al., 2021).

Сложность реализации *in silico* подхода в аспекте порчи молочных продуктов может быть связана с тем, что для оценки пептидного профиля после воздействия термостабильных ферментов психротрофных микроорганизмов требуется предварительная идентификация самих ферментов. Их включение в биоинформатические



базы данных или специализированное программное обеспечение затруднено из-за ограниченного количества данных о специфичности этих ферментов, что усложняет их классификацию и моделирование. Однако, некоторые исследования уже предпринимали попытки охарактеризовать эти ферменты. Так, согласно Yan et al. (1985), внеклеточные протеазы *Bacillus coagulans*, *Bacillus sp.*, *Bacillus subtilis* и *Pseudomonas fluorescens* относились к металлопротеазам, причём фермент *Pseudomonas fluorescens* дополнительно проявлял трипсиноподобную активность. В свою очередь Baug et al. (2015) отметили, что по результатам их исследования, в котором они анализировали 231 выделенный штамм из сырого молока, ключевыми продуцентами термостабильных протеаз являются *Pseudomonas spp.* В работе Matéos et al. (2015) авторы идентифицировали и охарактеризовали внеклеточную протеазу, продуцированную *Pseudomonas* LBSA1, выделенного из сырого молока, которая относилась также к классу металлопротеаз, и семейству серрализинов. Данная протеаза была специфична только к казеинам ( $\alpha$ 1-,  $\beta$ - и  $\kappa$ -CN), при этом в P1-позиции (N-конце) она предпочтительно гидролизовала связь после аргинина, лизина, гистидина, тирозина, фенилаланина, триптофана, а в P1'-позиции (C-конце) перед валином, метионином, фенилаланином, тирозином, гистидином и глутамином.

Таким образом, целью данной работы стала разработка подхода, объединяющего *in silico* моделирование и экспериментальные данные в изучении процессов порчи молочных продуктов. В рамках исследования был реализован гидролиз казеинов ( $\alpha$ 1-,  $\alpha$ 2-,  $\beta$ - и  $\kappa$ -CN) одной из идентифицированных протеаз с описанной специфичностью (*Pseudomonas* LBSA1), а также плазмином. Моделирование гидролиза казеинов плазмином проводилось с использованием BIOPEP-UWM, а гидролиз термостабильной протеазой *Pseudomonas* LBSA1 — с применением автоматизированного поиска подходящих аминокислотных сайтов в среде RStudio. В работе определены молекулярные массы, изоэлектрическая точка, а также горечь и антиоксидантная активность образовавшихся продуктов расщепления.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Исследуемые белки

Данные о последовательности белков были получены в базе данных UniProt. Номера доступа исследуемых белков в базе данных UniProt соответствуют для  $\alpha$ 1-CN — P02662; для  $\alpha$ 2-CN — P02663; для  $\beta$ -CN — P02666; для  $\kappa$ -CN — P02668. Для анализа были взяты данные о последовательности без сигнального пептида.

### Моделирование гидролиза

Моделирование гидролиза  $\beta$ -CN и  $\alpha$ 2-CN плазмином (EC 3.4.21.7) осуществляли с использованием аналитического инструмента базы данных BIOPEP-UWM “enzyme(s) action”;  $\beta$ -CN,  $\alpha$ 1-CN и  $\kappa$ -CN бактериальной протеазой *Pseudomonas* LBSA1 (Matéos et al., 2015) — с использованием регулярных выражений, учитывающих специфичность фермента к P1- и P1'-позициям, реализованных в среде RStudio. Для обработки последовательностей применяли библиотеку “stringr”.

### Расчет степени гидролиза (DH)

Степень гидролиза (DH) определяли на основе количества образованных пептидов и длины исходной белковой последовательности. Для расчёта использовали формулу:

$$DH = \frac{d}{N} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $d$  — количество пептидных связей, расщеплённых ферментом, а  $N$  — общее количество аминокислотных остатков в исходном белке.

Анализ DH выполняли в RStudio, используя регулярные выражения для определения разрывов пептидных связей и последующее вычисление их числа. Обработка данных и расчёт DH проводились для каждого фермента и белка отдельно.

### Анализ характеристик и свойств пептидов

Выявление горьких и антиоксидантных пептидов в полученном списке пептидов в модели гидролиза осуществляли с использованием базы данных BIOPEP-UWM. Извлечение данных о молекулярной массе и изоэлектрической точке пептидов выполняли в RStudio с использованием библиотеки “Peptides”. Полный перечень



продуктов расщепления, полученных в результате моделирования, включая их молекулярные массы и изоэлектрические точки извлечен в отдельную таблицу и представлен в дополнительном материале к статье (Приложение 1).

## Визуализация данных

Для наглядного представления результатов гидролиза и характеристик пептидов использовали 2D-гистограммы ("heatmap") и диаграммы рассеяния ("scatter plot"), построенные в RStudio с использованием библиотеки ggplot2. 2D-гистограмма отображает распределение пептидов по молекулярной массе и изоэлектрической точке, основана на подсчёте количества пептидов в каждой ячейке гистограммы и реализована с использованием функции "geom\_hex".

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Моделирование гидролиза плазмином

В результате гидролиза плазмином большая часть продуктов расщепления сосредоточена в диапазоне изоэлектрических точек (pI) 9–11. Основные продукты имеют молекулярный вес до 2000 Да, однако также присутствуют фрагменты в диапазоне 2000–3000 Да и единичные продукты с молекулярной массой 5000–6500 Да (Рисунок 1).

В совокупной модели гидролиза  $\beta$ -CN и  $\alpha$ s2-CN было высвобождено 8 горьких пептидов и 2 вида аминокислот, 5 пептидов с аннотированной антиоксидантной активностью (Таблица 1). DH для  $\alpha$ s2-CN составила 14,6%, для  $\beta$ -CN — 7,2%.

Рисунок 1

**Распределение продуктов расщепления, полученных в результате гидролиза плазмином  $\alpha$ s2-CN и  $\beta$ -CN**

Figure 1

**Distribution of Hydrolysis Products Generated from  $\alpha$ s2-CN and  $\beta$ -CN by Plasmin in the Model**

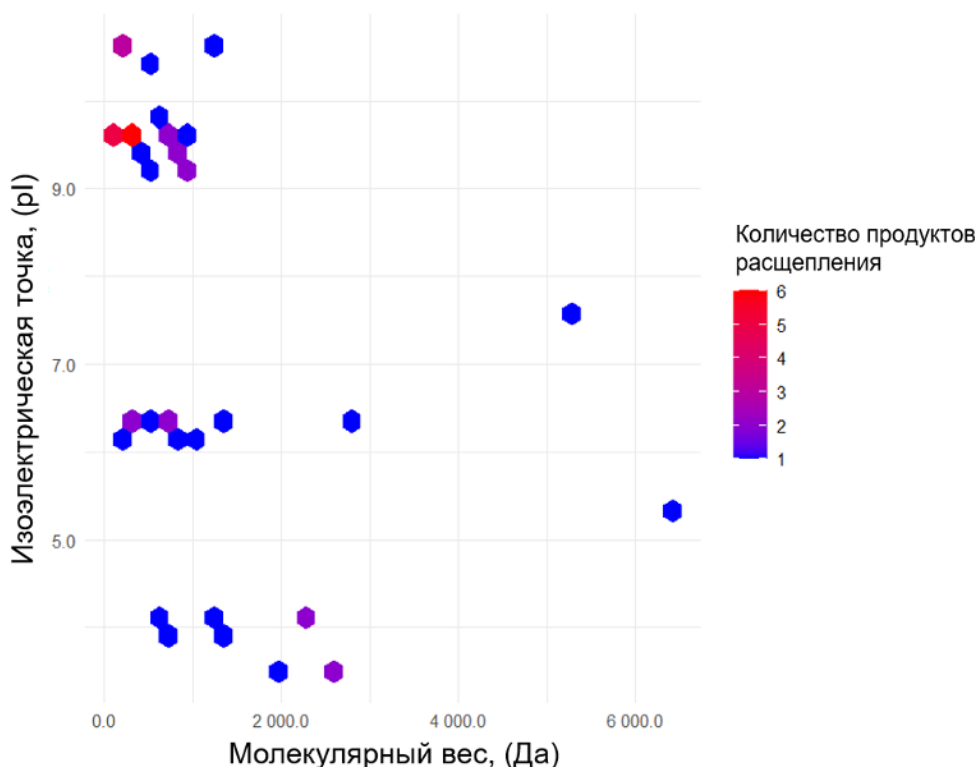


Таблица 1  
 Характеристика продуктов расщепления в модели гидролиза  $\alpha$ 2-CN,  $\beta$ -CN

Table 1

Properties of Hydrolysis Products Generated from  $\alpha$ 2-CN and  $\beta$ -CN by Plasmin in the Model

Белок	Пептиды и аминокислоты	Горечь	Антиоксидантное свойство	Количество продуктов расщепления
$\alpha$ 2-CN, $\beta$ -CN	K	+		5
	R	+		2
$\alpha$ 2-CN	FALPQYLK	+	+	1
	YL	+	+	1
	YQK		+	1
$\beta$ -CN	AVPYYPQR		+	1
	GPFPIIV	+		1
	VLPVPQK		+	1

Моделирование гидролиза бактериальной протеазой

По сравнению с плазмином, гидролиз бактериальной протеазой приводит к более равномерному распределению продуктов по pI (в диапазоне от 5 до 12, тогда как у плазмина основная масса сосредоточена около 9–11). Кроме того, большинство продуктов расщепления сосредоточено в диапазоне молекулярных масс до 2000 Да, с небольшим числом фрагментов в интервале 2000–3000 Да и единичными пептидами выше 5000 Да (Рисунок 2).

В совокупной модели гидролиза  $\alpha$ 1-CN,  $\beta$ -CN и  $\kappa$ -CN были высвобождены 1 пептид и 1 вид аминокислоты, обладающих горьким вкусом; 3 пептида с аннотированной антиоксидантной активностью (Таблица 2). DH для  $\alpha$ 1-CN составила 10,1%, для  $\beta$ -CN — 4,8%, для  $\kappa$ -CN — 6,6%.

Рисунок 2  
 Распределение продуктов расщепления, полученных в результате гидролиза бактериальной протеазой *Pseudomonas* LBSA1  $\alpha$ 1-CN,  $\beta$ -CN и  $\kappa$ -CN  
 Figure 2  
 Distribution of Hydrolysis Products Generated from  $\alpha$ 1-CN,  $\beta$ -CN, and  $\kappa$ -CN by Bacterial Protease in the Model

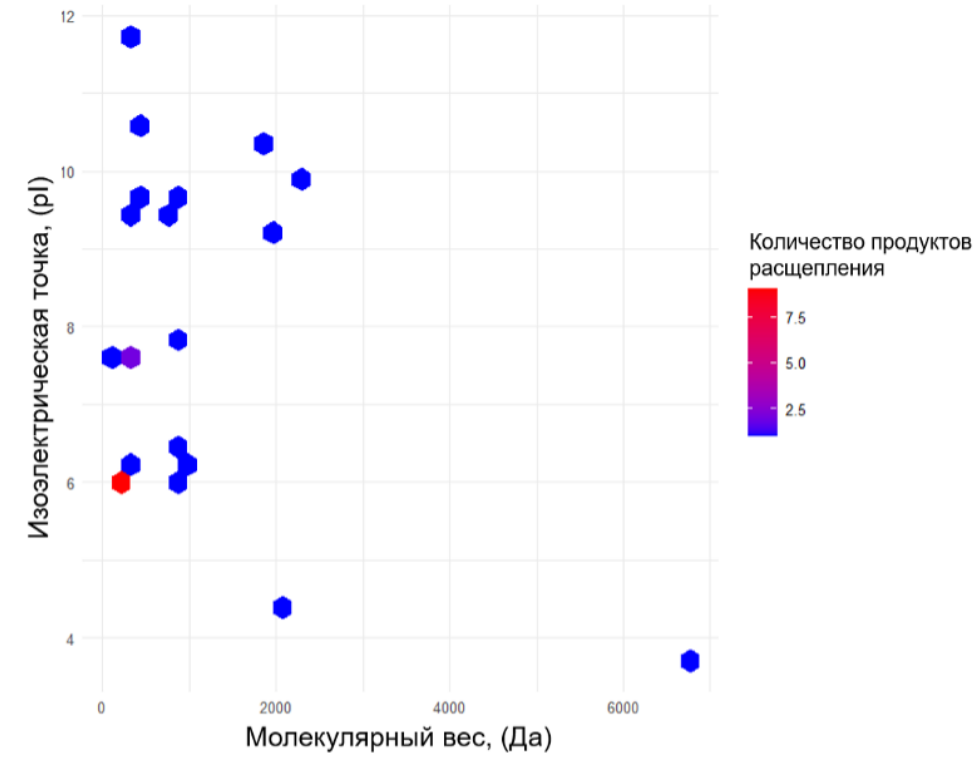


Таблица 2

Характеристика продуктов расщепления в модели гидролиза  $\alpha$ 1-CN,  $\beta$ -CN и  $\kappa$ -CN

Table 2

Properties of Hydrolysis Products Generated from  $\alpha$ 1-CN,  $\beta$ -CN, and  $\kappa$ -CN by Bacterial Protease in the Model

Белок	Пептиды и аминокислоты	Го-речь	Антиоксидантное свойство	Количество продуктов расщепления
$\alpha$ 1-CN, $\beta$ -CN, $\kappa$ -CN	F	+		5
$\alpha$ 1-CN	HIQKEDVPSEK		+	1
$\beta$ -CN	VKEAMARK	+	+	1
$\kappa$ -CN	HRPHLSF		+	1
	YIPIQY		+	1

Моделирование комбинированного гидролиза

Специфичность плазмина частично входит в специфичность бактериальной протеазы *Pseudomonas* LBSA1, поскольку обе ферментные системы разрезают пептидные связи после остатков аргинина (R) и лизина (K). Однако бактериальная протеаза накладывает дополнительные ограничения, требуя наличия специфичных аминокислот в P1>-позиции. Эти различия находят отражение в распределении пептидов по изоэлектрической точке и молекулярной массе (Рисунок 3).

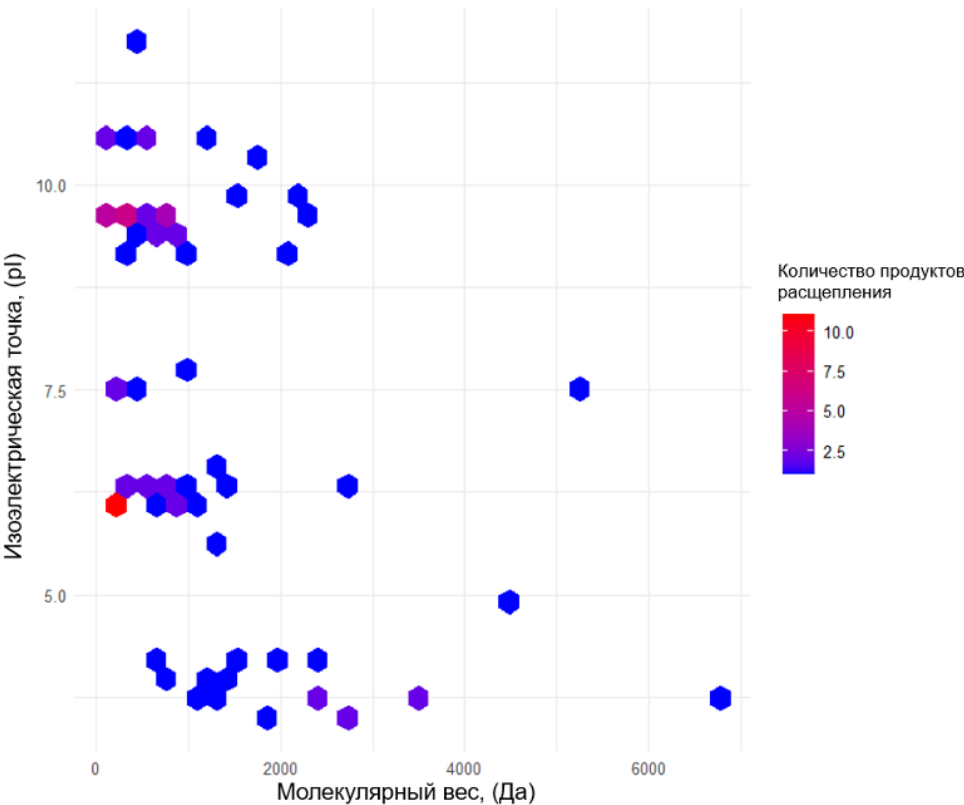
Комбинированный гидролиз плазмином и бактериальной протеазой обеспечивает образование максимального числа продуктов расщепления с наиболее

Рисунок 3

Распределение продуктов расщепления, полученных в результате комбинированного гидролиза плазмином  $\alpha$ 2-CN,  $\beta$ -CN и бактериальной протеазой *Pseudomonas* LBSA1  $\alpha$ 1-CN,  $\beta$ -CN и  $\kappa$ -CN

Figure 3

Distribution of Hydrolysis Products from Combined Action of Plasmin on  $\alpha$ 2-CN and  $\beta$ -CN, and Bacterial Protease from *Pseudomonas* LBSA1 on  $\alpha$ 1-CN,  $\beta$ -CN, and  $\kappa$ -CN



широким диапазоном изоэлектрических точек (pI от 2,5 до 12,5). При этом наблюдается наиболее варибельное распределение образовавшихся фрагментов по молекулярной массе, охватывающее диапазоны до 2000 Да, 2000–4000 Да и 5000–6500 Да. Полученные результаты демонстрируют, что совместное действие ферментов способствует формированию более сложного и разнообразного пептидного профиля, обусловленного различиями в субстратной специфичности ферментов и более глубоким уровнем гидролиза белков.

В комбинированной модели гидролиза всех четырех белков, включающей расщепление  $\alpha$ 2-CN и  $\beta$ -CN плазмином, а также  $\alpha$ 1-CN,  $\beta$ -CN и  $\kappa$ -CN бактериальной протеазой *Pseudomonas* LBSA1, были высвобождены 3 вида аминокислот и 4 пептида, обладающих горьким вкусом, а также 6 пептидов с аннотированной антиоксидантной активностью (Таблица 3).

Таблица 3

Характеристика продуктов расщепления в модели комбинированного гидролиза

Table 3

Properties of Hydrolysis Products Generated by Combined Plasmin and Bacterial Protease Action

Белок	Пептиды и аминокислоты	Горечь	Антиоксидантное свойство	Количество продуктов расщепления
$\alpha$ 1-CN, $\beta$ -CN, $\kappa$ -CN	F	+		5
$\alpha$ 2-CN, $\beta$ -CN	K	+		5
	R	+		2
$\alpha$ 1-CN	HIQKEDVPSE		+	1
$\alpha$ 2-CN	FALPQYLK	+	+	1
	YL	+	+	1
$\beta$ -CN	VKEAMAPK	+	+	1
	GPFPPIV	+		1
$\kappa$ -CN	HRPHLSF		+	1
	YIPIQY		+	1

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прогнозирование изменений молочных белков при хранении является важной задачей пищевой науки, поскольку их деградация влияет на текстуру, вкус и питательную ценность продуктов. В ранних исследованиях Chavan et al. (2011), Dalabasmaz et al. (2019), Class et al. (2024) отмечено, что плазмин и бактериальные

протеазы играют ключевую роль в этих процессах, однако большинство работ основываются на экспериментальных данных, тогда как биоинформатические методы остаются менее изученными в этом контексте.

Результаты проведенного в данной работе моделирования коррелируют с ранее проведенными эмпирическими исследованиями, что свидетельствует о целесообразности применения биоинформатического подхода в вопросе прогнозирования и анализа ферментативной порчи пищевых продуктов. Так, пептиды FALPQYLK и AVPYPQR, обнаруженные в модели гидролиза  $\alpha$ 2-CN и  $\beta$ -CN плазмином были описан в работе Nath et al. (2022) в аспекте расщепления казеина трипсином со схожей специфичностью. Авторы также подчеркнули наличие горечи и антиоксидантные свойства пептидов, которые были выявлены в том числе при моделировании в настоящем исследовании. Согласно Nath et al. (2022), горечь, как и антиоксидантные свойства пептидов в основном связаны с гидрофобностью концевых аминокислот. Другие пептиды (EAMAPK, EMPFPK) и антиоксидантный пептид AVPYPQR, выявленные в модели гидролиза плазмином, были также представлены в работе Sedaghati et al. (2016). Для AVPYPQR авторы также определили антибактериальную активность со значением минимальной ингибирующей концентрации (MIC) против *Escherichia coli* 40 мг/мл, которая в настоящем исследовании не оценивалась.

Продукты гидролиза, обнаруженные при моделировании бактериальной протеазой *Pseudomonas* LBSA1, а именно HIQKEDVPSE, HPIK также пересекаются с данными других работ (Gupta et al., 2010; Stuknytė et al., 2016; Nath et al., 2022). При этом, в работе Stuknytė et al. (2016) изучали протеолитическую активность термостабильных ферментов *Pseudomonas fluorescens* PS19, а в исследовании Gupta et al. (2010) анализировали антиоксидантные пептиды сыра. Verhegghe et al. (2021) изучали гидролиз молока шестью бактериальными штаммами *Pseudomonas fluorescens* MB4999, *Pseudomonas* sp. MB4988, *Pseudomonas fluorescens* MB5000, *Pseudomonas* sp. MB4996, *Pseudomonas lundensis* MB4984 и *Pseudomonas fragi* MB4972, в результате чего выявили пептиды EPVLPV, VSKVKEAM и GPFPPIV. В то же время несмотря на то, что протеаза *Pseudomonas* LBSA1 в исследовании Mateos et al. (2015) показала значительное сходство по аминокислотной последовательности с протеазой штамма *P. fluorescens* F (93%), при проведении нашего эксперимента по гидролизу белков про-

тезой *Pseudomonas* LBSA1 перечисленные выше маркерные пептиды выявлены не были. Данный факт может указывать на наличие различий в субстратной специфичности или механизме протеолитического действия между близкородственными штаммами, что требует дальнейших исследований для более глубокого понимания протеолитического потенциала отдельных представителей рода *Pseudomonas*.

В качестве маркеров порчи молока Class et al. (2024) были выявлены пептиды PLW и FSDIPNPIGSENSEK из  $\alpha$ 1-CN, которые в рамках настоящего исследования детектированы не были. Так как авторы ссылаются на возможное совокупное влияние эндогенных ферментов (плазмина, катепсина D) и бактериальных протеаз, различие их результатов от продуктов гидролиза в данной работе вероятно связано с большим разнообразием ферментного комплекса, находящегося в молоке, содержащего не только плазмин и, протеазу *Pseudomonas* LBSA1, а и другие бактериальные протеазы. В исследовании Verhegghe et al. (2021), посвящённом разработке быстрого метода выявления бактериальной протеолитической активности в сыром молоке, среди шести пептидов-маркеров был выделен пептид  $\beta$ -казеина с последовательностью GPFPIIV, также идентифицированный в нашей модели, однако образованный под действием плазмينا. Авторы установили, что в образцах с высоким уровнем термоустойчивых бактериальных протеаз содержание этого и некоторых других пептидов значительно возросло (Verhegghe et al., 2021). Напротив, при моделировании гидролиза протеазой штамма *Pseudomonas* LBSA1 в текущей работе данный пептид не был обнаружен, что может объясняться особенностями субстратной специфичности протеаз различных штаммов *Pseudomonas*, в частности предпочтением глицина в P1-позиции (C-конец) или аргинина в P1-позиции (N-конец), а также возможной последующей активацией плазминогена.

Несмотря на то, что в эксперименте Verhegghe et al. (2021) проводилась тепловая обработка (95°C, 8 мин 45 сек) с целью исключения влияния плазмينا, дополнительные исследования, подтверждающие полную инактивацию плазминовой системы, авторами не проводились. Между тем, согласно данным Van Asselt et al. (2008), даже экстремальные условия тепловой обработки (180°C, 0,2 сек), предшествующие нагреванию при 80°C до 4 минут, не гарантируют полной инактивации плазминовой активности в молоке.

Кроме того, France et al. (2021) отмечают возможность сохранения активаторов плазминогена после термической обработки, способных запускать гидролиз белков при последующем хранении молока, при этом D-значение инактивации таких активаторов составляет 16 секунд при 140°C. Совокупность приведенных данных указывает на сложность исследования воздействия отдельных факторов на пептидный профиль молока, требуя учёта комплексных взаимодействий и известной специфичности протеолитических систем. В этой связи при изучении протеолиза молочных белков необходимо оценивать совокупный характер происходящих изменений и проводить дополнительные эксперименты для количественного определения вклада вторичных факторов, таких как активность плазминовой системы.

Полученные в ходе моделирования в настоящей работе 2D-диаграммы могут быть использованы в качестве инструмента для сопоставления результатов реальных экспериментов, что позволит быстрее выявлять закономерности, повышать эффективность работы с экспериментальными данными и создания «отпечатков» (fingerprints), характеризующих состояние и качество молочных продуктов. Подход, основанный на анализе пептидных и белковых «отпечатков», уже применялся в ряде исследований, включая изучение влияния термообработки и хранения на пептидный профиль молока (Meltretter и др., 2008), выявление фальсификации цельного молока добавлением сухого молока (Du et al., 2020) и анализ динамики белковых изменений в грудном молоке (Thesbjerg et al., 2023). Использование таких визуальных инструментов может облегчить интерпретацию протеомных данных, а также ускорить идентификацию ключевых пептидов, что в свою очередь усилит синергию между *in silico* моделированием и лабораторными исследованиями.

## Ограничения исследования

Моделирование в настоящем исследовании не учитывает всех факторов хранения, включая температурные колебания, белок-белковые и белок-жировые взаимодействия. Важно учитывать влияние плазминовой системы и других эндогенных ферментов, концентрация и активность которых зависят от зоотехнических факторов (породы, возраста коровы, стадии лактации и др.), а также условий технологической обработки. Представленные модели ограничены выбором протеаз, наличие данных о специфичности большего количества бакте-

риальных ферментов, вызывающих порчу в молоке, позволит сделать биоинформатический анализ более эффективным, а порчу молочных продуктов впоследствии более прогнозируемой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение биоинформатического моделирования позволило спрогнозировать гидролиз казеинов  $\beta$ -CN,  $\alpha$ s1-CN,  $\alpha$ s2-CN и  $\kappa$ -CN под действием плазмина и термостабильной бактериальной протеазы *Pseudomonas* LBSA1, что дало возможность оценить потенциальные изменения пептидного профиля молока при хранении. Полученные данные подтвердили, что данные белки являются источниками пептидов с горьким вкусом и антиоксидантной активностью, что может служить основой для разработки новых подходов к оценке качества молочных продуктов. В частности, это может включать анализ горечи и антиоксидантных свойств пептидов как индикаторов изменений, происходящих в молоке при хранении. Для проверки работоспособности этих подходов необходимы дальнейшие исследования, направленные на разработку и адаптацию чувствительных методов анализа, которые

позволят объективно оценивать влияние ферментативных процессов на органолептические и функциональные свойства молочных белков.

Частичное совпадение полученных *in silico* данных с экспериментальными результатами подтверждает перспективность этого подхода для предсказания ключевых пептидов, однако различия в специфичности ферментов требуют дополнительной валидации.

Будущие исследования могут быть направлены на идентификацию ферментных систем микроорганизмов сырого молока, расширение биоинформатических баз данных и верификацию предсказаний с использованием масс-спектрометрии. Совмещение биоинформатического моделирования с лабораторными исследованиями обеспечит более точное прогнозирование изменений белкового состава и позволит оптимизировать контроль качества молочных продуктов. Проведение обзора предметного поля по применению биоинформатики в оценке порчи пищевых продуктов позволит систематизировать существующие подходы и определить ключевые направления их дальнейшего развития.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Barati, F., Hosseini, F., Vafaei, R., Sabouri, Z., Ghadam, P., Arab, S. S., Shadfar, N., & Piroozmand, F. (2024). *In silico* approaches to investigate enzyme immobilization: A comprehensive systematic review. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 26(7), 5744–5761. <https://doi.org/10.1039/D3CP03989G>
- Baur, C., Krewinkel, M., Kranz, B., Von Neubeck, M., Wenning, M., Scherer, S., Stoeckel, M., Hinrichs, J., Stressler, T., & Fischer, L. (2015). Quantification of the proteolytic and lipolytic activity of microorganisms isolated from raw milk. *International Dairy Journal*, 49, 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2015.04.005>
- Chavan, R. S., Chavan, S. R., Khedkar, C. D., & Jana, A. H. (2011). UHT milk processing and effect of plasmin activity on shelf life: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(5), 251–268. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2011.00157.x>
- Class, L.-C., Kuhnen, G., Schmid, J., Rohn, S., & Kuballa, J. (2024). Marker peptides for indicating the spoilage of milk - Sample preparation and chemometric approaches for yielding potential peptides in a raw milk model. *Foods*, 13(20), 3315. <https://doi.org/10.3390/foods13203315>
- Crudden, A., Afoufa-Bastien, D., Fox, P. F., Brisson, G., & Kelly, A. L. (2005). Effect of hydrolysis of casein by plasmin on the heat stability of milk. *International Dairy Journal*, 15(10), 1017–1025. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2004.11.001>
- Dalabasmaz, S., Dittrich, D., Kellner, I., Drewello, T., & Pischetsrieder, M. (2019). Identification of peptides reflecting the storage of UHT milk by MALDI-TOF-MS peptide profiling. *Journal of Proteomics*, 207, 103444. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2019.103444>
- Dellaflora, L., Galaverna, G., Reverberi, M., & Dall'Asta, C. (2017). Degradation of aflatoxins by means of laccases from *trametes versicolor*: An *in silico* Insight. *Toxins*, 9(1), 17. <https://doi.org/10.3390/toxins9010017>



- Du, L., Lu, W., Zhang, Y., Gao, B., & Yu, L. (2020). Detection of milk powder in liquid whole milk using hydrolyzed peptide and intact protein mass spectral fingerprints coupled with data fusion technologies. *Food Science & Nutrition*, 8(3), 1471–1479. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1430>
- Fan, X., Wang, C., Cheng, M., Wei, H., Gao, X., Ma, M., Wang, X., & Li, Z. (2023). Markers and mechanisms of deterioration reactions in dairy products. *Food Engineering Reviews*, 15(2), 230–241. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09331-9>
- Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. H., & O'Mahony, J. A. (2015). Heat-Induced Changes in Milk. In P. F. Fox, T. Uniacke-Lowe, P. L. H. McSweeney, & J. A. O'Mahony (Eds.), *Dairy chemistry and biochemistry* (pp. 345–375). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2_9)
- France, T. C., O'Mahony, J. A., & Kelly, A. L. (2021). The plasmin system in milk and dairy products. B. A. L. Kelly & L. B. Larsen (Ред.), *Agents of change* (pp. 11–55). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55482-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55482-8_2)
- Gupta, A., Mann, B., Kumar, R., & Sangwan, R. B. (2010). Identification of antioxidant peptides in cheddar cheese made with adjunct culture *Lactobacillus casei ssp. casei* 300. *Milchwissenschaft*, 65(4), 396–399.
- Iram, D., Sansi, M. S., Zanaab, S., Vij, S., Ashutosh, & Meena, S. (2022). In silico identification of antidiabetic and hypotensive potential bioactive peptides from the sheep milk proteins - A molecular docking study. *Journal of Food Biochemistry*, 46(11). <https://doi.org/10.1111/jfbc.14137>
- Kartal, C., Kaplan Türköz, B., & Otles, S. (2020). Prediction, identification and evaluation of bioactive peptides from tomato seed proteins using *in silico* approach. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(4), 1865–1883. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00434-z>
- Kruchinin, A., & Bolshakova, E. (2022). Hybrid strategy of bioinformatics modeling (*in silico*): Biologically active peptides of milk protein. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(1), 46–57. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-46-57>
- Kruchinin, A. G., Bolshakova, E. I., & Barkovskaya, I. A. (2023). Bioinformatic modeling (In Silico) of obtaining bioactive peptides from the protein matrix of various types of milk whey. *Fermentation*, 9(4), 380. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040380>
- Lu, M., & Wang, N. S. (2017). Spoilage of milk and dairy products. *The Microbiological Quality of Food* (pp. 151–178). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100502-6.00010-8>
- Matéos, A., Guyard-Nicodème, M., Baglinière, F., Jardin, J., Gaucheron, F., Dary, A., Humbert, G., & Gaillard, J.-L. (2015). Proteolysis of milk proteins by AprX, an extracellular protease identified in *Pseudomonas* LBSA1 isolated from bulk raw milk, and implications for the stability of UHT milk. *International Dairy Journal*, 49, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2015.04.008>
- Meltretter, J., Schmidt, A., Humeny, A., Becker, C.-M., & Pischetsrieder, M. (2008). Analysis of the peptide profile of milk and its changes during thermal treatment and storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(9), 2899–2906. <https://doi.org/10.1021/jf073479o>
- Minkiewicz, P., Iwaniak, A., & Darewicz, M. (2019). BIOPEP-UWM database of bioactive peptides: Current opportunities. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(23), 5978. <https://doi.org/10.3390/ijms20235978>
- Muir, D. D. (2011). The stability and shelf life of milk and milk products. In *Food and beverage stability and shelf life* (pp. 755–778). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857092540.3.755>
- Nath, A., Eren, B. A., Zinia Zaukuu, J.-L., Koris, A., Pásztoré-Huszár, K., Szerdahelyi, E., & Kovacs, Z. (2022). Detecting the bitterness of milk-protein-derived peptides using an electronic tongue. *Chemosensors*, 10(6), 215. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10060215>
- Panjaitan, F. C. A., Gomez, H. L. R., & Chang, Y.-W. (2018). Silico analysis of bioactive peptides released from giant grouper (*Epinephelus lanceolatus*) roe proteins identified by proteomics approach. *Molecules*, 23(11), 2910. <https://doi.org/10.3390/molecules23112910>
- Pooja, K., Rani, S., Kanwate, B., & Pal, G. K. (2017). Physico-chemical, sensory and toxicity characteristics of dipeptidyl peptidase-IV inhibitory peptides from rice bran-derived globulin using computational approaches. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 23(4), 519–529. <https://doi.org/10.1007/s10989-017-9586-4>

- Quintieri, L., Caputo, L., Brasca, M., & Fanelli, F. (2021). Recent advances in the mechanisms and regulation of QS in dairy spoilage by *Pseudomonas spp.* *Foods*, 10(12), 3088. <https://doi.org/10.3390/foods10123088>
- Remenant, B., Jaffrès, E., Dousset, X., Pilet, M.-F., & Zagorec, M. (2015). Bacterial spoilers of food: Behavior, fitness and functional properties. *Food Microbiology*, 45, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.03.009>
- Sedaghati, M., Ezzatpanah, H., Mashhadi Akbar Boojar, M., Tajabadi Ebrahimi, M., & Kobarfard, F. (2016). Isolation and identification of some antibacterial peptides in the plasmin-digest of  $\beta$ -casein. *LWT - Food Science and Technology*, 68, 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.019>
- Stuknytė, M., Decimo, M., Colzani, M., Silvetti, T., Brasca, M., Cattaneo, S., Aldini, G., & De Noni, I. (2016). Extracellular thermostable proteolytic activity of the milk spoilage bacterium *Pseudomonas fluorescens* PS19 on bovine caseins. *Journal of Dairy Science*, 99(6), 4188–4195. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10894>
- Thesbjerg, M. N., Nielsen, S. D.-H., Sundekilde, U. K., Poulsen, N. A., & Larsen, L. B. (2023). Fingerprinting of proteases, protease inhibitors and indigenous peptides in human milk. *Nutrients*, 15(19), 4169. <https://doi.org/10.3390/nu15194169>
- Van Asselt, A. J., Sweere, A. P. J., Rollema, H. S., & De Jong, P. (2008). Extreme high-temperature treatment of milk with respect to plasmin inactivation. *International Dairy Journal*, 18(5), 531–538. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2007.11.019>
- Verhegghe, M., De Block, J., Heyndrickx, M., Van Coillie, E., Van Poucke, C., & Duquenne, B. (2021). Application of LC-HRMS identified marker peptides in an LC-MS/MS method for detection and quantification of heat-resistant proteolytic activity in raw milk. *International Journal of Dairy Technology*, 74(2), 286–296. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12754>
- Xiong, Z., He, Y., Guan, W., Lv, X., Chen, J., & Ma, D. (2024). Investigating the impact of common migration substances found in milk packaging on proteases: A multispectral and molecular docking approach. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 318, 124517. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124517>
- Yan, L., Langlois, B. E., O'Leary, J., & Hicks, C. L. (1985). Purification and characterization of four extracellular proteases isolated from raw milk psychrotrophs. *Journal of Dairy Science*, 68(6), 1323–1336. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(85\)80968-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(85)80968-1)
- Zhang, Y., Aryee, A. N., & Simpson, B. K. (2020). Current role of in silico approaches for food enzymes. *Current Opinion in Food Science*, 31, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.11.003>

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Полный перечень продуктов расщепления

Белок	Продукт расщепления	Молекулярный вес, Да	Изоэлектрическая точка (pI)
Модель гидролиза плазмином			
αs2-CN	ALNEINQFYQK	1367,52	6,40
αs2-CN	AMK	348,46	9,70
αs2-CN	ENLCSTFCK	1044,21	6,14
αs2-CN	EQLSTSEENSK	1251,27	3,98
αs2-CN	EVVR	501,58	6,41
αs2-CN	FALPQYLK	979,19	9,30
αs2-CN	FPQYLQYLYQGPIVLNPWDQVK	2710,13	6,32
αs2-CN	HYQK	574,64	9,30
αs2-CN	ISQR	502,57	10,55
αs2-CN	ITVDDK	689,76	4,11
αs2-CN	K	146,19	9,70
αs2-CN	K	146,19	9,70
αs2-CN	K	146,19	9,70
αs2-CN	K	146,19	9,70
αs2-CN	LNFLK	633,79	9,70
αs2-CN	LTEEEK	747,80	3,98
αs2-CN	NANEEEYSIGSSSESAEVATEEVK	2688,71	3,49
αs2-CN	NAVPIPTLNR	1195,38	10,55
αs2-CN	NMAINPSK	874,02	9,70
αs2-CN	NR	288,31	10,55
αs2-CN	NTMEHVSSSEESIISQETVK	2299,45	4,19
αs2-CN	PWIQPK	767,93	9,70
αs2-CN	QEK	403,44	6,41
αs2-CN	R	174,20	10,55
αs2-CN	TK	247,29	9,70
αs2-CN	TK	247,29	9,70
αs2-CN	TVDMESTEVFTK	1386,54	3,93
αs2-CN	TVYQHQK	903,01	9,30
αs2-CN	VIPYVR	745,92	9,35
αs2-CN	YL	294,35	6,09
αs2-CN	YQK	437,50	9,30
β-CN	AVYPQR	829,95	9,35
β-CN	DMPIQAFLLYQEPVLGPVR	2186,60	4,18
β-CN	EAMAPK	645,77	6,41
β-CN	ELEELNVPGEIVESLSSEESITR	2646,84	3,55
β-CN	EMPFPK	747,91	6,41
β-CN	FQSEEQQQTEDELQDK	1982,00	3,56
β-CN	GPFPIIV	741,93	6,10
β-CN	HK	283,33	9,70
β-CN	IEK	388,46	6,41
β-CN	IHPFAQTQSLVYPFGPIPNSLPQNIPPLTQTPVWPPFLQPEVMGVSK	5319,25	7,54
β-CN	INK	373,45	9,70
β-CN	K	146,19	9,70

Белок		Продукт расщепления	Молекулярный вес, Да	Изоэлектрическая точка (pI)
β-CN	R		174,20	10,55
β-CN	VK		245,32	9,70
β-CN	VLPVPQK		779,98	9,70
β-CN	YPVEPFTEQSRLTLDVENLHLLPLLSQSWMHQPHQLPPTVMFPQSVLSLSQSK		6362,32	5,36
Модель гидролиза бактериальной протеазой				
αs1-CN	F		165,19	6,10
αs1-CN	F		165,19	6,10
αs1-CN	F		165,19	6,10
αs1-CN	H		155,16	7,55
αs1-CN	HIQKEDVPSEK		1 337,46	5,55
αs1-CN	HPIK		493,61	9,70
αs1-CN	QF		293,32	6,10
αs1-CN	QGLPQEVNENLLR		1 622,84	4,26
αs1-CN	QLDAYPSGAW		1 107,19	3,75
αs1-CN	QMEAESISSSEIVPNSVEQK		2 321,50	3,71
αs1-CN	RPK		399,49	11,65
αs1-CN	VAPFPEVFGKEK		1 347,58	6,53
αs1-CN	VNELSKDIGSESTEDQAMEDIK		2 438,60	3,73
αs1-CN	VPLGTQYTDAPSFSDIPNPIGSENSEKTTMPLW		3 593,96	3,74
αs1-CN	VPQLEIVPNSAEERLHSMKEGIHAQQKEPMIGVGNQELAY		4 415,02	4,81
αs1-CN	Y		181,19	6,09
αs1-CN	Y		181,19	6,09
αs1-CN	Y		181,19	6,09
αs1-CN	YK		309,37	9,30
αs1-CN	YLGYLEQLRLKK		1 637,00	9,93
αs1-CN	YPELFR		823,95	6,40
β-CN	F		165,19	6,10
β-CN	HKEMPFPK		1 013,22	9,54
β-CN	MH		286,35	7,55
β-CN	QEPVLGPVRGPFPIIV		1 718,07	6,41
β-CN	QPH		380,40	7,55
β-CN	QPLPPTVMFPQSVLSLSQSK		2 281,70	9,70
β-CN	QSEEQQTQTEDELQDKIHFPFAQTQSLVYFPFGPIPNLSLQNIPLTQTPVVVPPFLQPEVMGVSK		7 136,06	3,99
β-CN	RELEELNVPGEIVESLSSEESITRINKIEK		3 657,09	4,36
β-CN	VKEAMAPK		873,08	9,54
β-CN	VLPVPQKAVPYQRDMPIQAFLLY		2 784,36	9,15
β-CN	YPVEPFTEQSRLTLDVENLHLLPLLSQSW		3 467,92	3,78
κ-CN	F		165,19	6,10
κ-CN	FSDKIAK		807,95	9,54
κ-CN	HPHPHLSF		971,09	7,81
κ-CN	MAIPPKKNQDKTEIPTINTIASGEPTSTPTTEAVESTVATLEDSPEVIESPPEINTVQVTSTAV		6707,43	3,77
κ-CN	QEQNQEQPIRCEKDER		2030,16	4,30
κ-CN	QQKPVALINNQLFPYPY		2033,36	9,15
κ-CN	QVLSNTVPAKSCQAQPTTMAR		2231,57	9,83
κ-CN	VLSR		473,57	10,55

Белок		Продукт расщепления	Молекулярный вес, Да	Изоэлектрическая точка (pI)
κ-CN	Y		181,19	6,09
κ-CN	YAKPAAVRSPAQILQW		1799,11	10,45
κ-CN	YIPIQY		795,93	6,09
κ-CN	YPSYGLNY		976,05	6,08
Комбинированная модель гидролиза				
αs1-CN	F		165,19	6,10
αs1-CN	F		165,19	6,10
αs1-CN	F		165,19	6,10
αs1-CN	H		155,16	7,55
αs1-CN	HIQKEDVPSEK		1337,46	5,55
αs1-CN	HPIK		493,61	9,70
αs1-CN	QF		293,32	6,10
αs1-CN	QGLPQEVNENLLR		1622,84	4,26
αs1-CN	QLDAYPSGAW		1107,19	3,75
αs1-CN	QMEAEISSSEEIVPNSVEQK		2321,50	3,71
αs1-CN	RPK		399,49	11,65
αs1-CN	VAPFPEVFGKEK		1347,58	6,53
αs1-CN	VNELSKDIGSESTEDQAMEDIK		2438,60	3,73
αs1-CN	VPLGTQYTDAPSFSDIPNPIGSENSEKTTMPLW		3593,96	3,74
αs1-CN	VPQLEIVPNSAEERLHSMKEGIHAQQKEPMIGVNPQELAY		4415,02	4,81
αs1-CN	Y		181,19	6,09
αs1-CN	Y		181,19	6,09
αs1-CN	Y		181,19	6,09
αs1-CN	YK		309,37	9,30
αs1-CN	YLGYLEQLRLKK		1637,00	9,93
αs1-CN	YPELFR		823,95	6,40
αs2-CN	ALNEINQFYQK		1367,52	6,40
αs2-CN	AMK		348,46	9,70
αs2-CN	ENLCSTFK		1044,21	6,14
αs2-CN	EQLSTSEENSK		1251,27	3,98
αs2-CN	EVVR		501,58	6,41
αs2-CN	FALPQYLK		979,19	9,30
αs2-CN	FPQYLQYLYQGPIVLPWDQVK		2710,13	6,32
αs2-CN	HYQK		574,64	9,30
αs2-CN	ISQR		502,57	10,55
αs2-CN	ITVDDK		689,76	4,11
αs2-CN	K		146,19	9,70
αs2-CN	K		146,19	9,70
αs2-CN	K		146,19	9,70
αs2-CN	K		146,19	9,70
αs2-CN	LNFLK		633,79	9,70
αs2-CN	LTEEEK		747,80	3,98
αs2-CN	NANEEEYSIGSSSESAEVATEEVK		2688,71	3,49
αs2-CN	NAVPIPTLNR		1195,38	10,55
αs2-CN	NMAINPSK		874,02	9,70

Белок	Продукт расщепления	Молекулярный вес, Да	Изоэлектрическая точка (pI)
αs2-CN	NR	288,31	10,55
αs2-CN	NTMEHVSSSEESIISQETVK	2299,45	4,19
αs2-CN	PWIQPK	767,93	9,70
αs2-CN	QEK	403,44	6,41
αs2-CN	R	174,20	10,55
αs2-CN	TK	247,29	9,70
αs2-CN	TK	247,29	9,70
αs2-CN	TVDMESTEFTK	1386,54	3,93
αs2-CN	TVYQHVK	903,01	9,30
αs2-CN	VIPYVR	745,92	9,35
αs2-CN	YL	294,35	6,09
αs2-CN	YVK	437,50	9,30
κ-CN	F	165,19	6,10
κ-CN	FSDKIAK	807,95	9,54
κ-CN	HPHPHLSF	971,09	7,81
κ-CN	MAIPPKKNQDKTEIPTINTIASGEPTSTPTTEAVESTVATLEDSPEVIESPPEINTVQVTSTAV	6707,43	3,77
κ-CN	QEQNQEQPIRCEKDER	2030,16	4,30
κ-CN	QQKPVALINNQLPYPY	2033,36	9,15
κ-CN	QVLSNTVPAKSCQAQPTTMAR	2231,57	9,83
κ-CN	VLSR	473,57	10,55
κ-CN	Y	181,19	6,09
κ-CN	YAKPAAVRSPAQLQW	1799,11	10,45
κ-CN	YIPIQY	795,93	6,09
κ-CN	YPSYGLNY	976,05	6,08
β-CN	AVPYPQR	829,95	9,35
β-CN	DMPIQAFLLY	1210,45	3,75
β-CN	EAMAPK	645,77	6,41
β-CN	ELEELNVPGEIVSLSSSEESITR	2646,84	3,55
β-CN	EMPFPK	747,91	6,41
β-CN	F	165,19	6,10
β-CN	GPFPIIV	741,93	6,10
β-CN	HK	283,33	9,70
β-CN	IEK	388,46	6,41
β-CN	IHPFAQTQSLVYFPFGPIPNLQNIPLTQTTPVVPFQLQPEVMGVSK	5319,25	7,54
β-CN	INK	373,45	9,70
β-CN	K	146,19	9,70
β-CN	MH	286,35	7,55
β-CN	QEPVLGPVR	994,16	6,41
β-CN	QPH	380,40	7,55
β-CN	QPLPPTVMFPQSVLSLSQSK	2281,70	9,70
β-CN	QSEEQQTDELQDK	1834,82	3,56
β-CN	R	174,20	10,55
β-CN	VK	245,32	9,70
β-CN	VLPVPQK	779,98	9,70
β-CN	YPVEPFTESQSLTLTDVENLHLPLLLQSW	3467,92	3,78



# Функциональные компоненты питания: технология получения концентрата, содержащего ликопин, из томатного сырья

Ш. М. Велямов, М. Т. Велямов, Ж. З. Уразбаев, Т. Н. Бакытжан, А. У. Абитбекова

Казахский  
научно-исследовательский  
институт перерабатывающей  
и пищевой промышленности,  
г. Алматы, Республика Казахстан

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** Ухудшение экологической ситуации, особенно в промышленных регионах и мегаполисах, приводит к росту интереса к функциональному питанию как способу профилактики хронических заболеваний. В этом контексте особую ценность приобретают природные каротиноиды - биологически активные соединения с выраженными антиоксидантными свойствами. Среди них ликопин, содержащийся в томатах, выделяется высокой биологической активностью, устойчивостью к окислению и способностью снижать риск сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний. Однако для широкого промышленного применения необходимы эффективные технологии экстракции, обеспечивающие стабильный выход вещества при сохранении его активности.

**Цель:** Обоснование эффективного технологического режима экстракции ликопина из томатного сырья.

**Материалы и методы:** Объектом исследования служил районированный сорт томата «Самаладай». Использовали высушенный порошок из плодов и полученный из него ликопинсодержащий экстракт. Содержание экстрактивных веществ определяли по фармакопейным стандартам. Для количественного анализа  $\beta$ -каротина применяли спектрофотометрический метод ( $\lambda = 452$  нм), а для ликопина — метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ГОСТ 33277). Определяли влияние типа растворителя, соотношения сырья и экстрагента, температуры, времени и кратности экстракции на выход активных компонентов.

**Результаты:** Наиболее эффективным экстрагентом оказался этилацетат. Оптимальные условия экстракции: температура 50 °С, время 30 минут, соотношение сырья к растворителю 1:2,5, двукратное экстрагирование. Полученный экстракт содержал  $22,4 \pm 1,29$  мг/100 г ликопина и  $21,59 \pm 1,2$  мг/100 г  $\beta$ -каротина. Путем вакуумного испарения получен сухой концентрат ( $1,26 \pm 0,12$  г из 1 кг порошка) с содержанием ликопина 17–20 %. Новизна исследования заключается в экспериментальной разработке и обосновании оптимального технологического режима получения ликопинсодержащего концентрата на основе местного томатного сырья, что способствует расширению сырьевой базы и внедрению функциональных компонентов в пищевую промышленность Казахстана.

**Выводы:** Разработанная технология экстракции ликопина может быть эффективно использована при создании пищевых добавок, направленных на повышение биологической и профилактической ценности продуктов повседневного потребления.

**Ключевые слова:** функциональное питание; ликопин; каротиноиды; томатное сырье; пищевая экстракция; технологические параметры экстракции; пищевая добавка; биоактивные соединения

## Корреспонденция:

Шухрат Масимжанович

Велямов

E-mail: sh.velyamov@rpf.kz

## Конфликт интересов:

авторы сообщают  
об отсутствии конфликта  
интересов.

Поступила: 03.11.2024

Принята: 15.03.2025

Опубликована: 31.03.2025

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Велямов, Ш.М., Велямов, М.Т., Уразбаев, Ж.З., Бакытжан, Т.Н., & Абитбекова, А.У. (2025). Функциональные компоненты питания: технология получения концентрата, содержащего ликопин, из томатного сырья. *FOOD METAENGINEERING*, 3(1), 33–41. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.77>

# Functional Components in Nutrition: Technology for Producing a Lycopene-Containing Concentrate from Tomato Raw Materials

Shukhrat M. Velyamov, Masimzhan T. Velyamov, Zhumatay Z. Urazbayev, Turar N. Bakytzhan, Aelina U. Abitbekova

Kazakh Research Institute of  
Processing and Food Industry,  
Almaty, Republic of Kazakhstan

## ABSTRACT

**Introduction:** The deterioration of the environmental situation, especially in industrial regions and large cities, has led to growing interest in functional nutrition as a means of preventing chronic diseases. In this context, natural carotenoids (biologically active compounds with pronounced antioxidant properties) have become particularly valuable. Among them, lycopene, found in tomatoes, stands out for its high biological activity, oxidative stability, and ability to reduce the risk of cardiovascular and oncological diseases. However, for broad industrial application, efficient extraction technologies are needed to ensure a stable yield of the compound while preserving its activity.

**Purpose:** To substantiate an effective technological regime for the extraction of lycopene from tomato raw materials.

**Materials and Methods:** The research object was the regional tomato variety "Samaladay." Dried tomato powder and the lycopene-containing extract obtained from it were used. The content of extractive substances was determined according to pharmacopoeial standards.  $\beta$ -carotene content was quantified by spectrophotometric method ( $\lambda = 452$  nm), and lycopene content by high-performance liquid chromatography (HPLC) according to GOST 33277. The influence of solvent type, raw material to solvent ratio, temperature, extraction time, and number of extractions on the yield of active components was analyzed.

**Results:** Ethyl acetate was identified as the most effective solvent. The optimal extraction conditions were: temperature 50 °C, extraction time 30 minutes, raw material to solvent ratio 1:2.5, with double extraction. The resulting extract contained  $22.4 \pm 1.29$  mg/100 g of lycopene and  $21.59 \pm 1.2$  mg/100 g of  $\beta$ -carotene. Through vacuum evaporation, a dry concentrate was obtained ( $1.26 \pm 0.12$  g from 1 kg of powder) with a lycopene content of 17–20%. The novelty of the study lies in the experimental development and substantiation of the optimal technological regime for obtaining a lycopene-containing concentrate based on local tomato raw materials, contributing to the expansion of the raw material base and the introduction of functional components into Kazakhstan's food industry.

**Conclusion:** The developed lycopene extraction technology can be effectively applied in the creation of food additives aimed at enhancing the biological and preventive value of everyday food products.

**Keywords:** functional nutrition; lycopene; carotenoids; tomato raw materials; food extraction; technological extraction parameters; food additive; bioactive compounds

## Correspondence:

Shukhrat M. Velyamov

E-mail: [usama.soultan@mu.edu.eg](mailto:usama.soultan@mu.edu.eg)

## Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

**Received:** 03.11.2024

**Accepted:** 15.03.2025

**Published:** 31.03.2025

**Copyright:** © 2025 The Authors



**To cite:** Velyamov, Sh.M., Velyamov, M.T., Urazbayev, Zh.Z., Bakytzhan, T.N., & Abitbekova, A.U. (2025). Functional components in nutrition: Technology for producing a lycopene-containing concentrate from tomato raw materials. *FOOD METAENGINEERING*, 3(1), 33-41. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.77>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Быстрая урбанизация современного общества, наряду с увеличением выбросов токсичных веществ из-за роста городского транспорта и промышленной деятельности, значительно влияет на здоровье человека, в частности на иммунную систему. Распространение фастфуда и продуктов с низкой питательной ценностью усугубляет эти проблемы, способствуя росту ожирения среди молодежи, развитию заболеваний желудочно-кишечного тракта и повышению уровня холестерина в крови. Эти факторы, в сочетании с загрязнением окружающей среды, могут привести к увеличению числа хронических заболеваний среди трудоспособного населения (Dawood et al., 2020).

Для решения этих проблем со здоровьем необходимо разрабатывать повседневные продукты питания с высокими функциональными свойствами, направленные на улучшение общественного здоровья и повышение устойчивости организма к воздействию токсинов окружающей среды. Одной из эффективных стратегий является увеличение потребления продуктов, богатых антиоксидантами, которые помогают детоксифицировать вредные вещества, укреплять иммунную систему и поддерживать микрофлору кишечника (Zeng et al., 2019).

Функциональные соединения, такие как полифенолы, пектин, инулин и ликопин, вызывают значительный научный интерес. Пектин, полисахарид, содержащийся в корнеплодах, фруктах и овощах, хорошо изучен благодаря своим детоксикационным свойствам и положительному влиянию на липидный и углеводный обмен. Низкоэтерифицированный пектин снижает уровень холестерина в крови, повышает устойчивость иммунной системы к аллергенам, способствует восстановлению слизистых оболочек при воспалениях и улучшает терапевтический эффект лекарственных препаратов при одновременном снижении побочных действий (Жексенбай и соавт., 2020; Донченко & Фирсов, 2017; Зайко, 2017).

Инулин, природный полисахарид, состоящий в основном из фруктозы, получают из цикория и топинамбура. Он улучшает работу пищеварительной системы, способствует росту полезной микрофлоры кишечника, укрепляет иммунитет, улучшает усвоение минералов и снижает уровень холестерина. Инулин широко применяется в производстве молочных продуктов, детского питания, злаковых и хлебобулочных изделий,

особенно полезен для людей с диабетом и ожирением (Надежкина & Сагина, 2020; Маслова, 2018; Перковец, 2010; Гулюк и соавт., 2009).

Полифенолы, природные соединения, содержащиеся в растительных продуктах, обладают широким спектром биологической активности, включая антибактериальное, противоопухолевое, противовоспалительное и антиоксидантное действие. В отличие от синтетических соединений, полифенолы имеют низкую токсичность и минимальные побочные эффекты, что делает их подходящими для функционального питания и биологически активных добавок (Фоменко и соавт., 2009).

Ликопин, каротиноидный пигмент, содержащийся преимущественно в помидорах, привлекает особое внимание благодаря своим мощным антиоксидантным свойствам. Поскольку он не синтезируется в организме человека, его необходимо получать с пищей. Ликопин играет важную роль в снижении окислительного стресса, поддержании целостности ДНК и клеток, а также в профилактике раковых заболеваний груди, простаты, пищеварительного тракта и кожи (Сморodinская и соавт., 2022; Marzocco et al., 2021; Япаров и соавт., 2020).

Экстракция ликопина из томатов включает различные технологии, такие как экстракция с использованием растворителей, ферментативная обработка и современные методы, включая ультразвуковую и микроволновую экстракцию. Исследователи разрабатывают эффективные и экологически чистые методы экстракции, чтобы оптимизировать выход и чистоту ликопина, минимизируя использование опасных растворителей (Ачмиз и соавт., 2022; Arballo et al., 2021; Тукова, 2019; Бондаренко и соавт., 2016; Han et al., 2010; Газиев, 2001). Тем не менее, остаётся пробел в знаниях, касающийся влияния различных технологических параметров на биологическую активность ликопина, а также оптимизации экологически безопасных методов экстракции, обеспечивающих максимальную сохранность его функциональных свойств.

Цель текущей статьи — проанализировать актуальность разработки функциональных пищевых концентратов и добавок с высокими оздоровительными свойствами. Особое внимание уделено особенностям экстракции ликопина из томатов и обоснованию технологических параметров получения экстрактов, обогащенных ликопином.

Ш. М. Велямов, М. Т. Велямов, Ж. З. Уразбаев, Т. Н. Бакытжан, А. У. Абитбекова

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования служил районированный в Республике Казахстан сорт томата «Самаладай», выведенный Казахским научно-исследовательским институтом картофелеводства и овощеводства (авторы — Курганская Н.В., Максимова Н.В.). В работе использовались высушенный порошок из томатов данного сорта, а также ликопинсодержащий экстракт, полученный из этого порошка.

Определение содержания экстрактивных веществ

Определение содержания экстрактивных веществ проводилось в соответствии с общей фармакопейной статьей «Определение содержания экстрактивных веществ в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах». Методика регламентирует стандарты для определения экстрактивных веществ, которые извлекаются из растительного материала с использованием воды, спирта и других органических растворителей. Эти вещества обладают потенциальной биологической активностью и находят применение в пищевой, медицинской и косметической промышленности.

Инструменты и оборудование

Для количественного определения β-каротина применялся метод, описанный в ГОСТ 8756.22. Анализ основан на экстракции каротиноидов с использованием 80 % ацетона. Экстракт фильтровали в мерную колбу объемом 25 мл, доводили до метки растворителем и определяли концентрацию каротина с помощью спектрофотометра при длине волны 452 нм.

Для определения содержания ликопина и β-каротина использовался метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), регламентированный ГОСТ 33277. Метод позволяет проводить точный количественный анализ каротиноидов в сложных матрицах.

Условия экстракции

Для разработки эффективной технологии получения ликопинсодержащего томатного экстракта были определены оптимальные условия экстракции, обеспечи-

вающие максимальный выход экстрактивных веществ. Подбор оптимального экстрагента осуществлялся на основе анализа выхода экстрактивных веществ при использовании различных органических растворителей, таких как хлороформ, метиленхлорид, гексан и этилацетат, широко применяемых для экстракции каротиноидов. Эксперименты проводились при одинаковых условиях, за исключением типа растворителя. Далее оценивалось соотношение экстрагента к сырью, варьировавшееся от 1:2,5 до 1:12,5, что позволило выявить наилучшие условия для максимального извлечения активных компонентов. Влияние кратности экстрагирования изучалось при однократной, двукратной и трёхкратной экстракциях. Температурный режим варьировался от 40 до 70°C для определения оптимальной температуры, способствующей повышению эффективности извлечения ликопина. Продолжительность экстракции изменялась от 10 до 30 минут, что позволило выявить оптимальное время для достижения наилучшего выхода целевых веществ. Эти параметры были выбраны для комплексной оценки влияния технологических условий на эффективность извлечения ликопина, что позволило обосновать оптимальный режим для получения экстракта с высокими функциональными свойствами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты определения оптимального экстрагента по выходу экстрактивных веществ представлены в Таблице 1.

Таблица 1  
Определение оптимального экстрагента по выходу экстрактивных веществ

Table 1  
Определение оптимального экстрагента по выходу экстрактивных веществ

№ п/п	Наименование экстрагента	Выход экстрактивных веществ, %
1	Хлороформ	2,80 ± 0,20 %
2	Метилен хлористый	3,61 ± 0,23 %
3	Гексан	2,49 ± 0,23 %
4	Этилацетат	4,17 ± 0,22 %

Ш. М. Велямов, М. Т. Велямов, Ж. З. Уразбаев, Т. Н. Бакытжан, А. У. Абитбекова

Таблица 2

**Выход экстрактивных веществ при различных соотношениях сырья к экстрагенту**

Table 2

**Выход экстрактивных веществ при различных соотношениях сырья к экстрагенту**

№ п/п	Соотношение сырье: экстрагент	Выход экстрактивных веществ, %	Содержание β-каротина, мг/100г	Содержание ликопина, мг/100г
1	1:2,5	2,34 ± 0,12 %	2,218 ± 0,11 %	2,323 ± 0,11 %
2	1:5	2,51 ± 0,12 %	2,201 ± 0,11 %	2,305 ± 0,13 %
3	1:7,5	2,79 ± 0,15 %	2,055 ± 0,11 %	2,185 ± 0,12 %
4	1:10	3,17 ± 0,15 %	2,023 ± 0,11 %	2,167 ± 0,12 %

Согласно данным в Таблицы 1, в растворителе этилацетата выделяется наибольшее количество экстрактивных веществ —  $4,17 \pm 0,22\%$ . Следовательно, для получения ликопинсодержащего сухого порошка нами был отобран растворитель — этилацетат.

Оптимальное соотношение сырья и экстрагента определяли по выходу экстрактивных веществ. Результаты представлены в Таблице 2.

По полученным результатам видно, что при соотношении сырья к экстрагенту — 1:10 выделяется наибольшее количество экстрактивных веществ. При этом, также были определены показатели содержания бета-каротина и ликопина. Наибольшее содержание β-каротина составило на уровне: 2,218 мг/100г и ликопина — 2,323 мг/100 г, при соотношении сырья к экстрагенту: 1:2,5. Поэтому для технологии получения ликопинсодержащего сухого порошка было отобрано соотношение 1:2,5.

Таблица 4

**Содержание β-каротина и ликопина в экстрактах, полученных при температуре от 40 до 70°C в течение 10...30 минут при гидромодуле 1:2,5**

Температура, °C	40	50	60	70
10 минут				
β-каротин, мг/100г	9,83 ± 1,19 %	14,92 ± 1,22 %	19,80 ± 1,25 %	20,86 ± 1,31 %
Ликопин, мг/100г	9,36 ± 1,18 %	19,30 ± 1,23 %	20,37 ± 1,24 %	20,38 ± 1,24 %
20 минут				
β-каротин, мг/100г	19,08 ± 0,12 %	20,50 ± 1,23 %	20,90 ± 1,26 %	20,61 ± 1,22 %
Ликопин, мг/100г	20,0 ± 1,15 %	21,40 ± 1,24 %	21,68 ± 1,31 %	21,32 ± 1,25 %
30 минут				
β-каротин, мг/100г	18,40 ± 1,11 %	21,59 ± 1,26 %	20,16 ± 1,21 %	20,05 ± 1,15 %
Ликопин, мг/100г	19,05 ± 1,12 %	22,4 ± 1,29 %	21,32 ± 1,22 %	21,18 ± 1,18 %

Результаты определения оптимальной кратности экстракции по выходу экстрактивных веществ представлены в Таблице 3.

Таблица 3

**Определение кратности экстракции по выходу экстрактивных веществ**

№ п/п	Кратность экстракции	Выход экстрактивных веществ, %
1	Однократная экстракция	3,23 ± 0,12 %
2	Двукратная экстракция	1,15 ± 0,13 %
3	Трехкратная экстракция	0,67 ± 0,11 %

Данные Таблицы 3 свидетельствуют, что наибольший выход экстрактивных веществ наблюдается при однократной — 3,23 % и двукратной экстракции — 1,15 %. Следовательно, проводить трехкратную экстракцию



томатного порошка нецелесообразно, а для более полной экстракции экстрактивных веществ достаточно провести двухкратную экстракцию растворителем этилацетатом.

Результаты определения оптимального времени и температуры экстракции представлены в Таблице 4.

По результатам указанным в Таблице 4, видно, что в экстракте, полученном при температуре 50°C в течение 30 минут, содержится наибольшее количество  $\beta$ -каротина ( $21,59 \pm 1,26$  мг/100г) и ликопина ( $22,4 \pm 1,29$  мг/100г). Следовательно, для дальнейших экспериментальных анализов нами отобраны, как наиболее оптимальные: температура 50°C и время экстракции 30 минут.

## **ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Разработка технологии извлечения каротиноидов из томатов с использованием органических растворителей остаётся важным направлением для повышения эффективности производства функциональных пищевых ингредиентов. Оптимизация параметров процесса экстракции, таких как выбор растворителя, температурный режим, время экстрагирования и соотношение массы сырья к объему растворителя, оказывает значительное влияние на выход и качество каротиноидного экстракта (Гаджиева и др., 2020; Бондаренко и др., 2016; Нежинец и др., 2004; Буряк и др., 2004).

На основании полученных экспериментальных данных установлено, что этилацетат является наиболее эффективным экстрагентом для получения ликопинсодержащего экстракта из томатов. Экстрактивность составила  $4,17 \pm 0,22\%$  при оптимальном соотношении сырья к растворителю 1:2,5 и двукратной экстракции. Оптимальные условия для экстрагирования включают температуру 50°C и время экстракции 30 минут, что подтверждает эффективность предложенного подхода.

Сравнительный анализ с существующими методами экстракции каротиноидов, такими как способ, предложенный учёными Волгоградского государственного медицинского университета (Курегян и др., 2018), показывает, что наш метод имеет ряд преимуществ. В традиционном подходе используется предварительная сушка сырья до содержания влаги не более 15 % при температуре до 30°C и измельчение до частиц размером не более 0,5 мм. Экстракция проводится трёхкратно с применением спирта, ацетона, хлороформа или гексана

при гидромодуле 1:5. Дополнительные этапы включают обработку экстракта раствором гидрокарбоната натрия и использование колоночной хроматографии для выделения индивидуальных каротиноидов.

Несмотря на то, что предложенная нами технология может приводить к получению экстракта с несколько более низким содержанием биологически активных веществ по сравнению с более сложными методами, она имеет ряд экономических и технологических преимуществ. В частности, упрощение технологического процесса и сокращение количества используемых растворителей снижают производственные затраты и делают метод более привлекательным для промышленного применения. Экстракт, полученный по предложенной технологии, обладает функциональными свойствами и может использоваться в пищевой промышленности в качестве натурального красителя или биологически активной добавки.

Оптимизация процесса экстракции ликопина с использованием этилацетата при умеренных температурных режимах и сокращённом времени обработки демонстрирует потенциал для создания конкурентоспособных продуктов с функциональной ценностью для пищевой индустрии.

## **ВЫВОДЫ**

Рост антропогенного воздействия на здоровье человека усиливает необходимость разработки пищевых концентратов и добавок с высокими функциональными свойствами. Одним из перспективных функциональных ингредиентов является ликопин, обладающий выраженными антиоксидантными свойствами. В данном исследовании представлены результаты, направленные на оптимизацию процесса экстракции ликопина из томатов сорта «Самаладай».

Оптимизация технологических параметров экстракции позволила определить, что наибольшая эффективность достигается при использовании этилацетата в качестве экстрагента. Экстрактивность составила  $4,17 \pm 0,22\%$  при соотношении сырья к растворителю 1:2,5 и двукратной экстракции. Оптимальные условия экстракции включали температуру 50°C и продолжительность процесса 30 минут. Полученный этилацетатный экстракт содержал  $\beta$ -каротин ( $21,59 \pm 1,2$  мг/100 г) и ликопин ( $22,4 \pm 1,29$  мг/100 г).



В дальнейшем, посредством вакуумного испарения на ротационном вакуумно-испарительном аппарате при температуре 40–50°C и вакууме 0,5–0,7 атм, был получен ликопинсодержащий сухой порошок интенсивно красного цвета. Из 1 кг томатного порошка получено  $1,26 \pm 0,12$  г (0,126%) сухого порошка с содержанием ликопина  $17\text{--}20 \pm 1,22\%$ . Этот концентрат может быть использован в качестве пищевой добавки с высокими функциональными свойствами, включая применение в качестве антиоксиданта и натурального красителя в пищевой промышленности.

Текущее исследование имеет определённые ограничения. В частности, не были проведены исследования по стабильности ликопина в процессе хранения, а также не изучено влияние различных пищевых матриц на его биодоступность. Кроме того, экстракция проводилась только с использованием органических растворителей, что может ограничивать её применение в некоторых отраслях пищевой промышленности. Перспективные направления дальнейших исследований включают разработку более экологических методов экстракции, а также оценку функциональной эффективности полученного продукта в реальных условиях пищевого производства.

## АВТОРСКИЙ ВКЛАД

**Шухрат Масимжанович Велямов:** концептуализация; администрирование данных; проведение исследования; написание черновика рукописи и её редактирование.

**Масимжан Турсунович Велямов:** проведение исследования; создание рукописи и её редактирование.

**Жуматай Зейноллаевич Уразбаев:** написание черновика рукописи и её редактирование.

**Тұрар Нуртуғанұлы Бакытжан:** проведение исследования, создание рукописи и её редактирование.

**Аэлина Улановна Абитбекова:** проведение исследования, создание рукописи и её редактирование.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

**Shukhrat M. Velyamov:** investigation; writing — review & editing.

**Masimzhan T. Velyamov:** writing — original draft preparation & editing.

**Zhumatay Z. Urazbayev:** investigation; writing — review & editing.

**Turar N. Bakytzhan:** investigation; writing — review & editing.

**Aelina U. Abitbekova:** investigation; validation; writing — review & editing.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Ачмиз, А. Д., Лисовая, Е. В., Лисовая, Е. В., Свердличенко, А. В., & Викторова, Е. П. (2022). Характеристика существующих способов получения каротиноидов из растительного сырья и вторичных ресурсов его переработки. *Новые технологии*, 18(2), 15–25. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-2-15-25>
- Achmiz, A.D., Lisovaya, E.V., Sverdlichenko, A.V., & Viktorova, E.P. (2022). Characteristics of the existing methods for the production of carotenoids from vegetable raw materials and secondary resources of its processing. *New Technologies*, 18(2), 15–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-2-15-25>
- Бондаренко, Ж. В., Эмелло, Г. Г., & Хаванская, О. И. (2016). Влияние термообработки на устойчивость к окислению и жирнокислотный состав растительных смесей. *Труды БГТУ*, 4, 162–166.
- Bondarenko, Zh.V., Emello, G.G., & Khavanskaya, O.I. (2016). The influence of thermal processing on oxidation stability and fatty acids composition of vegetable oil mixture. *Proceedings of BSTU*, 4, 162–166. (In Russ.)
- Буряк, Д. И., Ильинова, С. А., & Калманович, С. А. (2004). Влияние биологически активных добавок растительного происхождения на потребительские свойства и пищевую ценность кулинарных жиров. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 1, 74–76.

- Buryak, D. I., Ilinova, S. A., & Kalmanovich, S. A. (2004). The influence of plant-based biologically active additives on the consumer properties and nutritional value of culinary fats. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Food Technology*, 1, 74–76. (In Russ.)
- Гаджиева, А. М., Султанов, Ю. М., & Рамалданова, З. Н. (2020). Комплексная переработка томатного сырья с получением томатного красителя ликопина — эликсира жизни. *Вестник ВГУИТ*, 82(4), 219–223. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-219-223>
- Gadzhieva, A.M., Sultanov, Y.M., & Ramaldanova, Z.N. (2020). Complex processing of tomato raw materials to produce tomato dye lycopene — the elixir of life. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 82(4), 219–223. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-219-223>
- Газиев, А. И. (2001). *Способ получения индивидуальных каротиноидов* (Патент RU2172608). Российское патентное ведомство.
- Gaziev, A. I. (2001). Method for obtaining individual carotenoids (Patent RU2172608). Russian Patent Office. (In Russ.)
- Гулюк, Н. Г., Пучкова, Т. С., & Пихало, Д. М. (2009). Исследование технологических процессов получения и модификаций фруктофуранозных полисахаридов из цикория корневого. *Материалы Международной научно-практ. Конф. "XVII International Starch Convention"* (с. 36–37). Москва.
- Gulyuk, N. G., Puchkova, T. S., & Pikhlo, D. M. (2009). Study of technological processes for obtaining and modifying fructofuranose polysaccharides from root chicory. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "XVII International Starch Convention"* (pp. 36–37). Moscow. (In Russ.)
- Донченко, Л.В., & Фирсов, Г.Г. (2017). *Пектин: основные свойства, производство и применение*. ДеЛи принт.
- Donchenko, L. V., & Firsov, G. G. (2017). Pectin: Basic Properties, Production, and Application. DeLi Print. (In Russ.)
- Жексенбай, Н., Набиева, Ж. С., Амирханова, А. Ш., Кизатова, М. Ж., & Исакова, Г. К. (2020). Актуальность создания пектинсодержащих продуктов питания с детоксикационными свойствами. *Фармация Казахстана*, 7–8, 46–50.
- Zheksenbai, N., Nabyeva, Zh. S., Amirkhanova, A. Sh., Kizatova, M. Zh., & Iskakova, G. K. (2020). Relevance of developing pectin-containing food products with detoxification properties. *Pharmacy of Kazakhstan*, 7–8, 46–50. (In Russ.)
- Зайко, Г. М. (2017). *Получение и применение пектина для лечебных и профилактических целей*. КубЛГУ.
- Zaiko, G. M. (2017). *Production and application of pectin for therapeutic and preventive purposes*. KubLGU. (In Russ.)
- Курегиан, А. Г., Печинский, С. В., & Степанова, Э. Ф. (2018). *Способ получения индивидуальных каротиноидов* (Патент RU2648452). Российское патентное ведомство.
- Kuregyan, A. G., Pechinsky, S. V., & Stepanova, E. F. (2018). *Method for obtaining individual carotenoids* (Patent RU2648452). Russian Patent Office. (In Russ.)
- Маслова, Е. П. (2018). Применение инулина в косметическом производстве. *Молодой ученый*, 49, 46–48.
- Надежкина, М. С., & Сагина, О. А. (2020). Инулин: свойства, применение. Мировой рынок инулина. *Modern Science*, (1–2), 76–80.
- Nadezhkina, M. S., & Sagina, O. A. (2020). Inulin: Properties and applications. Global inulin market. *Modern Science*, (1–2), 76–80. (In Russ.)
- Нежинец, Е. В., Ильинова, С. А., Колманович, С. А., Корнева, Е. П., & Молочкова, М. Л. (2004). Влияние томатного — масляного экстракта на потребительские свойства сливочного масла. *Известия вузов. Пищевая технология*, 1, 71–74.
- Nezhinets, E. V., Ilinova, S. A., Kolmanovich, S. A., Korneva, E. P., & Molochkova, M. L. (2004). Influence of a tomato–oil extract on the consumer properties of butter. *Pisevaa tehnologia*, 1, 71–74. (In Russ.)
- Перковец, М. В. (2010). Правда и неправда об инулине и целесообразности его производства в России. *Пищевые ингредиенты. Сырьё и добавки*, (2), 20.

- Perkovets, M. V. (2010). Truth and myths about inulin and the feasibility of its production in Russia. *Food Ingredients. Raw Materials and Additives*, (2), 20. (In Russ.)
- Сморodinская, С. В., Грибкова, В. А., Алексеев, А. Е., & Глебова, И. А. (2022). Применение экстракта ликопина как компонента функционального питания в хлебобулочных изделиях из дрожжевого теста. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 84(2), 93–100. <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-93-100>
- Vorobyov, V.I., Chernega, O.P., & Berseneva, A.R. (2022). The use of hydrobiont collagen in the production of products based on minced fish. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 84(2), 84–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-84-92>
- Тукова, А. А. (2019). Разработка рецептуры мясного продукта для лечебно-профилактического питания с использованием антиоксиданта ликопин. *Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства*, (21), 263–266.
- Tukova, A. A. (2019). Development of a meat product formulation for therapeutic and preventive nutrition using the antioxidant lycopene. *Topical Issues of Improving the Technology of Production and Processing of Agricultural Products*, (21), 263–266. (In Russ.)
- Фоменко, С. Е., Кушнерова, Н. Ф., Спрыгин, В. Г., Парфенова, Т. В., & Кушнерова, Т. В. (2009). Применение растительных полифенолов в составе функциональных продуктов питания. *Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление*, (1), 62–69.
- Fomenko, S.E. Kushnerova N.F., Sprigin, V.G., Parfenova, T.V., & Kushnerova, T.V. (2009). Application of plant polyphenols in the composition of functional foods. *The Bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management*, (1), 62–69. (In Russ.)
- Япаров, А. Э., Бабина, С. А., Желтышева, А. Ю., Шуклин, Г. О., & Шуклина, А. А. (2020). Влияние ликопина и других каротиноидов на когнитивную функцию. *Международный студенческий научный вестник*, (3).
- Yaparov, A. E., Babina, S. A., Zheltysheva, A. Yu., Shuklin, G. O., & Shuklina, A. A. (2020). The influence of lycopene and other carotenoids on cognitive function. *International Student Scientific Bulletin*, (3). (In Russ.)
- Arballo, J., Amengual, J., & Erdman, J. W. (2021). Lycopene: A critical review of digestion, absorption, metabolism, and excretion. *Antioxidants*, 10(3), 342. <https://doi.org/10.3390/antiox10030342>
- Dawood, M. A. O., Abdel-Tawwab, M., & Abdel-Latif, H. M. R. (2020). Lycopene reduces the impacts of aquatic environmental pollutants and physical stressors in fish. *Reviews in Aquaculture*, 12(4), 2511–2526. <https://doi.org/10.1111/raq.12455>
- Marzocco, S., Singla, R. K., & Capasso, A. (2021). Multifaceted effects of lycopene: A boulevard to the multitarget-based treatment for cancer. *Molecules*, 26(17), 5333. <https://doi.org/10.3390/molecules26175333>
- Zeng, J., Zhao, J., Dong, B., Cai, X., Jiang, J., Xue, R., & Liu, C. (2019). Lycopene protects against pressure overload-induced cardiac hypertrophy by attenuating oxidative stress. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 66, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2019.01.002>

# Сравнительная оценка антимикробной активности штаммов молочнокислых бактерий по отношению к *Pseudomonas aeruginosa*

С. А. Кишилова, В. А. Леонова

Всероссийский  
научно-исследовательский  
институт молочной  
промышленности, г. Москва,  
Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** *Pseudomonas aeruginosa*, способная вызывать порчу пищевых продуктов, обладает многофакторной устойчивостью к различным антимикробным препаратам и дезинфектантам, что приводит к проблемам пищевой безопасности. В связи с этим необходим поиск и разработка новых эффективных методов борьбы с контаминацией *P. aeruginosa* на предприятиях пищевой промышленности. В качестве альтернативы химическим дезинфицирующим средствам и консервантам могут рассматриваться препараты на основе молочнокислых бактерий, синтезирующих различные антимикробные соединения.

**Цель:** Сравнительная оценка антимикробной активности различных штаммов молочнокислых бактерий (МКБ) по отношению к представителям *P. aeruginosa*, выделенным из различных источников.

**Материалы и методы:** Объектами исследования являлись штаммы молочнокислых бактерий (МКБ) *Lactobacillus helveticus*, *Streptococcus thermophilus*, *Lactococcus lactis*, *Lactocaseibacillus paracasei* из коллекции ФГАНУ «ВНИМИ». Для исследуемых штаммов на первом этапе оценивали антимикробную активность по отношению к типовому коллекционному тест-штамму *P. aeruginosa* ATCC 25668, полученному из Государственной коллекции патогенных микроорганизмов и клеточных культур «ГКПМ-Оболensk». Антимикробную активность исследовали методом совместного культивирования в соответствии с МУ 2.3.2.2789-10. Для штаммов МКБ, показавших наибольшую антимикробную активность по отношению к *P. aeruginosa* ATCC 25668, дополнительно исследовалась антимикробная активность по отношению к диким штаммам *P. aeruginosa* 42, *P. aeruginosa* 47, выделенным с цехового оборудования молочного хозяйства и *P. aeruginosa* M1, выделенного из образца сливочного масла.

**Результаты:** Показаны различия в степени антагонистической активности представителей МКБ по отношению к коллекционному штамму *P. aeruginosa* и изолятам дикого типа. Подтверждена высокая эффективность представителей лактобацилл, относящихся к виду *L. helveticus*, в частности штамма *L. helveticus* Ббн4, как антимикробного агента относительно штаммов синегнойной палочки как коллекционного, так и дикого типа.

**Выводы:** Представители лактобацилл, в частности *L. helveticus*, обладали высокой ингибирующей активностью относительно штаммов синегнойной палочки как коллекционного, так и дикого типа, выделенных из разных источников, и могут рассматриваться как перспективные антимикробные агенты относительно такого сложного патогена, как *P. aeruginosa*. В частности, штамм с наибольшей ингибирующей активностью *L. helveticus* Ббн4 может являться потенциальным штаммом-антагонистом, что позволит применять в качестве защитной заквасочной культуры для снижения риска контаминации кисломолочной продукции *P. aeruginosa*. Однако необходимы дальнейшие исследования по выявлению механизмов антимикробного действия этой культуры.

**Ключевые слова:** *Pseudomonas aeruginosa*; молочнокислые бактерии; антимикробная активность; *Lactobacillus helveticus*; защитные заквасочные культуры; штаммы диких изолятов; совместное культивирование; биоконтроль пищевых патогенов; контаминация молочной продукции; антагонистические свойства бактерий

## Корреспонденция:

Светлана Анатольевна  
Кишилова

E-mail: s\_kishilova@vnimi.org

## Конфликт интересов:

авторы сообщают  
об отсутствии конфликта  
интересов.

Поступила: 17.09.2024

Принята: 15.03.2025

Опубликована: 31.03.2025

## Финансирование

Данное исследование  
не получало внешнего  
финансирования

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Кишилова, С.А., & Леонова, В.А. (2025). Сравнительная оценка антимикробной активности штаммов молочнокислых бактерий по отношению к *Pseudomonas aeruginosa*. FOOD METAENGINEERING, 3(1), 42-55. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.72>

# Comparative Study of the Antimicrobial Activity of Lactic Acid Bacteria Strains against *Pseudomonas aeruginosa*

Svetlana A. Kishilova, Victoria A. Leonova

All-Russian Dairy Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction:** *Pseudomonas aeruginosa*, capable of causing food spoilage, has multifactorial resistance to various antimicrobial agents and disinfectants, which leads to food safety problems. In this regard, it is necessary to search for and develop new effective methods to control *P. aeruginosa* contamination in food processing enterprises. Preparations based on lactic acid bacteria synthesizing various antimicrobial compounds can be considered as an alternative to chemical disinfectants and preservatives.

**Purpose** is a comparative evaluation of antimicrobial activity of different strains of lactic acid bacteria in relation to representatives of *P. aeruginosa* isolated from different sources.

**Materials and methods:** the objects of the study were strains of lactic acid bacteria (LAB) *Lactobacillus helveticus*, *Streptococcus thermophilus*, *Lactococcus lactis* and *Lactiseibacillus paracasei* from the collection of FGANU VNIMI. The antimicrobial activity of the strains under study was evaluated against the type test strain *P. aeruginosa* ATCC 25668. Antimicrobial activity was investigated by co-culture method in accordance with MU 2.3.2.2789-10. For the lactic acid bacteria strains that showed the highest antimicrobial activity against *P. aeruginosa* ATCC 25668, the antimicrobial activity against wild strains of *P. aeruginosa* 42, *P. aeruginosa* M1 and *P. aeruginosa* 47 was additionally investigated.

**Results:** Differences in the degree of antagonistic activity of lactic acid bacteria representatives in relation to the collection strain of *P. aeruginosa* and wild-type isolates were shown. The high efficiency of lactobacilli representatives belonging to the species *L. helveticus*, in particular strain *L. helveticus* Bbn4, as an antimicrobial agent against strains of *P. aeruginosa* of both collection and wild type was confirmed.

**Conclusion:** The results of the study showed that representatives of lactobacilli, in particular *L. helveticus*, had high inhibitory activity against strains of collection and wild type *P. aeruginosa*, isolated from different sources, and can be considered as promising antimicrobial agents against such a complex pathogen as *P. aeruginosa*. In particular, the strain with the highest inhibitory activity, *L. helveticus* Bbn4, may be a potential antagonist strain with a broad spectrum of antimicrobial activity. However, further studies are needed to identify the mechanisms of antimicrobial action of this culture.

**Keywords:** *Pseudomonas aeruginosa*; lactic acid bacteria; antimicrobial activity; *Lactobacillus helveticus*; protective starter cultures; wild strain isolates; co-cultivation method; biocontrol of foodborne pathogens; dairy product contamination; bacterial antagonistic properties

## Correspondence:

Svetlana A. Kishilova

E-mail: s\_kishilova@vnimi.org

## Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

**Received:** 17.09.2024

**Accepted:** 15.03.2025

**Published:** 31.03.2025

**Copyright:** © 2025 The Authors



**To cite:** Kishilova, S.A., & Leonova, V.A. (2025). Comparative study of the antimicrobial activity of lactic acid bacteria strains against *Pseudomonas aeruginosa*. *FOOD METAENGINEERING*, 3(1), 42-55. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.72>



## ВВЕДЕНИЕ

Бактерии рода *Pseudomonas aeruginosa* (синегнойная палочка) — грамотрицательные психротрофные условно-патогенные микроорганизмы, часто контаминирующие питьевую воду и пищевые продукты с высоким содержанием воды и pH 6,5–7,4 (красное мясо, рыба, птица, молоко и молочные продукты) (Chang et al., 2024). Питательные вещества молока, такие как белок, жир, углеводы и витамины, делают молоко восприимчивым к загрязнению представителями псевдомонад (Li et al., 2023). Источниками контаминации могут быть молочный скот, вода, корма, доильное и производственное оборудование, в связи чем существуют риски заражения *P. aeruginosa* на всех стадиях производства питьевого молока и молочных продуктов (Badawy et al., 2023). Благодаря высокой адаптации к низким температурам, *P. aeruginosa* способна непрерывно размножаться при температуре  $(4 \pm 2)^\circ\text{C}$ , что приводит к порче молока и молочных продуктов в процессе транспортировки и хранения (Li et al., 2023).

Большую проблему для молочной промышленности представляют внеклеточные ферменты *P. aeruginosa* из-за их высокой термостабильности. После пастеризации активность ферментов *P. aeruginosa* сохраняется до 60–70% даже в случае тепловой деструкции клеток патогена, и до 30–40% при УВТ-обработке (Narvhusm et al., 2021). К внеклеточным ферментам *P. aeruginosa* относятся протеазы и липазы. Протеазы *P. aeruginosa* гидролизуют как  $\kappa$ -казеин, так и  $\alpha_{s1}$ -казеин и  $\beta$ -казеин, что приводит к разрушению казеиновых мицелл и гелеобразованию. Под действием липаз в молоке образуются свободные жирные кислоты, обуславливающие прогорклый вкус (Narvhusm et al., 2021; Caldera et al., 2016).

Рост устойчивости *Pseudomonas aeruginosa* и ее способность к биопленкообразованию представляют серьезную угрозу для пищевой безопасности. В процессе роста *P. aeruginosa* синтезирует экзополисахариды, образуя биопленку, которая обеспечивает дополнительную защиту бактерий от неблагоприятных факторов окружающей среды. Благодаря наличию жгутиков и пилей способность к формированию биопленок у *P. aeruginosa* чрезвычайно высока (Лазарева и др., 2015). Этот механизм значительно усиливает устойчивость бактерий к действию дезинфектантов и пищевых консервантов (Chen et al., 2023; Chang et al., 2024), особенно в сочетании с врожденной многофакторной устойчивостью к антимикробным препаратам, характерной

для данного вида. Способность *P. aeruginosa* быстро адаптироваться к различным стрессовым воздействиям, включая антимикробные препараты и традиционные дезинфицирующие средства, создает реальный риск попадания устойчивых форм в пищевые цепочки человека (Atolani et al., 2020; Тутельян и соавт., 2019). Эти факторы подчеркивают необходимость разработки альтернативных стратегий контроля *P. aeruginosa* в пищевой промышленности, способных эффективно преодолевать барьеры, связанные с устойчивостью и биопленкообразованием.

Одним из перспективных направлений в разработке альтернативных методов контроля является использование молочнокислых бактерий и их метаболитов в качестве биозащитных агентов. В качестве замены традиционным химическим дезинфектантам и консервантам, в том числе для борьбы с биопленками, рассматривается применение молочнокислых бактерий (МКБ) и их биологически активных соединений (Bonneville et al., 2021; Mokoena et al., 2021). Живые культуры МКБ, обладающие антимикробной активностью, способны снижать риск микробной порчи продуктов и увеличивать их срок хранения (Marcelli et al., 2024). Антимикробное действие МКБ обусловлено синтезом веществ, нарушающих целостность клеточных мембран, ингибирующих синтез клеточной стенки и препятствующих транспорту питательных веществ через мембрану (Zapasnik et al., 2022). Например, в экзопротеоме штамма *Lactobacillus plantarum* LB95, выделенного из ферментированных оливок, были обнаружены гидролитические ферменты, разрушавшие матрицу биопленки *Listeria monocytogenes*, повышая ее чувствительность к дезинфицирующим средствам (Bonneville, 2021). Несмотря на перспективность данного подхода, стандартизированные процедуры применения МКБ для целей биодезинфекции пока не разработаны, однако ряд их метаболитов, таких как низин, синтезируемый *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, уже широко используется в пищевой промышленности (Стоянова и соавт., 2012).

Ингибирующая активность молочнокислых бактерий обусловлена синтезом различных антимикробных соединений. Наиболее значимыми являются органические кислоты и бактериоцины. Органические кислоты ингибируют транспорт питательных веществ через цитоплазматическую мембрану и снижают внутриклеточный pH микроорганизмов. Оптимальный pH для роста *P. aeruginosa* составляет 7,2–7,5, возможно сохра-



С. А. Кишилова, В. А. Леонова

нение жизнеспособности в диапазоне 4,5–9,0 (Токарева, 2015). Данные исследований ингибирующего влияния pH на штаммы синегнойной палочки, выделенные из молочных продуктов в Багдаде, показали, что только 12 % изолятов сохраняли жизнеспособность при pH 2,3 (Al-Shammary, 2015). Бактериоцины — рибосомально-синтезируемые антимикробные пептиды, которые вызывают пермеабиллизацию клеточной стенки, приводящую к утечке питательных веществ из клетки и ее гибели (Стоянова и соавт., 2012; Singh et al., 2022). Кроме того, есть данные об антимикробной активности пептидов, образующихся в результате действия протеаз молочнокислых бактерий на казеин — основной белок молока (Фёдорова и соавт., 2018).

Ранее с цехового оборудования частного молочного хозяйства нами были выделены штаммы *P. aeruginosa* 42 и *P. aeruginosa* 47, показавшие ряд отличий по характеру роста на средах культивирования, антибиотикорезистентности, чувствительности к литическому действию синегнойного бактериофага, действию дезинфицирующего средства (нейтральный анолит), в том числе с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ) (Кишилова, 2024). Штамм *P. aeruginosa* M1 был выделен из сливочного масла при проведении микробиологического контроля.

Таблица 1  
Исследуемые штаммы МКБ

Table 1  
Tested LAB Strains

№ п/п	Вид	Наименование штамма	Источник выделения
1	<i>Lactobacillus helveticus</i>	AK	Aeces здорового человека
2		14вв	Национальный ферментированный зерновой продукт ЮАР — махеву
3		2вв	Национальный ферментированный зерновой продукт ЮАР — махеву
4		5вв	Национальный ферментированный зерновой продукт ЮАР — махеву
5	<i>Lactococcus lactis</i>	Б6п4	Самоквасный кисломолочный продукт
6		MA1	Национальный ферментированный зерновой продукт ЮАР — махеву
7		AM1	Национальный ферментированный зерновой продукт ЮАР — махеву
8		dLA	Сметана
9	<i>Streptococcus thermophilus</i>	16t	Самоквасный кисломолочный продукт
10		163	Самоквасный кисломолочный продукт
11		159	Листья апельсина
12		ABK	Кефирный грибок (Бегунова и др. 2021)
13	<i>Lacticaseibacillus paracasei</i>	MA2	Национальный ферментированный зерновой продукт ЮАР — махеву (Моисеенко и др. 2022)
14		MA3	Национальный ферментированный зерновой продукт ЮАР — махеву (Моисеенко и др. 2022)
15		KF1	Кефирный грибок (Бегунова и др. 2021)

Цель данного исследования: сравнительная оценка антимикробной активности различных штаммов МКБ по отношению к представителям *P. aeruginosa*.

Исследовательские вопросы:

RQ#1: Проявляют ли коллекционные штаммы МКБ антимикробную активность по отношению к типовому коллекционному тест-штамму *P. aeruginosa* ATCC 25668?

RQ#2: Проявляют ли штаммы, обладающие антимикробной активностью к коллекционному тест-штамму *P. aeruginosa* ATCC 25668, антимикробное действие по отношению к диким штаммам *P. aeruginosa* 42, *P. aeruginosa* 47 и *P. aeruginosa* M1, выделенным из разных источников?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ  
Объекты исследования

Объектами исследования являлись штаммы молочнокислых бактерий (МКБ) из коллекции пробиотических и молочнокислых микроорганизмов Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (ФГАНУ «ВНИМИ»). Для проведения исследования использовались 15 штаммов МКБ, перечень исследуемых штаммов МКБ представлен в Таблице 1.

## Методы

Антимикробную активность исследовали методом совместного культивирования в соответствии с МУ 2.3.2.2789–10. Из всех экспериментальных и контрольных образцов готовили ряд последовательных десятикратных разведений, из которых проводили посев в трех повторностях. Посевы культивировали при температуре  $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Подсчет клеток *P. aeruginosa* проводили через 24 ч и через 48 ч.

## Процедура исследования

### Подготовка культур

Исследуемые штаммы МКБ хранили в лиофилизированном состоянии при температуре минус  $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Восстановление лиофилизированных культур проводили в стерильном обезжиренном молоке (ОМС) марки «Стандарт» (Комплимилк, Слуцкий сыродельный комбинат, г. Слуцк, Беларусь), путем инкубации в течение 16 часов. Инкубацию штаммов *L. helveticus* и *S. thermophilus* проводили при температуре при температуре  $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ , штаммов *L. lactis*, *L. paracasei* — при температуре  $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

Штаммы *P. aeruginosa* хранили на полужидком питательном агаре при температуре  $(4 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Перед проведением исследований пересевали на среду СПА (НПЦ Биоконпас-С, Россия) и культивировали при температуре  $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Для приготовления инокулятов *P. aeruginosa* из культур, выросших на СПА, готовили суспензии с мутностью, эквивалентной 5–6 ед. по MacFarland (Biomerieux, Франция).

### Подготовка образцов

Для определения антимикробной активности в 20 см<sup>3</sup> стерильного обезжиренного молока вносили по 1 см<sup>3</sup> инокулятов исследуемых штаммов МКБ и *P. aeruginosa* и инкубировали в течение 24 и 48 часов при температуре  $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Контролем являлся образец, инокулированный только 1 см<sup>3</sup> *P. aeruginosa*.

### Определение антимикробной активности

После инкубации в каждом из образцов определяли количество *P. aeruginosa* путем посева на селективную среду для псевдомонад — цетримидный агар (Himedia, Индия). Посевы на цетримидном агаре инкубировали

при температуре  $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$  в течение 24 ч, затем проводили подсчет выросших колоний.

На первом этапе оценивалась антимикробная активность исследуемых штаммов по отношению к коллекционному тест-штамму *P. aeruginosa* ATCC 25668, полученному из Государственной коллекции патогенных микроорганизмов и клеточных культур «ГКПМ-Оболенск». Для штаммов МКБ, показавших наибольшую антимикробную активность по отношению к *P. aeruginosa* ATCC 25668, дополнительно исследовалась антимикробная активность по отношению к диким штаммам *P. aeruginosa* 42, *P. aeruginosa* 47 и *P. aeruginosa* M1.

## Анализ результатов

Для обработки результатов и построение графиков использовали программу MS Office Excel 2016. Эксперименты проводили в трех независимых повторностях, результаты выражены как среднее значение, на графиках указано  $\pm$  стандартное отклонение. Статистически значимыми по двустороннему критерию Стьюдента считали отличия при  $p < 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе исследований продемонстрирована антимикробная активность исследуемых штаммов МКБ по отношению к коллекционному тест-штамму *P. aeruginosa* ATCC 25668. По результатам данного этапа были отобраны два штамма: *S. thermophilus* 16t и *L. helveticus* Ббн4, показавшие наибольшую ингибирующую активность. На втором этапе исследований проводилось определение антимикробной активности выбранных МКБ по отношению к изолятам *P. aeruginosa* 42, *P. aeruginosa* 47 и *P. aeruginosa* M1 дикого типа.

### Исследование антимикробной активности МКБ по отношению к коллекционному тест-штамму *P. aeruginosa* ATCC 25668

Результаты исследования антимикробной активности исследуемых штаммов МКБ по отношению к *P. aeruginosa* ATCC 25668 представлены на Рисунках 1–4.

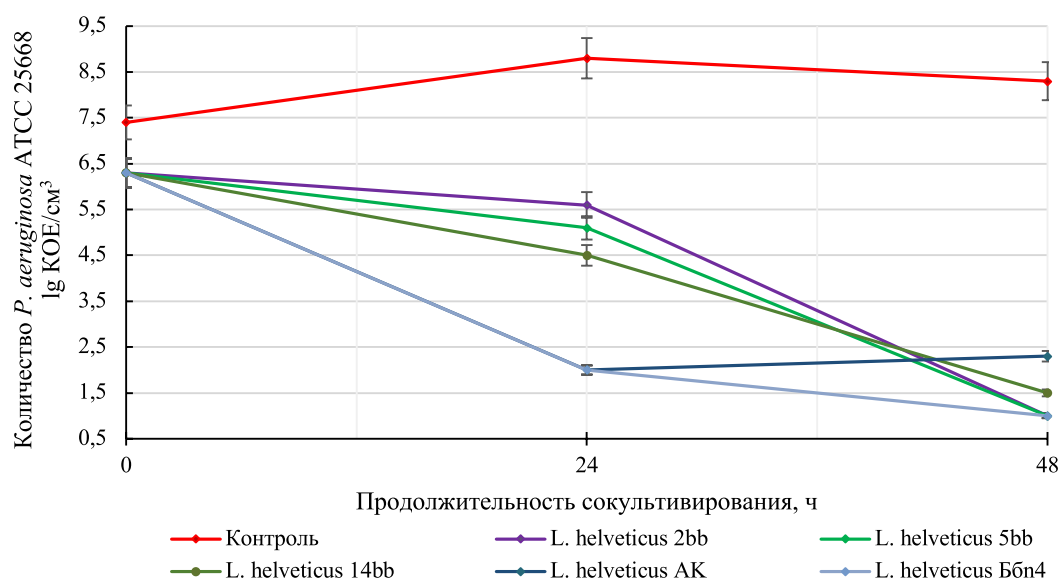
На Рисунке 1 представлены результаты антимикробной активности представителей *L. helveticus* по отношению к типовому коллекционному штамму *P. aeruginosa* ATCC 25668

Рисунок 1

**Антимикробная активность *L. helveticus* по отношению к *P. aeruginosa* ATCC 25668**

Figure 1

**Antimicrobial Activity of *L. Helveticus* against *P. Aeruginosa* ATCC 25668**



В целом, все изученные штаммы *L. helveticus* оказывали выраженное ингибирующее действие на синегнойную палочку. Через 48 часов сокультивирования количество клеток *P. aeruginosa* ATCC 25668 снижалось на 4–5 порядков и составляло от  $2,2 \times 10^2$  до  $1,0 \times 10^1$  КОЕ/см<sup>3</sup>. В то же время в контрольном образце наблюдался рост монокультуры *P. aeruginosa* ATCC 25668 — до  $6,4 \times 10^8$  КОЕ/см<sup>3</sup> через 24 ч с незначительным снижением до  $1,9 \times 10^8$  КОЕ/см<sup>3</sup> через 48 ч. При этом ингибирование роста патогена было наиболее выражено у штамма *L. helveticus* Ббп4 — количество *P. aeruginosa* ATCC 25668 уже через 24 ч составило  $1,0 \times 10^2$  КОЕ/см<sup>3</sup> с дальнейшим снижением количества клеток на порядок — до  $1,0 \times 10^1$  КОЕ/см<sup>3</sup>.

На Рисунке 2 представлены результаты антимикробной активности представителей *L. paracasei* по отношению к коллекционному штамму *P. aeruginosa* ATCC 25668

Ингибирующее действие штаммов *L. paracasei*, за исключением *L. paracasei* АВК, на рост *P. aeruginosa* ATCC 25668 было слабым. Через 24 ч сокультивирования во всех вариантах наблюдалось или отсутствие ингибирующего эффекта или даже рост патогена. В то же время при сокультивировании с *L. paracasei* АВК через 48 ч количество патогена снижалось до  $1,0 \times 10^3$  КОЕ/см<sup>3</sup>, что может быть связано с накоплением культурой антимикробных метаболитов.

На Рисунке 3 представлены результаты изучения антимикробной активности представителей *S. thermophilus* по отношению к коллекционному штамму *P. aeruginosa* ATCC 25668

Все три изученных штамма *S. thermophilus* активно подавляли рост патогена и через 48 часов количество клеток *P. aeruginosa* ATCC 25668 часов снизилось на 5 порядков и составило  $1,0 \times 10^1$  КОЕ/см<sup>3</sup>, при увеличении за тот же период количества клеток синегнойной палочки в контрольном образце. Причем *S. thermophilus* 163 через 24 часа практически не оказывал подавляющего действия на синегнойную палочку, значительно усиливая его к 48 часам, что, возможно связано с особенностями штамма и медленным накоплением антимикробных метаболитов.

Представители *L. lactis* не обладали значительной антагонистической активностью по отношению к *P. aeruginosa* ATCC 25668. Максимальный ингибирующий эффект оказывал штамм *L. lactis* AM1. При сокультивировании с данным штаммом количество клеток *P. aeruginosa* ATCC 25668 через 24 ч составило  $2,3 \times 10^7$  КОЕ/см<sup>3</sup>, снижаясь через 48 ч до  $6,5 \times 10^3$  КОЕ/см<sup>3</sup>.

В целом, можно констатировать, что ингибирующее действие *L. helveticus* и *S. thermophilus* на синегнойную палочку было более выражено по сравнению с *L.*

Рисунок 2

Антимикробная активность *L. paracasei* по отношению к *P. aeruginosa* ATCC 25668

Figure 2

Antimicrobial Activity of *L. paracasei* against *P. aeruginosa* ATCC 25668

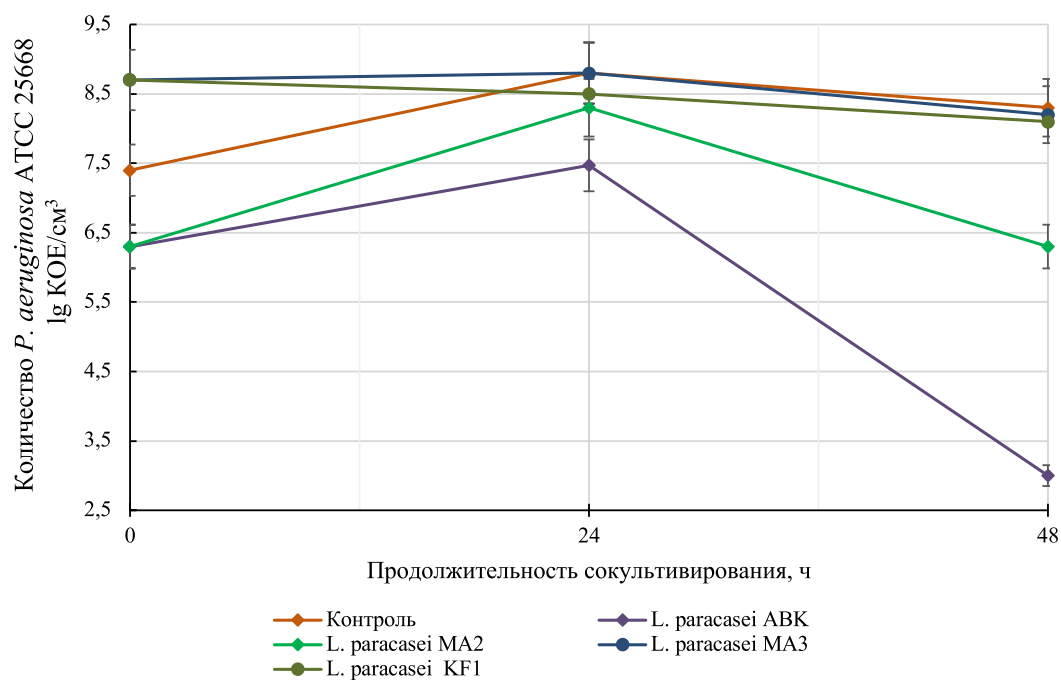
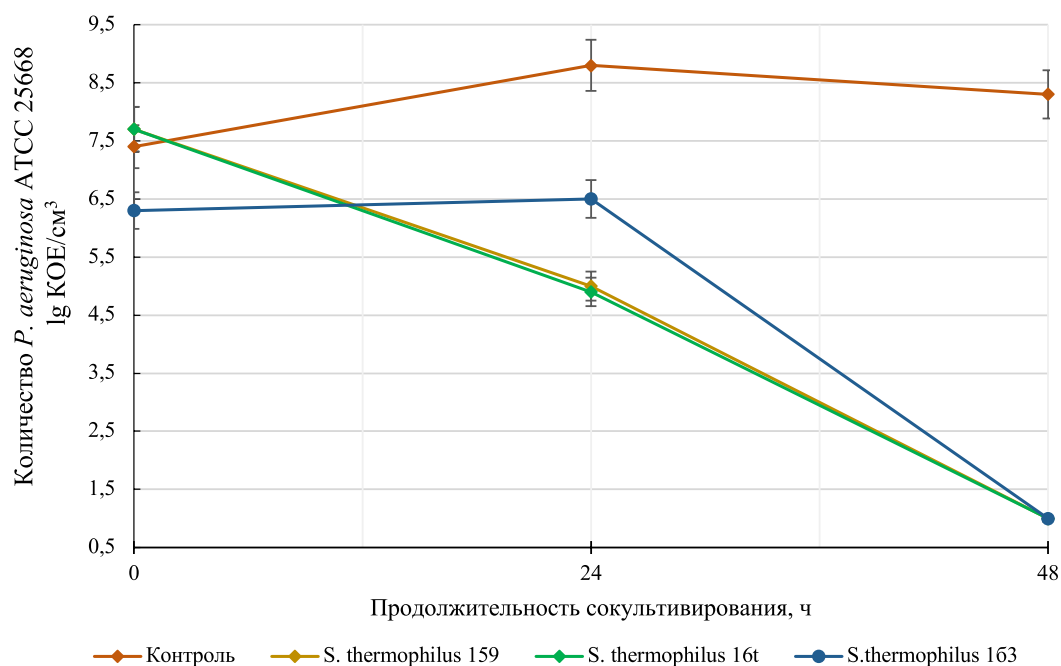


Рисунок 3

Антимикробная активность *S. thermophilus* по отношению к *P. aeruginosa* ATCC 25668

Figure 3

Antimicrobial Activity of *S. Thermophilus* against *P. aeruginosa* ATCC 25668



*paracasei* и *L. lactis*. В результате первого этапа исследований, для подтверждения ингибирующих свойств МКБ относительно изолятов *P. aeruginosa* 42, *P. aeruginosa* 47 и *P. aeruginosa* M1 были выбраны 2 штамма: *S. thermophilus* 16t и *L. helveticus* Ббн4.

Исследование антимикробной активности МКБ по отношению к изолятам *P. aeruginosa* 42, *P. aeruginosa* 47 и *P. aeruginosa* M1 дикого типа

На Рисунке 4 представлены результаты изучения антимикробной активности штаммов *S. thermophilus* 16t и *L. helveticus* Ббн4 по отношению к изоляту *P. aeruginosa* 47

Показана высокая антимикробная активность *L. helveticus* Ббн4 по отношению *P. aeruginosa* 47. Количество клеток патогена снижалось на 6 порядков, с дальнейшим снижением на порядок к 48 ч сокультивирования и составил  $2,0 \times 10^3$  КОЕ/см<sup>3</sup>, по сравнению с  $1,0 \times 10^9$  КОЕ/см<sup>3</sup> в контроле, что согласуется с результатами, полученными для коллекционного типового штамма. В то же время, ингибирующее действие *S. thermophilus* 16t на *P. aeruginosa* 47 было крайне незначительно — через 24 часа даже наблюдался незначительный рост патогена до  $1,5 \times 10^9$  КОЕ/см<sup>3</sup>, а через 48 ч сокультиви-

рования количество клеток синегнойной палочки составило  $4,0 \times 10^7$  КОЕ/см<sup>3</sup>. Таким образом, можно предположить наличие у изолята *P. aeruginosa* 47, в отличие от коллекционного штамма, устойчивости к метаболитам *S. thermophilus* 16t. Резистентность может возникать вследствие изменения поверхностных структур клетки и продукции протеолитических ферментов, разрушающих бактериоцины, синтезируемые МКБ (Андюков, 2018). В результате проведенных ранее исследований, обнаружены различия в эффективности действия дезинфицирующих растворов на штаммы *P. aeruginosa*. *P. aeruginosa* 47 сохранял жизнеспособность при воздействии анолита с добавлением ПАВ окиси дециламина и окиси алкилдиметиламина (Кишилова & Маневич 2024). Учитывая также большую устойчивость *P. aeruginosa* 47 к ряду антибактериальных препаратов по сравнению с *P. aeruginosa* ATCC 25668 и *P. aeruginosa* 42 (Кишилова и др., 2024), можно предположить, что данный штамм обладает более эффективной системой эффлюкса.

На Рисунке 5 представлены результаты изучения антимикробной активности штаммов *S. thermophilus* 16t и *L. helveticus* Ббн4 по отношению к изоляту *P. aeruginosa* M1

Рисунок 4

#### Антимикробная активность штаммов МКБ по отношению к *P. aeruginosa* 47

Figure 4

#### Antimicrobial Activity of LAB Strains against *P. aeruginosa* 47

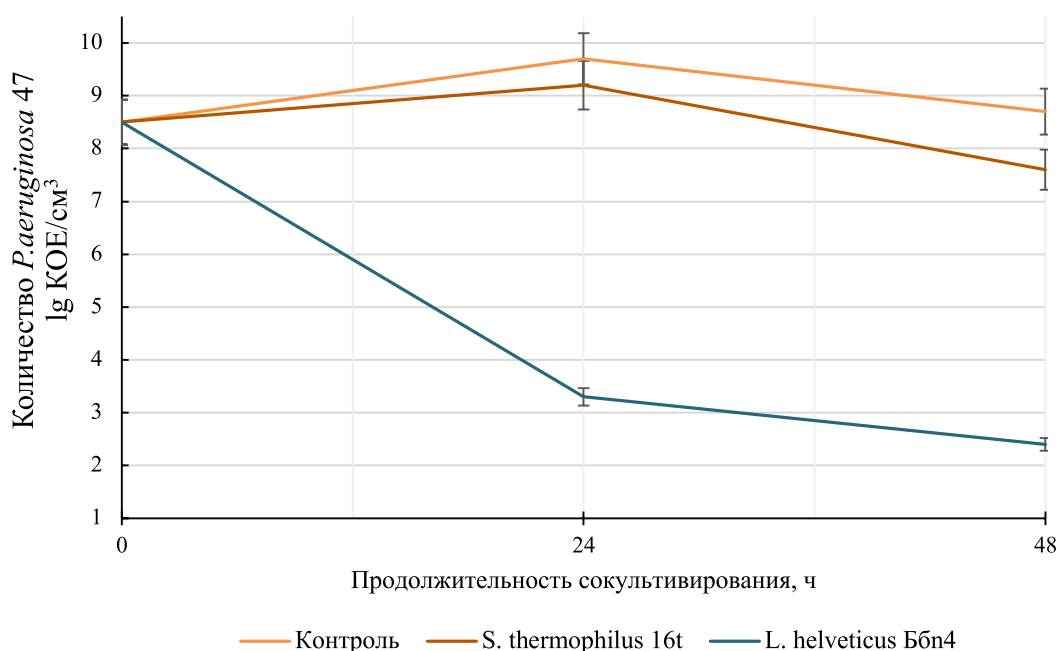


Рисунок 5  
Антимикробная активность штаммов МКБ по отношению к *P. aeruginosa* M1

Figure 5  
Antimicrobial Activity of LAB Strains against *P. aeruginosa* M1

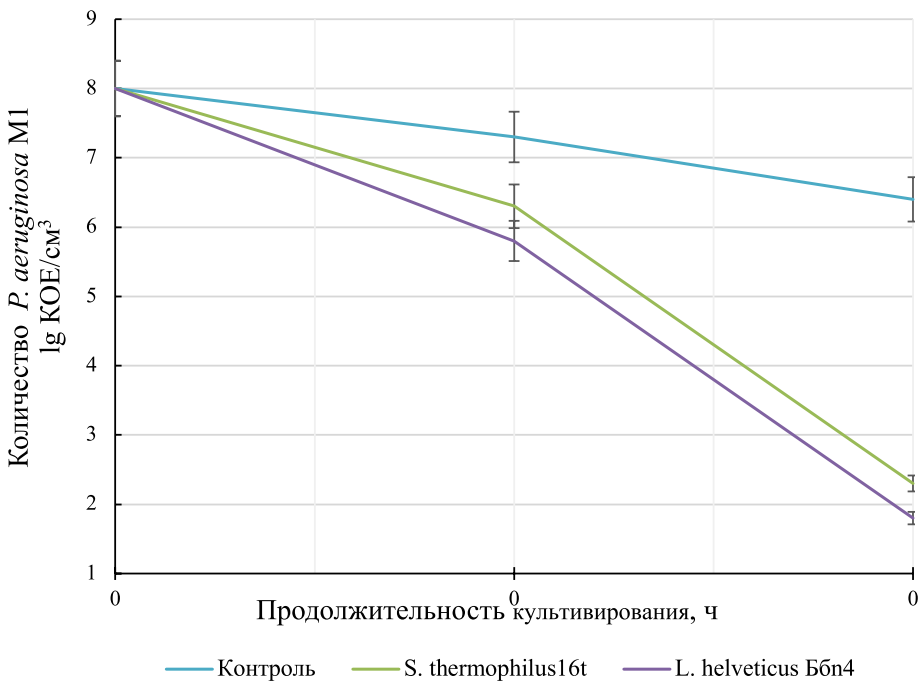
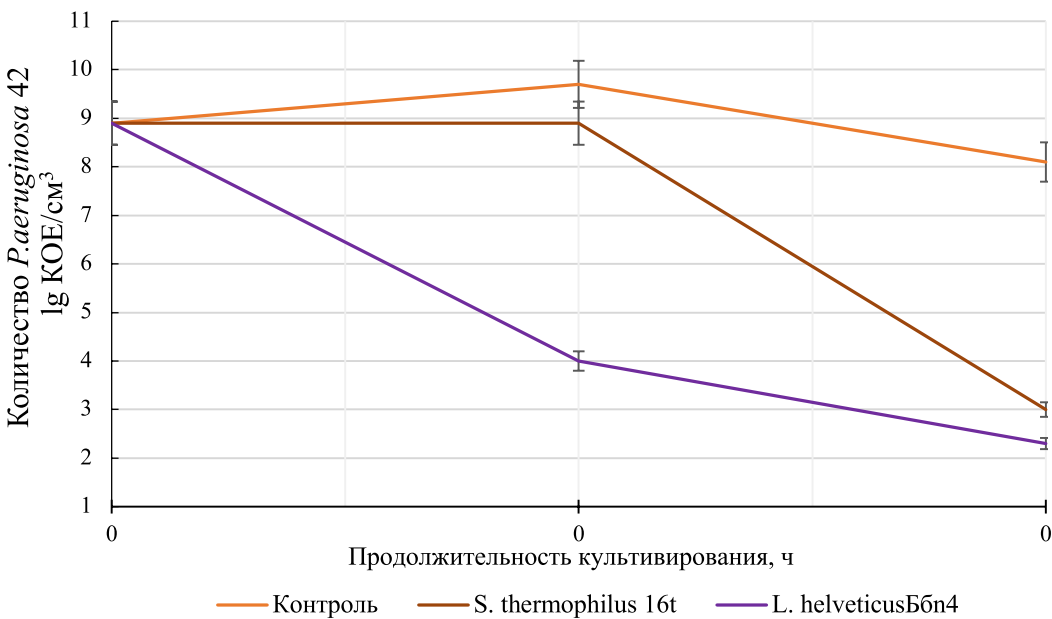


Рисунок 6  
Антимикробная активность штаммов МКБ по отношению к *P. aeruginosa* 42

Figure 6  
Antimicrobial Activity of LAB Strains against *P. aeruginosa* 42





Представленные данные свидетельствуют, что оба штамма МКБ оказывали значительное ингибирующее действие на *P. aeruginosa* М1, снижая количество клеток патогена через 24 часа на 1,5–2 порядка и на 5,5–6 порядков через 48 часов, что согласуется с данными для коллекционного штамма, при этом действие *L. helveticus* Ббн4 было чуть более выраженным как через 24, так и через 48 часов сокультивирования. При сокультивировании *L. helveticus* Ббн4 и *P. aeruginosa* М1 через 24 ч количество клеток *P. aeruginosa* М1 составило  $6,0 \times 10^5$  КОЕ/см<sup>3</sup>, через 48 ч количество клеток *P. aeruginosa* М1 снизилось до  $7,0 \times 10^1$  КОЕ/см<sup>3</sup>.

На Рисунке 6 представлены результаты изучения антимикробной активности штаммов *S. thermophilus* 16t и *L. helveticus* Ббн4 по отношению к изоляту *P. aeruginosa* 42

При сокультивировании *L. helveticus* Ббн4 и *P. aeruginosa* 42 через 24 ч количество клеток *P. aeruginosa* составило  $1,0 \times 10^4$  КОЕ/см<sup>3</sup>, а через 48 ч –  $4,0 \times 10^1$  КОЕ/см<sup>3</sup>. В контрольном образце количество клеток *P. aeruginosa* варьировалось от  $2,0 \times 10^8$  до  $6,0 \times 10^9$  КОЕ/см<sup>3</sup> в течение периода культивирования. По результатам исследований, наибольшую антимикробную активность по отношению к диким штаммам *P. aeruginosa* 42, *P. aeruginosa* М1 и *P. aeruginosa* 47 проявлял штамм *L. helveticus* Ббн4.

Штамм *S. thermophilus* 16t, показавший высокую антимикробную активность по отношению к типовому коллекционному штамму, подтвердил ее только относительно *P. aeruginosa* М1, выделенному из масла сливочного. Ингибирующее действие *S. thermophilus* 16t на штамм *P. aeruginosa* 42 было менее выражено, по сравнению со штаммом *L. helveticus* Ббн4, и практически отсутствовало при сокультивировании с *P. aeruginosa* 47.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Штамм *Lactobacillus helveticus* Ббн4 продемонстрировал наибольшую антимикробную активность против штаммов *Pseudomonas aeruginosa* различного происхождения среди исследованных молочнокислых бактерий. При сокультивировании с *L. helveticus* Ббн4 количество клеток *P. aeruginosa* во всех исследуемых образцах снижалось примерно на шесть порядков. Эти результаты подтверждают литературные данные о выраженной антимикробной активности представителей *L. helveticus* по отношению как к грамположительным, так и к грамотрицательным патогенным микроорганизмам, включая *P. aeruginosa* (Hassan et al., 2020; Du et al., 2024). Следова-

тельно, штамм *L. helveticus* Ббн4 может рассматриваться как перспективный биологический агент для биоконтроля контаминации пищевых продуктов, связанной с *P. aeruginosa*.

Антимикробная активность молочнокислых бактерий в отношении *P. aeruginosa* также подтверждается результатами других исследований. Так, Rana et al. (2020) продемонстрировали ингибирующее действие бесклеточных супернатантов *Lactobacillus fermentum* и *Lactobacillus rhamnosus* на формирование биопленки *P. aeruginosa*. При этом антибиопленочная активность существенно снижалась после нейтрализации супернатантов, что свидетельствует о ключевой роли органических кислот, синтезируемых молочнокислыми бактериями, в механизме ингибирования. Аналогичные данные получены в исследовании Al-Melkey et al. (2017), где было показано антимикробное действие лактобацилл в отношении штаммов *P. aeruginosa*, обладающих устойчивостью к лекарственным антимикробным препаратам.

Ингибирующее действие *L. helveticus* Ббн4 может быть обусловлено синтезом антимикробных соединений, в первую очередь органических кислот, являющихся сильными ингибиторами роста патогенных микроорганизмов (Ozcelik et al., 2016). Известно, что представители *L. helveticus* являются активными кислотообразователями (Wang et al., 2021; Hati et al., 2018). Кроме того, некоторые представители *L. helveticus* также могут синтезировать бактериоцины, ингибирующие рост пищевых патогенов, в том числе *P. aeruginosa*, и действующие в широком диапазоне pH (Hassan et al., 2020; Angelescu et al., 2022; Jena et al., 2013). Есть данные, подтверждающие эффективность бактериоцинов лактобацилл по отношению к синегнойной палочке в составе биопленок (Ouali et al., 2014). Потенциальное наличие в метагеноме штамма *L. helveticus* Ббн4 антимикробных соединений требует дальнейшего изучения.

*L. helveticus* также могут синтезировать бактериоцины с широким спектром антимикробного действия. Бактериоцины *L. helveticus* ингибируют рост грамположительных и грамотрицательных пищевых патогенов, в том числе *P. aeruginosa*. Данные соединения сохраняют активность в диапазоне pH от 2 до 10 ед. pH и устойчивы к термическому воздействию (Hassan et al., 2020; Angelescu et al., 2022; Jena et al., 2013). За счет своих свойств бактериоцины интересны для пищевой промышленности в качестве потенциальных пищевых консервантов.

*P. aeruginosa* способна продуцировать сидерофоры — низкомолекулярные вещества, способные связывать железо и солюбилизовать его (Лазарева и соавт., 2015). Лактобациллы, в отличие от большинства микроорганизмов, не нуждаются в железе для роста, и сидерофоры *P. aeruginosa* не представляют угрозы их развитию. При этом органические кислоты, являющиеся основными метаболитами МКБ, обладают хелатирующими свойствами и способны связывать из субстрата железо, необходимое для роста *P. aeruginosa* (Quintieri et al., 2019). Кроме того, антимикробное действие бактерий рода *Lactobacillus* может быть связано с индукцией ферментов: литических трансгликозилаз и литических гликозил-гидролаз (эндопептидаз), разрушающих пептидогликан клеточной стенки грамотрицательных бактерий (Фёдорова и соавт., 2018).

Штамм *L. helveticus* Ббп4 можно использовать в качестве защитной заквасочной культуры для производства кисломолочной продукции с целью снижения риска контаминации *P. aeruginosa*. Однако для промышленного применения выбранного штамма необходимы исследования механизма его антимикробного действия. Дальнейшие исследования предполагают изучение метаболитного профиля *L. helveticus* Ббп4 и повышение синтеза антимикробных веществ.

## Ограничения исследования

Полученные результаты не касаются клинических изолятов *P. aeruginosa* с лекарственной устойчивостью, в исследовании проводилась оценка антимикробной активности только по отношению к контаминантам, выделенным на молочных производствах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что представители лактобацилл, в частности *L. helveticus*, обладали высокой ингибирующей активностью относительно штаммов синегнойной палочки как коллекционного, так и дикого типа, выделенных из разных источников, и могут рассматриваться как перспективные антимикробные агенты относительно такого сложного патогена, как *P. aeruginosa*. В частности, штамм с наибольшей ингибирующей активностью *L. helveticus* Ббп4 может потенциально применяться в качестве защитной заквасочной культуры с целью снижения риска контаминации кисломолочной продукции *P. aeruginosa*. Однако необходимы дальнейшие исследования по выявлению механизмов антимикробного действия этой культуры.

## АВТОРСКИЙ ВКЛАД

**Светлана Анатольевна Кишилова:** концептуализация, проведение исследования, формальный анализ, написание черновика рукописи.

**Виктория Александровна Леонова:** проведение исследования, формальный анализ, визуализация результатов, написание рукописи — рецензирование и редактирование.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

**Svetlana A. Kishilova:** conceptualization, investigation, formal analysis, writing — original draft preparation.

**Victoria A. Leonova:** investigation, formal analysis, visualization, writing — reviewing & editing.

## ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCES

- Андрюков, Б. Г., Недашковская, Е. П. (2018). Вступая в пост-антибиотиковую эру: перспективные стратегии поиска новых альтернативных стратегий борьбы с инфекционными заболеваниями. *Здоровье. Медицинская экология. Наука*, (75), 36–50 <https://doi.org/10.5281/zenodo.1488026>
- Andriukov, B. G., Nedashkovskaya, E. P. (2018). Entering the post-antibiotic era: Promising strategies for finding new alternative strategies to combat infectious diseases. *Health. Medical ecology. Science*, (75), 36–50. (In Russ) <https://doi.org/10.5281/zenodo.1488026>
- Бегунова, А. В., Савинова, О. С., Моисеенко, К. В., Глазунова, О. А., Рожкова, И. В., & Фёдорова, Т. В. (2021). Характеристика и функциональные свойства лактобацилл, выделенных из кефирных грибков. *Прикладная биохимия и микробиология*, 57(4), 362–373. <https://doi.org/10.31857/S0555109921040036>

- Begunova, A. V., Savinova, O. S., Moiseenko, K. V., Glazunova, O. A., Rozhkova, I. V., & Fedorova, T. V. (2021). Characterization and functional properties of lactobacilli isolated from kefir grains. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 57(4), 362–373. (In Russ) <https://doi.org/10.31857/S0555109921040036>
- Кишилова, С.А., Маневич, Б.В., & Рожкова, И.В. (2024). Оценка действия биоцидных агентов на штаммы *Pseudomonas aeruginosa*, выделенные из содержимого молочной фермы. *Пищевая промышленность*, (11), 71–76. <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.11.11.013>
- Kishilova, S.A., Manevich, B.V., & Rozhkova, I.V. (2024). Evaluation of the effect of biocidal agents on *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from dairy farm contents. *Food Industry*, (11), 71–76. (In Russ) <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.11.11.013>
- Кишилова, С.А., Колоколова, А.Ю., & Рожкова И.В. (2024). Антимикробная активность метаболитных комплексов лактобактерий в отношении *Pseudomonas aeruginosa*. *Биофизика*, 69(2), 324–332. <https://doi.org/10.31857/S0006302924020141>
- Kishilova, S.A., Kolokolova A. Yu., & Rozhkova, I.V. (2024). Antimicrobial activity of metabolite complexes of lactobacillus against pseudomonas aeruginosa. *Biophysics*, 69(2), 324–332. <https://doi.org/10.31857/S0006302924020141>
- Лазарева, А. В., Чеботарь, И. В., Крыжановская, О. А., Чеботарь, В. И., & Маянский, Н. А. (2015). *Pseudomonas aeruginosa*: патогенность, патогенез и патология. *Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия*, 17(3), 170–186.
- Lazareva, A. V., Chebotar, I. V., Kryzhanovskaya, O. A., Chebotar, V. I., & Mayansky, N. A. (2015). *Pseudomonas aeruginosa*: Pathogenicity, pathogenesis and diseases. *Clinical Microbiology and Antimicrobial Chemotherapy*, 17(3), 170–186. (In Russ)
- Моисеенко, К. В., Бегунова, А. В., Рожкова, И. В., & Федорова, Т. В. (2022). Выделение и характеристика штаммов *Lactocaseibacillus paracasei*, из кефирных грибков и традиционного зернового продукта ЮАР-махеу, *Актуальная биотехнология*, (1), 111–114.
- Moiseenko, K. V., Begunova, A. V., Rozhkova, I. V., & Fedorova, T. V. (2022). Isolation and characterization of strains of *Lactocaseibacillus paracasei*, from kefir grains and a traditional grain product of South Africa-mahevu. *Actual Biotechnology*, (1), 111–114. (In Russ).
- Стойанова, Л. Г., Устюгова, Е. А., & Нетрусов, А. И. (2012). Антимикробные метаболиты молочнокислых бактерий: разнообразие и свойства (обзор). *Прикладная биохимия и микробиология*, 48(3), 259–259.
- Stoyanova, L.G., Ustyugova, E.A., & Netrusov, A.I. (2012). Antibacterial metabolites of lactic acid bacteria: Their diversity and properties. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 48(3), 259–259. (In Russ).
- Токарева, Д. Н., & Худеева, К. А. (2015). Стимулирование продукции пеоцианина бактерией *Pseudomonas aeruginosa*. *Высокие технологии в современной науке и технике: сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов* (с. 234–238). Томск: Изд-во ТПУ.
- Tokareva, D. N., & Khudeeva, K. A. (2015). Stimulation of pyocyanin production by the bacterium *Pseudomonas aeruginosa*. *High technologies in modern science and technology: collection of scientific papers of the IV International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students* (с. 234–238). (In Russ). Tomsk: TPU Publishing House.
- Тутельян, А. В., Юшина, Ю. К., Соколова, О. В., Батаева, Д. С., Фесюн, А. Д., & Датий, А. В. (2019). Образование биологических пленок микроорганизмов на пищевых производствах. *Вопросы питания*, 88(3), 32–43. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10027>
- Tutelyan, A. V., Yushina, Y. K., Sokolova, O. V., Bataeva, D. S., Fesyun, A. D., & Datiy, A. V. (2019). Formation of biological films by microorganisms in food productions. *Voprosy Pitaniia*, 88(3), 32–43. (In Russ). <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10027>
- Фёдорова, Т. В., Васина, Д. В., Бегунова, А. В., Рожкова, И. В., Раскошная, Т. А., & Габриэлян, Н. И. (2018). Антагонистическая активность молочнокислых бактерий *Lactobacillus SPP.* в отношении клинических изолятов *Klebsiella pneumoniae*. *Прикладная биохимия и микробиология*, 54(3), 264–276. <https://doi.org/10.7868/S0555109918030054>

- Fedorova, T.V., Vasina, D.V., Begunova, A.V., Rozhkova, I.V., Raskoshnaya, T.A., & Gabrielyan, N.I. (2018). Antagonistic activity of lactic acid bacteria *Lactobacillus* SPP. against clinical isolates of *Klebsiella pneumoniae*. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 54(3), 264–276. (In Russ) <https://doi.org/10.7868/S0555109918030054>
- Al-Malkey, M. K., Ismeeal, M. C., Al-Hur, F. J. A., Mohammed, S. W., & Nayyef, H. J. (2017). Antimicrobial effect of probiotic *Lactobacillus* spp. on *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Contemporary Medical Sciences*, 3(10), 218–223. <https://doi.org/doi.org/10.22317/jcms.06201704>
- Al-Shammary, A. H. A. (2015). The effect of heat treatment, pH and osmotic pressure on viability of *Pseudomonas aeruginosa* isolated from raw dairy products in Baghdad. *International Journal of Advanced Research*, 3(3), 675–681.
- Angelescu, I. R., Grosu-Tudor, S. S., Cojoc, L. R., Maria, G. M., Chirițoiu, G. N., Munteanu, C. V., & Zamfir, M. (2022). Isolation, characterization, and mode of action of a class III bacteriocin produced by *Lactobacillus helveticus* 34.9. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(12), 220. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03408-z>
- Atolani, O., Baker, M. T., Adeyemi, O. S., Olanrewaju, I. R., Hamid, A. A., Ameen, O. M., Oguntoye, S.O., & Usman, L. A. (2020). COVID-19: Critical discussion on the applications and implications of chemicals in sanitizers and disinfectants. *EXCLI Journal*, 19, 785–799. <https://doi.org/10.17179/excli2020-1386>
- Badawy, B., Moustafa, S., Shata, R., Sayed-Ahmed, M. Z., Alqahtani, S. S., Ali, M. S., Alam, N., Ahmad, N., Kasem, N., Elbaz, E., El-Bahkiry, H.S., Radwan, R.M., El-Gohary, A. & Elsayed, M. M. (2023). Prevalence of multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa* isolated from dairy cattle, milk, environment, and workers' hands. *Microorganisms*, 11(11), 2775. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11112775>
- Bonneville, L., Maia, V., Barroso, I., Martínez-Suárez, J. V., & Brito, L. (2021). *Lactobacillus plantarum* in dual-species biofilms with *Listeria monocytogenes* enhanced the anti-*Listeria* activity of a commercial disinfectant based on hydrogen peroxide and peracetic acid. *Frontiers in Microbiology*, 12, 631627. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631627>
- Caldera, L., Franzetti, L., Van Coillie, E., De Vos, P., Stragier, P., De Block, J., & Heyndrickx, M. (2016). Identification, enzymatic spoilage characterization and proteolytic activity quantification of *Pseudomonas* spp. isolated from different foods. *Food Microbiology*, 54, 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.10.004>
- Chang, G., Li, Q., Wang, T., Zhang, B., Wu, W., Lv, C., Sun, T., Zhou T., Zheng, W, Wang, Y. & Wang, X. (2024). Characterization of *Pseudomonas* spp. contamination and in situ spoilage potential in pasteurized milk production process. *Food Research International*, 188, 114463. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114463>
- Chen, S. Y., Yang, R. S., Ci, B. Q., Xin, W. G., Zhang, Q. L., Lin, L. B., & Wang, F. (2023). A novel bacteriocin against multiple foodborne pathogens from *Lactocaseibacillus rhamnosus* isolated from juice ferments: ATF perfusion-based preparation of viable cells, characterization, antibacterial and antibiofilm activity. *Current Research in Food Science*, 6, 100484. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100484>
- Du, Y., Xu, J., Li, J., & Wu, R. (2024). Evaluation of probiotic properties and safety of *Lactobacillus helveticus* LH10 derived from Vinegar through comprehensive analysis of genotype and phenotype. *Microorganisms*, 12(4), 831. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040831>
- Hassan, M. U., Nayab, H., Shafique, F., Williamson, M. P., Almansouri, T. S., Asim, N., Shafi, N., Khalid, M., Ali, N., & Akbar, N. (2020). Probiotic properties of *Lactobacillus helveticus* and *Lactobacillus plantarum* isolated from traditional Pakistani yoghurt. *BioMed Research International*, 2020(1), 8889198. <https://doi.org/10.1155/2020/8889198>
- Hati, S., Patel, N., & Mandal, S. (2018). Comparative growth behaviour and biofunctionality of lactic acid bacteria during fermentation of soy milk and bovine milk. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 10, 277–283. <https://doi.org/10.1007/s12602-017-9279-5>
- Jena, P. K., Trivedi, D., Chaudhary, H., Sahoo, T. K., & Seshadri, S. (2013). Bacteriocin PJ4 active against enteric pathogen produced by *Lactobacillus helveticus* PJ4 isolated from gut microflora of Wistar rat (*Rattus norvegicus*): Partial purification and characterization of bacteriocin. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 169, 2088–2100. <https://doi.org/10.1007/s12010-012-0044-7>
- Li, X., Gu, N., Huang, T. Y., Zhong, F., & Peng, G. (2023). *Pseudomonas aeruginosa*: A typical biofilm forming pathogen and an emerging but underestimated pathogen in food processing. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1114199. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1114199>

- Marcelli, V., Osimani, A., & Aquilanti, L. (2024). Research progress on the use of lactic acid bacteria as natural bio-preservatives against *Pseudomonas* spp. in meat and meat products: A review. *Food Research International*, 115129. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115129>
- Mokoena, M. P., Omatola, C. A., & Olaniran, A. O. (2021). Applications of lactic acid bacteria and their bacteriocins against food spoilage microorganisms and foodborne pathogens. *Molecules*, 26(22), 7055. <https://doi.org/10.3390/molecules26227055>
- Narvhus, J. A., Bækkelund, O. N., Tidemann, E. M., Østlie, H. M., & Abrahamsen, R. K. (2021). Isolates of *Pseudomonas* spp. from cold-stored raw milk show variation in proteolytic and lipolytic properties. *International Dairy Journal*, 123, 105049. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105049>
- Ouali, F. A., Al Kassaa, I., Cudennec, B., Abdallah, M., Bendali, F., Sadoun, D. & Drider, D. (2014). Identification of lactobacilli with inhibitory effect on biofilm formation by pathogenic bacteria on stainless steel surfaces. *International journal of food microbiology*, 191, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.09.011>
- Ozcelik, S., Kuley, E., & Ozogul, F. (2016). Formation of lactic, acetic, succinic, propionic, formic and butyric acid by lactic acid bacteria. *LWT*, 73, 536–542. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.066>
- Rana, S., Bhawal, S., Kumari, A., Kapila, S., & Kapila, R. (2020). pH-dependent inhibition of AHL-mediated quorum sensing by cell-free supernatant of lactic acid bacteria in *Pseudomonas aeruginosa* PAO1. *Microbial Pathogenesis*, 142, 104105. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104105>
- Quintieri, L., Fanelli, F., & Caputo, L. (2019). Antibiotic resistant *Pseudomonas* SPP. spoilers in fresh dairy products: An underestimated risk and the control strategies. *Foods*, 8(9), 372. <https://doi.org/10.3390/foods8090372>
- Wang, Y., Wu, J., Lv, M., Shao, Z., Hungwe, M., Wang, J., Bai, X., Xie, J & Geng, W. (2021). Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 612285. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612285>
- Zapasnik, A., Sokolowska, B., & Bryla, M. (2022). Role of lactic acid bacteria in food preservation and safety. *Foods*, 11(9), 1283. <https://doi.org/10.3390/foods11091283>



# Моделирование процесса теплообмена с окружающей средой сгущенного молока с сахаром

Е. А. Большакова, С. В. Мотылев, В. К. Семипятный, А. Г. Кручинин, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова

Всероссийский  
научно-исследовательский  
институт молочной  
промышленности, г. Москва,  
Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** Сгущенное цельное молоко с сахаром (СЦМС) — востребованный продукт среди потребителей и переработчиков. Исследование температурных профилей необходимо для оптимизации его логистики в условиях экстремальных температур, чтобы предотвратить пороки качества и минимизировать затраты на специализированный транспорт при поставках в регионы с жарким климатом и районы Крайнего Севера, с учетом абсолютного температурного диапазона в РФ, составляющего  $\sim 90^{\circ}\text{C}$ . Ранее данный вопрос в аспекте транспортирования не был исследован, максимально допустимая температура хранения для продукта составляла  $25^{\circ}\text{C}$ , минимальная не регламентировалась.

**Цель:** Исследование температурных профилей СЦМС в транспортной упаковке при различных условиях окружающей среды.

**Материалы и методы:** Осуществлено моделирование процессов нагрева и охлаждения СЦМС в транспортной упаковке, представленной в виде одномерной многослойной системы. Для описания задачи теплопередачи в температурных диапазонах от  $5^{\circ}\text{C}$  до  $35^{\circ}\text{C}$  и от  $5^{\circ}\text{C}$  до минус  $35^{\circ}\text{C}$  составлена система дифференциальных уравнений, определены начальные и граничные условия.

**Результаты:** Согласно построенной модели, продолжительность прогрева СЦМС от  $5^{\circ}\text{C}$  до  $35^{\circ}\text{C}$  составит 36,7 ч, а охлаждения от  $5^{\circ}\text{C}$  до минус  $35^{\circ}\text{C}$  — 41,1 ч. По результатам исследования разработано программное обеспечение для расчета продолжительности изменения температуры СЦМС в зависимости от начальных и конечных температур окружающей среды.

**Выводы:** Разработан новый подход к теоретическому прогнозированию продолжительности изменения температуры СЦМС в транспортной упаковке при хранении и транспортировании. Данный подход может быть использован в специальных программных обеспечениях для бизнеса при планировании логистических маршрутов, затрат на транспортирование с учетом срока перевозки и условий окружающей среды. Также, предложенное решение может быть адаптировано под другие пищевые продукты.

**Ключевые слова:** сгущенное молоко с сахаром; теплопередача; одномерное уравнение теплопроводности; свойства воздуха в граничном слое

## Корреспонденция:

Екатерина Ивановна

Большакова

E-mail: e\_bolshakova@vnimi.org

## Конфликт интересов:

авторы сообщают  
об отсутствии конфликта  
интересов.

**Поступила:** 10.11.2024

**Принята:** 15.03.2025

**Опубликована:** 31.03.2025

**Copyright:** © 2025 Авторы



Для цитирования: Большакова, Е.И., Мотылев, С.В., Семипятный, В.К., Кручинин, А.Г., Туровская, С.Н., & Илларионова, Е.Е. (2025). Моделирование процесса теплообмена с окружающей средой сгущенного молока с сахаром. *FOOD METAENGINEERING*, 3(1), 56-72. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.73>



# Heat Transfer Modeling in Sweetened Condensed Milk Under Ambient Conditions

Ekaterina I. Bolshakova, Sergey V. Motylev, Vladislav K. Semipyatny, Aleksandr G. Kruchinin, Svetlana N. Turovskaya, Elena E. Illarionova

All-Russian Dairy Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction:** Sweetened condensed whole milk (SCM) is a highly demanded product among consumers and processing plants. The study of temperature profiles is essential for optimizing its logistics under extreme temperature conditions to prevent quality defects and minimize costs associated with specialized transport when delivering to regions with hot climates and the Far North, considering the absolute temperature range in Russia, which is approximately 90°C. Previously, this aspect of transportation had not been studied. The maximum allowable storage temperature for the product was set at 25°C, while the minimum temperature was not regulated.

**Purpose:** To investigate the temperature profiles of SCM in transport packaging under various ambient conditions.

**Materials and Methods:** A simulation of the heating and cooling processes of SCM in transport packaging, modeled as a one-dimensional multilayer system, was conducted. To describe heat transfer within the temperature ranges of 5°C to 35°C and 5°C to -35°C, a system of differential equations was formulated, with specified initial and boundary conditions.

**Results:** According to the proposed model, the duration of heating SCM from 5°C to 35°C is 36.7 hours, while cooling from 5°C to -35°C takes 41.1 hours. Based on the study results, software was developed to calculate the duration of SCM temperature changes depending on the initial and final ambient temperatures.

**Conclusion:** A new approach has been developed for theoretically predicting the duration of temperature changes in SCM within transport packaging during storage and transportation. This approach can be utilized in specialized business software solutions for logistics route planning, transportation cost estimation, and consideration of ambient conditions during shipping. Additionally, the proposed solution can be adapted for other food products.

**Keywords:** sweetened condensed milk; heat transfer; one-dimensional heat conduction equation; air properties in the boundary layer

## Correspondence:

Ekaterina I. Bolshakova  
E-mail: e\_bolshakova@vniimi.org

## Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

**Received:** 10.11.2024

**Accepted:** 15.03.2024

**Published:** 31.03.2025

**Copyright:** © 2025 The Authors



**To cite:** Bolshakova E.I., Motylev S.V., Semipyatny V.C., Kruchinin A.G., Turovskaya S.N., & Illarionova E.E. (2025). Heat transfer modeling in sweetened condensed milk. *FOOD METAENGINEERING*, 3(1), 56-72. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.1.73>

## ВВЕДЕНИЕ

На различных этапах производства и реализации продукта существует ряд факторов, влияющих на его качество: исходные свойства и характеристики сырья, правильное проведение технологических процессов, исправная работа оборудования, условия окружающей среды при транспортировании и хранении (Sharma et al., 2015). Консервы являются группой продуктов, которые сохраняют качество в течение длительного срока годности, так как при их производстве используются модификации принципов анабиоза, а именно термоанабиоз, ксероанабиоз и осмоанабиоз. Данный факт является причиной того, что консервированная продукция является удобным и предпочтительным товаром для экспорта. На сегодняшний день, молочные консервы, а в частности сгущенное цельное молоко с сахаром (СЦМС), является продуктом не только ежедневного рациона потребителей, но также сырьем для производства другой молочной, кондитерской и хлебобулочной продукции (Ryabova et al., 2022). По данным аналитических ресурсов на 2023 год отечественный экспорт сгущенного молока увеличился только по одному направлению на 6,5 млн. \$, а также появились новые производители-экспортеры СЦМС<sup>1,2</sup>.

В связи с изменяющейся геополитической и экономической ситуацией наблюдается трансформация логистических цепей поставок, что позволяет не только расширить территории для экспорта, но также ставит ряд задач перед производителями (Ledneva et al., 2023; Turovskaya et al., 2024). Известно, например, что сгущенное молоко с сахаром согласно ГОСТ 31688–2012 можно транспортировать всеми видами транспорта при максимально допустимой температуре 25°C, которая указана в ТТИ к данному ГОСТу. Для соблюдения данного требования при транспортировании СЦМС в страны Азии и Африки необходимо использование специализированного транспорта для поддержания регламентированного температурного режима, что является дорогостоящим и ограничивает возможности ряда предприятий (LeBlanc, 2005; Vanek & Sun, 2008; Singh & Negi, 2018). В связи с этим актуальным является исследование изменения температурного профиля СЦМС

в неконтролируемых температурных условиях хранения, который позволит извлечь данные как о продолжительности выравнивания температуры продукта, так и о температуре продукта в любой точке в заданный момент времени.

Экспериментально влияние различных режимов хранения на свойства молочных концентрированных продуктов, СЦМС и его модельных систем было изучено рядом авторов. Так, Galstyan et al. (2019) отметили, что транспортирование сухого цельного молока при температурах более 10°C, а также его замораживание способно спровоцировать деградацию белковой, жировой фракции продукта и вызвать структурные изменения лактозы. Рябовой и соавт. (2022; 2023) изучено изменение критериев кристаллизации воды в модельных молочных концентрированных системах в зависимости от концентрации и температурного воздействия, а также представлены данные по результатам дифференциально сканирующей калориметрии СЦМС. Исследователями зафиксированы значения точки замерзания, массовой доли влаги, перешедшей в замороженное состояние, температуры стеклования и энтальпии плавления, которые могут быть важны при моделировании процессов прогнозирования изменения качества СЦМС при низких отрицательных температурах (Рябова и др., 2022; Рябова и др., 2023). Patel и др. (1996) создали подход к прогнозированию хранимостпособности на основании изменения цветности сладкого концентрированного молока в зависимости от тепловой нагрузки через определение оптической плотности, что является пороком для молочных консервов.

Изменение цвета — не единственный порок, который может развиваться в сгущенных молочных продуктах при хранении в различных температурных диапазонах. Так, например, Sharma et al. (2015) отмечают, что помимо потемнения сгущенного молока с сахаром, наиболее распространенными пороками в продукте являются загустевание, потеря однородности, песчанистость, прогорклость и металлический привкус. Илларионова и соавт. (2020) представили подход к прогнозированию загустевания СЦМС, который заключается в выдержке продукта при 98–100°C в течение 15–20 минут и фикс-

<sup>1</sup> Roif Expert. (2023). Рынок сгущенного молока в России — 2023 экспорт составил + 6,5 млн. \$ по казахскому направлению. VC.ru. <https://vc.ru/u/406653-roif-expert/636061-rynok-sgushchennogo-moloka-v-rossii-2023-eksport-sostavil-6-5-mln-po-kazahskomu-napravleniyu>

<sup>2</sup> Dairy News. (2023). Вологодская область отправила на экспорт более 90 тонн сгущенного молока. <https://dairynews.today/news/vologodskaya-oblast-otpravila-na-eksport-bolee-90-.html>

Е. А. Большакова, С. В. Мотылев, В. К. Семилятный, А. Г. Кручинин, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова

сации изменения динамической вязкости. Потеря текучести после такого воздействия принята как основание для отказа от направления данной партии продукта на длительное хранение. Появление загустевания и других пороков обусловлено протеканием процессов биохимического и микробиологического характера (Илларионова и соавт., 2020), которые в свою очередь могут быть ускорены изменением температурных режимов хранения. В то же время, температурная нагрузка на продукт определяется не только температурой, но и продолжительностью хранения при этой температуре (Fox et al., 2015), что в свою очередь обуславливает интерес к оценке динамики изменения температуры продукта в различных условиях.

Существуют различные подходы к изучению процесса теплообмена продукта с окружающей средой и чаще всего они направлены на оценку эффективности тепловой обработки продукции с целью обеспечить ее безопасность (Derossi et al., 2012; Kızıldaş et al., 2010). Так, например, исследователями из США валидирован метод аналитико-прогнозирующего численного решения в двумерном пространстве (2D APNS метод) для моделирования изменения температуры в точке наименьшего прогрева консервной банки во время ретортной обработки (Zhu et al., 2022). В работе рассматривались ограничения APNS метода в одномерном пространстве и был предложен 2D APNS, с помощью которого осуществили моделирование температурных профилей консервов при различных режимах теплопередачи и с учетом нескольких форм контейнеров, в которых находились консервы. Валидацию данного метода исследователи осуществляли при помощи сравнения с экспериментальными данными.

В точки зрения высокотемпературной обработки, Paul et al. (2011) исследовали процесс изменения температуры при пастеризации консервированного молока в банке в двух положениях и произвели сравнение с результатами теоретической модели температурного распределения для точки наименьшего прогрева, полученного с помощью вычислительной гидродинамики. В свою очередь, для зоны отрицательных температур Рябовой и др. (2023) разработана программа расчета времени охлаждения консервной банки со сгущенным молоком, которая позволяет определить время необходимое для охлаждения и замораживания единичной упаковки с продуктом. Конвекция исследователями учтена путем регулирования коэффициента теплоотдачи.

Несмотря на значимость и фундаментальность описанных исследований, характер изменения температуры в продукте в потребительской упаковке и в групповой или транспортной упаковке будет значительно отличаться, так как изменится геометрия исследуемого объекта, которая существенным образом влияет на граничные условия в решаемых системах уравнений. Целью данной работы было решение модельной задачи теплообмена окружающей среды с СЦМС в транспортной упаковке и получение данных о продолжительности выравнивания температуры продукта с окружающей средой и о его температуре в любой точке в заданный момент времени с целью контроля и предотвращения рисков изменения качества продукта в процессе транспортирования. В работе рассматривается температурный диапазон условий окружающей среды от минус 35 до 35°C. В работе рассматривается температурный диапазон условий окружающей среды от минус 35 до 35°C без учета влажности воздуха и изменения температуры, связанного с солнечным излучением.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ  
Объекты исследования

Основным объектом исследования в работе является модель теплообмена СЦМС в транспортной упаковке с окружающей средой. Рассматриваемая в модели транспортная упаковка с СЦМС объединяет 57 гофрированных коробов, уложенных штабелями в 6 рядов и укомплектованных СЦМС в металлических консервных банках №7 (по 45 банок в каждом коробе). Параметры транспортной упаковки, гофрированного короба и металлической банки представлены в Таблице 1.

Таблица 1  
Параметры объектов, используемых в задаче

Table 1  
Parameters of the Objects Considered

Объект	Характерные размеры, мм
Металлическая консервная банка №7	Толщина металлического слоя — 0,25
Гофрированный короб	Высота короба — 245, толщина гофры — 4
Транспортная упаковка	Высота — 1492

Представленные объекты в модели объединены в многослойную систему с тремя типами слоев: 1 — гофри-

Е. А. Большакова, С. В. Мотылев, В. К. Семилятный, А. Г. Кручинин, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова

рованный картон; 2 — СЦМС; 3 — деревянная основа. Параметры многослойной системы представлены в Таблице 2.

Таблица 2

**Параметры многослойной системы**

Table 2

**Parameters of the Multilayer System**

Параметры	Значение
Высота первого слоя, мм	4,0
Высота второго слоя, мм	237,0
Высота третьего слоя, мм	22,0
Общая высота	1492,0

В первом приближении теплофизические характеристики слоев в задаче взяты в виде средних значений (Таблица 3), и не учтена их зависимость от температуры.

Таблица 3

**Теплофизические характеристики слоев для решения задачи**

Table 2

**Heat Transfer Properties**

№ слоя	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\alpha$ , м <sup>2</sup> /с ( $\cdot 10^{-5}$ )
Слой 1	122	1150,0	0,070	0,049
Слой 2	1290	2260,9	0,267	0,009
Слой 3	500	1550,0	0,150	0,019

Где  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности

**Описание реальной задачи**

Транспортная упаковка с СЦМС помещена на деревянном поддоне в сухогрузный контейнер. Сухогрузный контейнер транспортируется от производителя до места реализации в условиях окружающей среды с температурой воздуха в диапазоне от минус 35 до 35°C. Начальная температура СЦМС в транспортной упаковке составляет 5°C. Необходимо рассчитать продолжительность выравнивания температуры СЦМС с окружающей средой в различных условиях и получить данные о температуре СЦМС в любом положении в транспортной упаковке в заданный момент времени. Расчет в задаче производили, используя параметры объектов, указанные в Таблице 1.

**Моделирование и математический аппарат**

Моделирование на каждом этапе состояло из двух операций: 1 — анализа объектов (характерных размеров, теплофизических характеристик) и их взаимодействия в транспортной упаковке, 2 — введения допущений по принципу оценки минимально и максимально возможного вклада в изменение теплофизических характеристик СЦМС в процессе изменения температуры. Для упрощения описания модели введены следующие обозначения:

$S_{C_1}$  — площадь соприкосновения боковой стенки короба с боковой стенкой банки,

$S_{C_2}$  — площадь соприкосновения боковых стенок двух банок,

$S_{C_3}$  — площадь соприкосновения крышек и доньев банок с верхними и нижними поверхностями короба,

Математическую постановку задачи осуществляли, применяя системы дифференциальных уравнений, описывающих тепловые процессы, начальные и граничные условия. На данном этапе производили упрощение математического описания, учитывая допущения, введенные при составлении физической модели.

Аналитическое решение осуществлено с использованием подхода, представленного в (Biswas & Singh, 2015) с адаптацией под условия теплообмена СЦМС с окружающей средой. Расчет уравнений реализован при использовании разработанного программного обеспечения, написанного в среде Wolfram Mathematica.

**РЕЗУЛЬТАТЫ**

**Моделирование**

В задаче изучается изменение температуры СЦМС, упакованного в металлические консервные банки №7, помещенного в транспортную упаковку. Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ) металла, из которого изготовлена консервная банка составляет 47...52 Вт/(м·К), что во много раз превышает  $\lambda_{\text{СЦМС}}$  (0,267 Вт/(м·К). Данный факт свидетельствует о том, что скорость теплопередачи через стенку металлической консервной банки будет много больше скорости теплопередачи в среде СЦМС и обуславливает исключение металла из проектируемой модели.

СЦМС находится в групповой упаковке — гофрированном коробе (далее коробе), внутренний объем которого между банками заполнен воздухом. Банки с СЦМС плотно уложены в короб в 3 ряда по ширине, 5 рядов в длину и 3 ряда в высоту. Прилегание боковой стенки одной банки к боковой стенке другой банки внутри короба; боковой стенки банки к боковой стенке короба; дна/крышки одной банки бортами с дном/крышкой другой банки; крышек/доньев с верхней и нижней поверхностью короба будем считать плотным. В результате введенных допущений в модели между всеми контактирующими поверхностями идеальный тепловой контакт.

Передача теплоты от окружающей среды к банке с СЦМС осуществляется через боковые, верхнюю и нижнюю поверхности короба (Рисунок 1).

В первом приближении теплотеплопередачей от боковых поверхностей короба к воздуху внутри короба и от воздуха внутри короба к боковым стенкам банок (Рисунок 1, схема 2) решено пренебречь, так как  $\lambda_{\text{воздуха}}$  на порядок меньше  $\lambda_{\text{СЦМС}}$ , и соответственно тепловой поток по схеме 2 будет много меньше по сравнению с тепловым потоком по схеме 1. Произведем сравнительную оценку вклада тепловых потоков по схеме 1 и 3 (Рисунок 1–3). Так как тепловой поток пропорционален площади ( $Q \sim S$ ), а  $S_{c1}$  мала относительно  $S_{c3}$ , то при прямой теплопередаче по схеме 3 количество теплоты переда-

ваемое СЦМС через боковую поверхность —  $Q_1$  будет много меньше  $Q_2$  — количества теплоты, передаваемого по схеме 1 через верхние и нижние поверхности короба. Также, так как  $S_{c2}$  много меньше  $S_{c3}$  теплообменом между контактирующими банками через боковую поверхность по схеме 3 в модели решено пренебречь. Ввиду этого будем считать, что тепловой поток осуществляется по схеме 1 (Рисунок 1), он одномерен и направлен перпендикулярно верхним и нижним поверхностям коробов, а боковая стенка короба и боковые стенки банок — теплоизолированы (адиабатические).

Транспортная упаковка, которая представляет собой прямоугольный параллелепипед, состоящий из 6 рядов коробов с СЦМС в высоту (равномерно уложенных и плотно соприкасающихся боковыми стенками) помещена на деревянный поддон. Верхняя грань поддона состоит из 5 деревянных досок и включает в себя узкие воздушные полости (характерный размер воздушных полостей много меньше ширины досок), в связи с этим было принято учесть поддон в задаче в виде плотной деревянной пластины с толщиной 22 мм, исключив опорные деревянные части поддона.

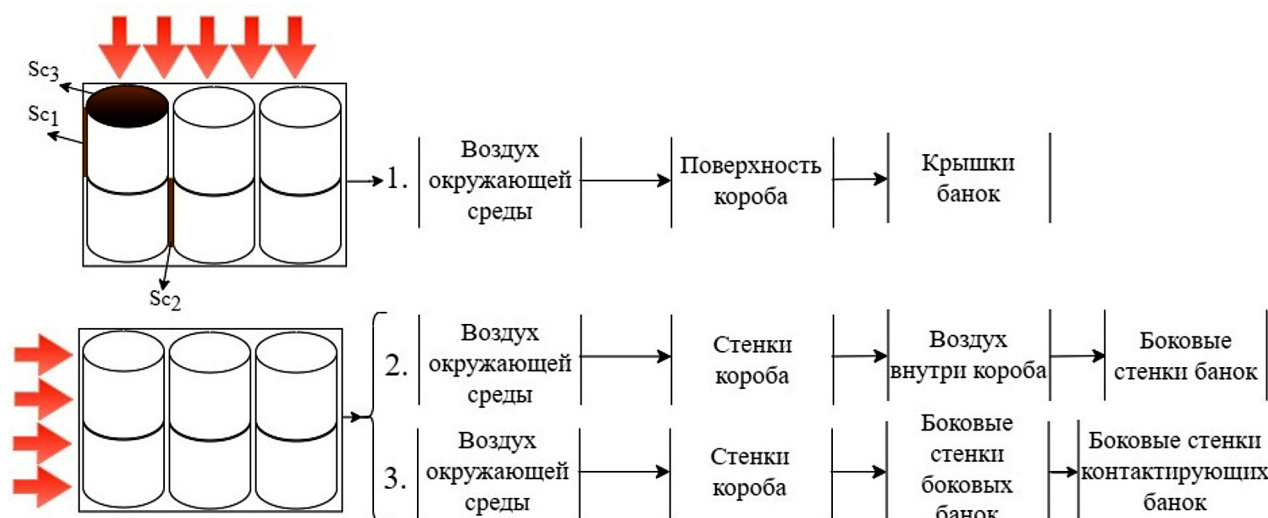
Транспортную упаковку, помещенную на деревянную основу, будем считать подобной групповой упаковке в виде одного короба с СЦМС, т.е. для транспортной упаковки также допускаем одномерность теплового потока. Таким образом, всю транспортную упаковку

Рисунок 1

### Схемы осуществления теплопередачи от окружающей среды к СЦМС

Figure 1

### Schemes of Heat Transfer in SCM under Ambient Conditions

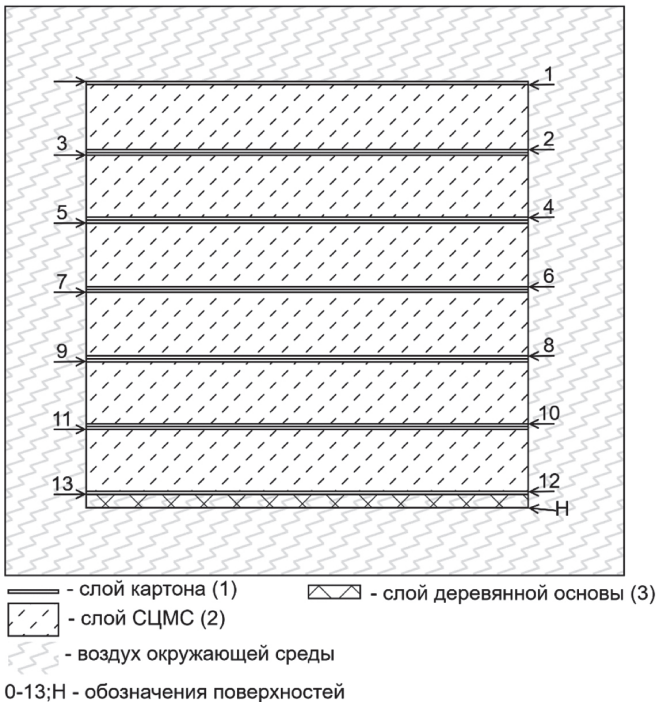




Е. А. Большакова, С. В. Мотылев, В. К. Семипятный, А. Г. Кручинин, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова

Рисунок 2  
Модельное представление транспортной упаковки с СЦМС в виде многослойной системы для исследования тепловых процессов

Figure 2  
A Model Representation of a Transport Packaging with SCM in the Form of a Multilayer System to Study Heat Transfer



можно представить в виде одномерной многослойной системы (Рисунок 2).

Транспортная упаковка помещена в сухогрузный контейнер (далее контейнер), который заполнен воздухом. Контейнер, в свою очередь изготовлен из стали, материала с высокой теплопроводностью ( $\lambda_{\text{стали}}$  при  $20^{\circ}\text{C} = 40 \dots 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\lambda_{\text{воздуха}} \approx 0,025 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ), который обеспечивает хороший теплообмен с окружающей средой. Данный факт позволяет принять температуру воздуха внутри контейнера равной температуре окружающей среды, так как скорость теплообмена через стенки контейнера выше, чем скорость изменения температуры в транспортной упаковке. В связи с этим, далее в моделировании температура воздуха ( $T_{\text{в}}$ ) внутри контейнера принята равной температуре окружающей среды и неизменной, как и другие теплофизические свойства воздуха в контейнере. На них не влияют теплообменные процессы с транспортной упаковкой с СЦМС.

Теплообмен с окружающей средой транспортной упаковки с СЦМС считали свободным конвекционным, так как вынужденного движения окружающей среды не происходит. Принято, что в начальный момент времени транспортная упаковка с СЦМС имеет определенную начальную температуру во всем объеме.

В «конвекционном» слое — той части воздуха, в которой происходит теплообмен, воздух имеет свой набор теплофизических характеристик, зависящих от температуры поверхности исследуемой системы объектов. Расчет данных характеристик производили на основании табличных значений, представленных в работе Lienhard (2019), при помощи полиномов наилучшим образом их аппроксимирующих (Таблица 4–7).

Объемная плотность ( $\rho$ )

Произведен расчет для двух уравнений (подбираем коэффициенты полиномов) и сравнение со справочными значениями, высчитана ошибка аппроксимации, на основании которой произведен выбор уравнения для дальнейших расчетов.

Таблица 4  
Определение оптимального уравнения для расчета объемной плотности

Table 4  
Determination of the Optimal Equation for Calculating Volume Density

Уравнение №1 — ρ = 353,089/Т Тип — гиперболическая регрессия				Уравнение №2 — ρ = −0,005491+354,683249/Т Тип — гиперболическая регрессия			
Т, К	Рас- четное	Спра- вочное	ε, %	Т, К	Рас- четное	Спра- вочное	ε, %
	ρ, кг/м³				ρ, кг/м³		
250	1,4124	1,4120	0,0252	250	1,4132	1,4120	0,0879
260	1,3580	1,3580	0,0025	260	1,3587	1,3580	0,0497
270	1,3077	1,3080	0,0201	270	1,3082	1,3080	0,0115
280	1,2610	1,2610	0,0025	280	1,2612	1,2610	0,0186
290	1,2175	1,2170	0,0451	290	1,2176	1,2170	0,0455
300	1,1770	1,1770	0,0031	300	1,1768	1,1770	0,0182
310	1,1390	1,1390	0,0003	310	1,1386	1,1390	0,0309
Средняя ошибка аппроксимации			0,0141	Средняя ошибка аппроксимации			0,0375

Для дальнейших расчетов объемной плотности воздуха использовано уравнение №1.



Таблица 5

**Определение оптимального уравнения для расчета  
удельной изобарной теплоемкости**

Table 5

**Determination of the Optimal Equation for Calculating the  
Specific Isobaric Heat Capacity**

**Удельная изобарная теплоемкость ( $c_p$ )**

Уравнение №1 — $c_p = 0,000370 \cdot T^2 - 0,187343 \cdot T + 1029,668537$ Тип — квадратичная регрессия				Уравнение №2 — $c_p = 0,019256 \cdot T + 1001,466942$ Тип — линейная регрессия			
T, K	Расчет- ное $c_p$ , Дж/(кг·К)	Спра- вочное	ε, %	T, K	Расчет- ное $c_p$ , Дж/(кг·К)	Спра- вочное	ε, %
250	1006,0	1006,0	0,004	250	1006,3	1006,0	0,028
260	1006,0	1006,0	0,003	260	1006,5	1006,0	0,047
270	1006,1	1006,0	0,006	270	1006,7	1006,0	0,066
280	1006,2	1006,0	0,022	280	1006,9	1006,0	0,085
290	1006,5	1006,0	0,045	290	1007,1	1006,0	0,104
300	1006,8	1007,0	0,023	300	1007,2	1007,0	0,024
310	1007,1	1007,0	0,015	310	1007,4	1007,0	0,043
Средняя ошибка аппроксимации			0,017	Средняя ошибка аппроксимации			0,057

Для дальнейших расчетов удельной изобарной теплоемкости воздуха использовано уравнение №1 (Таблица 6).

Для дальнейших расчетов динамического коэффициента вязкости воздуха использовано уравнение №1, так как значение средней ошибки аппроксимации для первого уравнения больше по причине выброса для температуры 310 К (Таблица 7).

Для дальнейших расчетов коэффициента теплопроводности воздуха использовано уравнение №2.

С помощью полиномов представленных выше рассчитаны теплофизические свойства воздуха для каждой температуры. Согласно Lienhard (2019) и Churchill и др. (1975) свойство среды (воздуха в задаче) следует оценивать при так называемой «определяющей температуре»  $T_{\text{опр}}$ :

$$T_{\text{опр}} = \frac{T_{\text{в}} + T_{\text{п}}}{2}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{п}}$  — температура продукта в начальный момент времени;  $T_{\text{в}}$  — температура воздуха.

Таблица 6

**Определение оптимального уравнения для расчета  
динамического коэффициента вязкости**

Table 6

**Determination of the Optimal Equation for Calculating the  
Dynamic Viscosity Coefficient**

**Динамический коэффициент вязкости ( $\mu$ )**

Уравнение №1 — $\mu = 0,000000043 \cdot x^3 - 0,000038698 \cdot x^2 + 0,016251762 \cdot x - 0,714935371$ Тип — кубическая регрессия				Уравнение №2 — $\mu = -0,00000311 \cdot T^2 + 0,00665672 \cdot T + 0,12896873$ Тип — квадратичная регрессия			
T, K	Расчет- ное $\mu \cdot 10^{-5}$ , Па·с	Спра- вочное	ε, %	T, K	Рас- четное $\mu \cdot 10^{-5}$ , Па·с	Спра- вочное	ε, %
250	1,601	1,606	0,295	250	1,599	1,606	0,450
260	1,650	1,649	0,079	260	1,649	1,649	0,029
270	1,698	1,699	0,040	270	1,700	1,699	0,033
280	1,746	1,747	0,082	280	1,749	1,747	0,116
290	1,792	1,795	0,150	290	1,798	1,795	0,160
300	1,839	1,857	0,982	300	1,846	1,857	0,588
310	1,885	1,889	0,199	310	1,894	1,889	0,248
Средняя ошибка аппроксимации			0,261	Средняя ошибка аппроксимации			0,232

Таблица 7

**Определение оптимального уравнения для расчета  
коэффициента теплопроводности**

Table 7

**Determination of the Optimal Equation for Calculating the  
Coefficient of Thermal Conductivity**

**Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ )**

Уравнение №1 — $\lambda = 0,000065 \cdot x^3 - 0,059624 \cdot x^2 + 25,158592 \cdot x - 1336,027099$ Тип — кубическая регрессия				Уравнение №2 — $\lambda = -0,005622 \cdot x^2 + 10,598080 \cdot x - 55,398903$ Тип — квадратичная регрессия			
T, K	Расчет- ное $\lambda$	Спра- вочное	ε, %	T, K	Расчет- ное $\lambda$	Спра- вочное	ε, %
250	0,02243	0,02241	0,08	250	0,02243	0,02241	0,08
260	0,02317	0,02329	0,51	260	0,02323	0,02329	0,38
270	0,02390	0,02400	0,43	270	0,02396	0,02400	0,16
280	0,02461	0,02473	0,50	280	0,02471	0,02473	0,07
290	0,02531	0,02544	0,52	290	0,02545	0,02545	0,05
300	0,02600	0,02623	0,86	300	0,02618	0,02618	0,19
310	0,02670	0,02684	0,53	310	0,02690	0,02684	0,21
Средняя ошибка аппроксимации			0,49	Средняя ошибка аппроксимации			0,16

Таким образом были получены следующие теплофизические характеристики для каждого дискретного значения температуры (Таблица 8).

Кинематический коэффициент вязкости рассчитывали по уравнению:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

Коэффициент объемного расширения:

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (3)$$

Коэффициент температуропроводности:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (4)$$

Основная сложность расчета заключалась в определении коэффициента конвективной теплоотдачи ( $\alpha$ ), который входит в граничные условия Ньютона-Рихмана для конвективного теплообмена.

Для вычисления данного коэффициента обычно применяется теория подобия физических процессов. Ее

основная идея состоит в том, что процессы одинаковой физической природы, которые характеризуются одним и тем же математическим описанием (дифференциальными уравнениями, граничными и начальными условиями) и одинаковой геометрией должны протекать похожим образом. Согласно теории подобия, такие качественно одинаковые процессы имеют равные критерии подобия и функциональные связи между ними. Это позволяет, используя критерии подобия, полученные экспериментальным путем для модельных задач, применить для вычисления критериев подобия для конкретной задачи.

Для описания процессов свободной конвекции применяются следующие критериальные числа подобия:

$Pr$  — число Прандтля,  $Nu$  — число Нуссельта,  $Ra$  — число Релея,  $Gr$  — число Грасгофа.

Число Прандтля:

$$Pr = \mu \frac{c_p}{\lambda} \quad (5)$$

Таблица 8

### Теплофизические свойства сухого воздуха при давлении 101 325 Па

Table 7

### Thermophysical Properties of Dry Air at a Pressure of 101 325 Pa

$T_{гр}$ (°C)	$T_{нр}$ (°C)	$T_{онпр}$ (°C)	$T_{онпр}$ (K)	$\rho$ , (кг/м³)	$c_p$ , Дж/(кг·K)	$\mu \cdot 10^{-5}$ , Па·с	$\lambda$ , Вт/(м·K)	$\nu \cdot 10^{-5}$ , м²/с	$\alpha \cdot 10^{-5}$ , м²/с	$\beta$ , 1/K	$Pr$
-35	5	-15,0	258,15	1,37	1005,96	1,64	0,023	1,20	1,68	0,0039	0,72
-30	5	-12,5	260,65	1,35	1005,97	1,65	0,023	1,22	1,71	0,0038	0,72
-25	5	-10,0	263,15	1,34	1005,99	1,67	0,023	1,24	1,74	0,0038	0,71
-20	5	-7,5	265,65	1,33	1006,01	1,68	0,024	1,26	1,77	0,0038	0,71
-15	5	-5,0	268,15	1,32	1006,04	1,69	0,024	1,28	1,80	0,0037	0,71
-10	5	-2,5	270,65	1,30	1006,07	1,70	0,024	1,30	1,83	0,0037	0,71
-5	5	0,0	273,15	1,29	1006,10	1,71	0,024	1,33	1,86	0,0037	0,71
0	5	2,5	275,65	1,28	1006,14	1,73	0,024	1,35	1,89	0,0036	0,71
5	5	5,0	278,15	1,27	1006,19	1,74	0,024	1,37	1,92	0,0036	0,71
10	5	7,5	280,65	1,26	1006,23	1,75	0,025	1,39	1,96	0,0036	0,71
15	5	10,0	283,15	1,25	1006,29	1,76	0,025	1,41	1,99	0,0035	0,71
20	5	12,5	285,65	1,24	1006,34	1,77	0,025	1,43	2,02	0,0035	0,71
25	5	15,0	288,15	1,23	1006,41	1,78	0,025	1,46	2,05	0,0035	0,71
30	5	17,5	290,65	1,21	1006,47	1,80	0,026	1,48	2,09	0,0034	0,71
35	5	20,0	293,15	1,20	1006,55	1,81	0,026	1,50	2,12	0,0034	0,71

Число Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda}, \quad (6)$$

Число Грасгофа:

$$Gr = \frac{\Delta T \cdot g \cdot \beta \cdot l^3}{\nu^2}, \quad (7)$$

где  $\Delta T$  — разность температур,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\beta$  — коэффициент объемного расширения,  $l$  — определяющий размер,  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости.

Число Релея:

$$Ra = Gr \cdot Pr. \quad (8)$$

Тогда критериальное уравнение подобия будет иметь вид:

$$Nu = F(Ra). \quad (9)$$

Далее рассчитав число Нуссельта по (6) будет получено значение коэффициента конвективной теплоотдачи ( $\alpha$ ).

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{l_0}, \quad (10)$$

где  $l_0 = S/P$  (площадь поверхности к периметру) — характерный размер поверхности многослойной системы. В данной задаче  $l_0 = 0,214$ .

Нестабильность процесса естественной конвекции у поверхностей различной формы и расположения в пространстве породила большое разнообразие эмпирических формул для вида критериального уравнения (9). В отечественной теплотехнической литературе для решения задачи подобной, поставленной нами в работе, используются критериальные уравнения, указанные в работе Михеева и Михеевой (1977) и Исаченко и др. (1981).

Если при принудительной конвекции результаты расчета числа Нуссельта по критериальным уравнениям у различных авторов фактически идентичны, то при естественной конвекции отличаются на существенные 20–30 %.

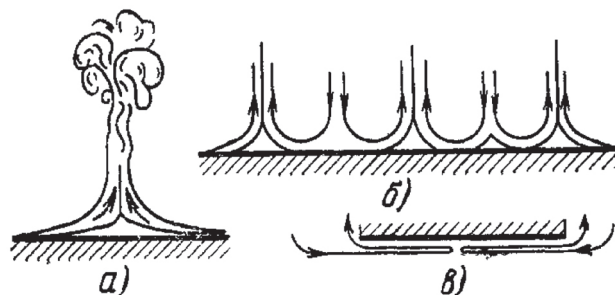
Согласно Михееву и Михеевой (1977), если нагретая поверхность обращена наверх, то движение протекает по схеме, изображенной на Рисунке 3 — а или 3 — б.

Рисунок 3

### Теплоотдача при свободной конвекции

Figure 3

### Heat Transfer under Free Convection



Примечание. Из Михеев и Михеева (1977)

Вследствие наличия с краев сплошного потока нагретого воздуха центральная часть поверхности оказывается изолированной. Свободное конвекционное движение воздуха у поверхности происходит лишь за счет притока холодного воздуха сверху (Рисунок 3 — б). Если же нагретая поверхность обращена вниз, то в этом случае движение воздуха происходит лишь в тонком слое под поверхностью (Рисунок 3 — в); остальная же масса воздуха ниже этого слоя остается неподвижной.

В поставленной задаче возможны следующие схемы теплообмена:

(1) Температура воздуха больше температуры многослойной системы (нагрев продукта)

Тогда у верхней поверхности (обращена вверх) — свободное конвекционное движение воздуха по схеме (Рисунок 3 — в), а у нижней поверхности (обращена вниз) — неустойчивая конвекция по схеме (Рисунок 3 — а или б).

(2) Температура воздуха меньше температуры многослойной системы (охлаждение продукта)

Ситуация противоположна описанной выше. У верхней поверхности (обращена вверх) — неустойчивая конвекция (Рисунок 3 — а или б), а у нижней поверхности — стабильная (Рисунок 3 — в).

Стабильность и неустойчивость процесса учитывалась в расчёте критериального числа Нуссельта по соответствующим критериальным уравнениям (11,12), предложенными Fujii и др. (1972), Rohsenow (1998):

Е. А. Большакова, С. В. Мотылев, В. К. Семилятный, А. Г. Кручинин, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова

для неустойчивого процесса ( $Nu_1$ ):

$$Nu_1 = \frac{0,560 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}; \quad (11)$$

для устойчивого процесса ( $Nu_2$ ):

$$Nu_2 = 0,58 \cdot Ra^{1/5}. \quad (12)$$

Неустойчивый процесс протекает при условии  $T_b < T_n$  на верхней поверхности многослойной системы, а при  $T_b > T_n$  на нижней поверхности. Устойчивый процесс протекает на нижней поверхности при  $T_b < T_n$  и на верхней поверхности при  $T_b > T_n$ .

Результаты расчетов критериальных чисел представлены в Таблице 9.

Таблица 9

**Расчетные значения критериальных чисел для задачи**

Table 9

**Calculated Values of the Criterion Numbers**

$T_b, ^\circ\text{C}$	$T_n, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{опр}}, ^\circ\text{C}$	$Gr \cdot 10^6$	$Ra \cdot 10^6$	$Nu_1$	$Nu_2$
-35	5	-15,0	103,0	73,7	39,9	21,7
-30	5	-12,5	86,3	61,7	38,1	21,0
-25	5	-10,0	70,8	50,6	36,3	20,2
-20	5	-7,5	56,5	40,4	34,3	19,3
-15	5	-5,0	43,4	30,9	32,1	18,3
-10	5	-2,5	31,2	22,2	29,5	17,1
-5	5	0,0	19,9	14,2	26,4	15,6
0	5	2,5	9,6	6,8	22,0	13,5
5	5	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	5	7,5	8,8	6,3	21,5	13,3
15	5	10,0	17,0	12,0	25,3	15,1
20	5	12,5	24,5	17,4	27,7	16,3
25	5	15,0	31,4	22,2	29,5	17,1
30	5	17,5	37,7	26,7	30,9	17,7
35	5	20,0	43,5	30,8	32,0	18,2

Примечание. Где  $Nu_1, Nu_2$  — число Нуссельта для неустойчивой и устойчивой конвекции, соответственно;  $T_{\text{опр}}$  — определяющая температура

Результаты расчета коэффициента теплоотдачи ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) для каждой дискретной температуры представлены в Таблице 10.

Таблица 10

**Значение коэффициента теплоотдачи для каждой дискретной температуры**

Table 10

**The Value of the Heat Transfer Coefficient for Each Discrete Temperature**

$T_b, ^\circ\text{C}$	$T_n, ^\circ\text{C}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
$T_b < T_n$			
-35	5	4,30	2,34
-30	5	4,15	2,28
-25	5	3,98	2,21
-20	5	3,79	2,13
-15	5	3,57	2,04
-10	5	3,32	1,92
-5	5	2,99	1,77
0	5	2,51	1,54
$T_b > T_n$			
10	5	1,54	2,49
15	5	1,76	2,96
20	5	1,91	3,26
25	5	2,02	3,50
30	5	2,12	3,69
35	5	2,19	3,85

Примечание. Где  $T_b$  — температура среды (ГУ),  $T_n$  — начальная температура продукта (НУ),  $\alpha_1$  — коэффициент теплоотдачи у верхней поверхности (ГУ),  $\alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи у нижней поверхности (ГУ).

Таким образом, на границе с окружающей средой у верхней и нижней поверхностей многослойной системы граничные условия Ньютона-Рихмана. Также, допущено, что между слоями внутри многослойной системы идеальный тепловой контакт и значения температуры и плотности тепловых потоков на границе слоев равны в любой момент времени.

## Пределы применимости модели

### Геометрическая форма

Укладка параллелепипед, мы считаем, что погрешность будет невелика для реальной формы, но возможны отклонения.

### Свободный подход к вычислению коэффициента теплоотдачи

Наши допущения достаточно свободны, так как нет достаточно хорошей модели для свободной конвекции,

мы выбираем рекомендации одних авторов, по другим авторам — будут отклонения.

### Возможность возникновения фазовых переходов

Модель не учитывает возможные фазовые переходы (замерзание) вещества. Рассматриваем температуры окружающей среды предположительно до возможных фазовых переходов вещества, так как фазовые переходы изменяют физические свойства среды (плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности и др.).

### Математическая постановка задачи

В соответствии с введенными приближениями и допущениями поставлена следующая математическая постановка задачи.

Аналитическое описание процесса теплопроводности включает систему дифференциальных уравнений, начальные условия и граничные условия. Дифференциальное уравнение теплопроводности в отсутствии внутренних источников теплоты имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (13)$$

- 1) Начальные условия  $T(\tau = 0)$  — температура продукта в начальный момент времени
- 2) Граничные условия 1–4 типа

Здесь важна форма и геометрические размеры объекта.

Дифференциальные уравнения совместно с так называемыми условиями однозначности (начальные условия и граничные условия) формирует законченную математическую формулировку задачи. То есть, зная геометрическую форму исследуемого объекта, начальные и граничные условия, представляется возможным решить дифференциальные уравнения до конца и найти функцию температуры  $T(x, y, z, \tau)$ .

Для постановки математической задачи, соответствующей физической модели уравнение теплопроводности (13) будем считать одномерным (переменная  $X$ ), граничные условия на верхней и нижней поверхностях первого и последнего слоя 3-го типа, а условия на границах раздела других слоев — 4-го типа.

Постановка задачи имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \\ \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \alpha_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} \end{cases} \quad (14)$$

Начальные условия:

$$\begin{cases} \tau = 0 \\ T_1 = T_2 = T_3 = T_{\text{н}}' \end{cases} \quad (15)$$

где  $T_{\text{н}}$  — начальная температура продукта.

Граничные условия:

$$\begin{cases} x = 0 & \lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = \alpha_1 (T_1 \Big|_{x=0} - T_{\text{в}}) \\ x = H & -\lambda_3 \left( \frac{\partial T_3}{\partial x} \right) \Big|_{x=H} = \alpha_2 (T_3 \Big|_{x=H} - T_{\text{в}}) \end{cases} \quad (16)$$

$$1 \leq i \leq 13$$

$$\begin{cases} T_i \Big|_{x_i} = T_{i+1} \Big|_{x_i} & i \in [1, 12] \\ \lambda_i \left( \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \Big|_{x_i} = \lambda_{i+1} \left( \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \right) \Big|_{x_i} & i \in [1, 12] \\ T_i \Big|_{x_{i+1}} = T_{i+1} \Big|_{x_{i+1}} & i = 13 \\ \lambda_i \left( \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \Big|_{x_{i+1}} = \lambda_{i+1} \left( \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \right) \Big|_{x_{i+1}} & i = 13 \end{cases}$$

### Аналитическое решение задачи теплопроводности для многослойной системы

Для решения многослойной задачи (17–19) мы воспользовались аналитическим решением, представленным в (Fuji and Imura, 1972) и адаптировали его для условий теплопередачи окружающей среды с СЦМС в транспортной упаковке. Принцип суперпозиции гласит, что решение может быть представлено в виде:

$$T_i(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_n(t) R_{i,n}(x) + q_i(x, t), \quad (17)$$

где  $T_i(x, t)$  — температура  $i$ -го слоя;

$R_{i,n}(x)$  — собственные функции  $i$ -го слоя, обладающие свойством ортогональности друг к другу;

$\Gamma_n(t)$  — временная часть для  $n$ -й собственной функции, обладает свойством независимости от слоя;

$q_i(x, t)$  — вспомогательная функция, гомогенизирующая граничные условия (16), вида:

$$q_i(x, t) = \begin{cases} T_B \alpha_1 \frac{\sigma - x}{\alpha_1 \sigma + \lambda_1}, & i = 1 \\ 0, & i = 2..13 \\ T_B \alpha_3 \frac{x - H + 1}{\alpha_3 l + \lambda_3}, & i = 14 \end{cases} \quad (18)$$

Вид вспомогательной функции (18) обусловлен тем, что температура на концах является статичной, поэтому отсутствует зависимость от времени.

Собственные функции решения имеют вид:

$$R_{i,n}(x) = C_{i,n} \sin(\Lambda_{i,n} x) + D_{i,n} \cos(\Lambda_{i,n} x) \quad (19)$$

$$\Lambda_{i,n} = \Lambda_{1,n} \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_i}},$$

где  $\Lambda_{i,n}$  — собственные числа. Поиск коэффициентов  $C_{i,n}$  и  $D_{i,n}$  осуществляется вычислением детерминанта системы уравнений для собственных функций (Antonopoulos and Tzivanidis, 1996).

Общий вид временной части  $\Gamma_n(t)$ :

$$\Gamma_n(t) = f_n e^{-a_1 \Lambda_{1,n}^2 t} \quad (20)$$

$$f_n = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{14} \frac{\lambda_i}{a_i} \int_{x_{i-1}}^{x_i} [T_{11} - q_i(x, 0)] R_{i,n}(x) dx$$

$$N_n = \sum_{i=1}^{14} \frac{\lambda_i}{a_i} \int_{x_{i-1}}^{x_i} R_{i,n}^2(x) dx$$

В общем виде функция  $\Gamma_n(t)$  имеет более сложный вид, но так как выражение для температуры воздуха (14–16) не зависит от времени, лапласиан и производная от времени вспомогательных функций  $q_i(x, t)$  обнуляются и не участвуют в суммировании при построении  $\Gamma_n(t)$ . При этом, имеется возможность обобщения решения на флуктуирующие показатели температуры воздуха, моделирующие изменение дневной температуры, или температуры во время транспортировки.

Решение уравнения (17) продемонстрировано на Рисунке 4. Решение уравнений (17–20), позволяет получать температурные профили для произвольных начальных температур в исследованном диапазоне от минус 35°C до 35°C.

Для вычисления данной задачи при суммировании использовались первые собственные функции, отвечающих собственным числам, для достижения общей погрешности от истинного решения, не превышающей 5%. В большинстве случаев было равно 3.

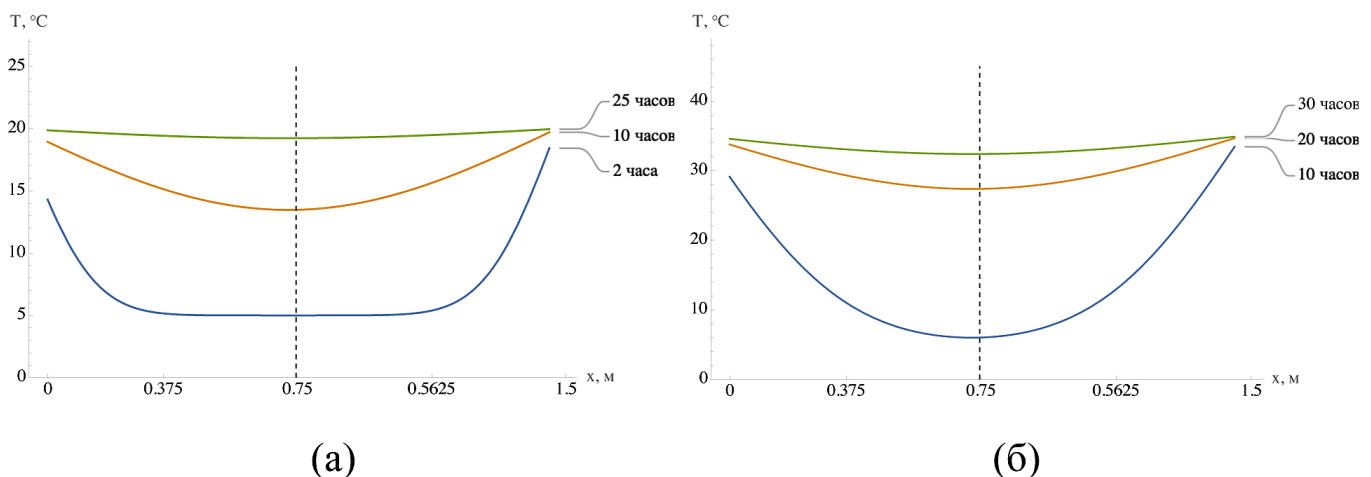
Как можно отметить из рисунка, влияние гофрированных слоев и слоя дерева на решение хоть и является минимальным, но все-таки можно наблюдать смещение профиля от симметричности в сторону, где имеется больше проводящих слоев. Также, аналитическое решение задачи позволило определить продолжительность изменения температуры исследуемого объекта, которая составила при максимальных температурных

Рисунок 4

Температурный профиль многослойной системы с ЦМС для начальных температур  $T_n = 5^\circ\text{C}$  (а)  $T_B = 20^\circ\text{C}$ , (б)  $T_B = 35^\circ\text{C}$

Figure 4

Temperature Profile of the Multilayer System with SCM for Initial Temperatures  $T_p = 5^\circ\text{C}$  and (a)  $T_a = 20^\circ\text{C}$ , (b)  $T_a = 35^\circ\text{C}$





напорах 36,7 ч для диапазона от 5°C до 35°C и 41,1 ч для диапазона от 5°C до минус 35°C.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Учитывая активное развитие цифровых технологий, являющихся неотъемлемой частью промышленной революции — Индустрии 4.0., в различных сферах экономики (строительстве, автомобилестроении, текстильной промышленности и др.) осуществляется массовая цифровизация процессов с целью их оптимизации и повышения эффективности (Nagar & Sreenivasa, 2024). Одним из популярных инструментов цифровизации является математическое моделирование процессов (Medennikov & Raikov, 2020; Erdogdu, 2023), и исследователи по всему миру создают модели объектов, оборудования и процессов, которые в дальнейшем они апробируют в реальных условиях для оценки эффективности разработок (Hu et al., 2013; Destro et al., 2021; Bunta et al., 2023). В нашей работе было осуществлено моделирование теплопередачи СЦМС с окружающей средой с целью дальнейшего применения разработанной модели в прогнозировании продолжительности изменения температуры продукта при транспортировании. Авторами был принят ряд серьезных допущений, которые упростили конечную модель, а именно пренебрежение геометрией металлических банок с СЦМС внутри транспортного пакета, исключение учета фазовых переходов, наличия воздушных прослоек внутри коробов с продуктом, конвективных потоков внутри продукта, а также тепловых потоков со стороны боковых стенок исследуемой системы объектов. Сравнение с двумерными моделями теплопроводности, например, с моделью в сферических координатах, представленной в (Jain & Singh, 2010), показало, что при выборе достаточного количества членов временного ряда, одномерная послойная модель приближается к ним с произвольным уровнем точности для исследованной схемы с рядом банок сгущенного молока. Что касается исключения конвективных потоков внутри продукта, в работе Rao & Anantheswaran (1988) показано, что конвективный теплообмен оказывает значительное влияние на температурные профили жидких продуктов с низкой вязкостью, таких как соки или бульоны. Однако для продуктов с высокой вязкостью, таких как СЦМС, конвекционные потоки минимальны, и теплообмен осуществляется преимущественно за счет теплопроводности, что также подтверждается в работе (Kumar et

al., 1990). В исследовании Friso (2015) для моделирования тепловых процессов консервированных продуктов также исключались факторы, связанные с конвекцией внутри продукта и сложной геометрией банок, так как весь подход ученых был сосредоточен на изучении точки наименьшего прогрева в банке — ключевом критерии при оценке эффективности стерилизации. Однако данный подход не полностью применим к нашей задаче, поскольку нас интересует не только температура в точке наименьшего прогрева, но и её распределение по всей системе объектов в различные моменты времени. Также, Friso (2015) отмечает проблему значительных трудозатрат при использовании численного метода при решении задачи теплообмена, в связи с чем он делает выбор в пользу аналитического решения, аналогично выбранному и в нашей работе. При этом, например, в (Antonopoulos & Tzivanidis, 1996) используется более общий аналитический подход к решению одномерной задачи теплопроводности для произвольных конвективных граничных условий. Поэтому адаптация аналитического решения из (Biswas & Singh, 2015) выглядела более перспективно, так как авторы продемонстрировали возможность отказаться от явного вычисления вспомогательной функции при условиях, схожих с условиями хранения СЦМС, что существенно сократило требуемые вычислительные мощности.

Таким образом, введенные в модель допущения и примененные в данной работе подходы к моделированию теплопередачи соответствуют решениям, используемым другими исследователями теплообмена. Отличительной чертой нашего исследования является то, что комбинация выбранных методов позволила создать инструмент для решения практических задач в области транспортирования СЦМС — стратегически значимого пищевого продукта, при этом сделав его оптимальным по вычислительным трудозатратам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы была установлена возможность применения одномерной модели теплообмена для прогнозирования продолжительности изменения температуры СЦМС в расширенном диапазоне температур, что позволяет сократить трудозатраты в сравнении с моделированием в многомерном пространстве. Основным результатом исследования — разработка подхода к одномерному моделированию процесса теплообмена СЦМС с окружающей средой, его описание

и создание самой модели. Также, продемонстрирована возможность построения аналитического вида уравнений для температуры слоев. Исследованный математический аппарат позволяет распространить решение задачи для флуктуирующих амбиентных температур, а полученные результаты в целом делают возможным проведение апробации созданной модели и сравнение с эмпирическим исследованием СЦМС. Ограничением разработанного подхода является отсутствие учета фазовых переходов, что может стать следующей задачей в рамках дальнейшей модернизации подхода. Доказательство эффективности созданной модели, что также является закономерным следующим шагом, способно расширить поле специальных программных обеспечений для бизнеса при планировании логистических маршрутов, затрат на транспортирование с учетом срока перевозки и условий окружающей среды. Кроме того, предложенное решение может быть адаптировано для других пищевых продуктов.

## АВТОРСКИЙ ВКЛАД

**Большакова Екатерина Ивановна:** проведение исследования, методология, создание черновика рукописи, создание рукописи и ее редактирование, визуализация, администрирование данных, администрирование проекта.

**Мотылев Сергей Владимирович:** проведение исследования, методология, верификация данных создание черновика рукописи, формальный анализ.

**Семипятный Владислав Константинович:** проведение исследования, методология, создание черновика рукописи, формальный анализ.

**Кручинин Александр Геннадьевич:** методология, ресурсы, создание рукописи и ее редактирование, руководство исследованием, администрирование проекта.

**Туровская Светлана Николаевна:** администрирование данных, создание рукописи и ее редактирование.

**Илларионова Елена Евгеньевна:** ресурсы, создание рукописи и ее редактирование.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

**Ekaterina I. Bolshakova:** investigation, methodology, draft manuscript preparation, manuscript writing and editing, visualization, data administration, project administration.

**Sergey V. Motylev:** investigation, methodology, data verification, draft manuscript preparation, formal analysis.

**Vladislav K. Semipyatny:** investigation, methodology, draft manuscript preparation, formal analysis.

**Aleksandr G. Kruchinin:** methodology, resources, manuscript writing and editing, research supervision, project administration.

**Svetlana N. Turovskaya:** data administration, manuscript writing and editing.

**Elena E. Illarionova:** resources, manuscript writing and editing.

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Илларионова, Е. Е., Туровская, С. Н., & Радаева, И. А. (2020). К вопросу увеличения срока годности молочных консервов. *Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством*, 1(1), 225–230. <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-225-230>
- Illarionova, E. E., Turovskaya, S. N., & Radaeva, I. A. (2020). To the question of increasing of canned milk storage life. *Aktual'nye voprosy molochnoj promyshlennosti, mezhotraslevye tehnologii i sistemy upravleniya kachestvom*, 1(1), 225–230. <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-225-230>
- Исаченко, В. П., Осипова, В. А., & Сукомел, А. С. (1981). Теплопередача. Москва: Энергоиздат.
- Isachenko, V. P., Osipova, V. A., & Sukomel, A. S. (1981). *Heat transfer*. Moscow: Energoizdat.
- Леднева, И. А., Пацай, Л. С., & Кармызов, А. В. (2023). Трансформация логистических цепей поставок в современных экономических условиях. *Научные труды белорусского государственного экономического университета*, 210–216. Белорусский государственный экономический университет.

- Ledneva, I., Patsay, L., & Karmyzov, A. (2023). Transformation of logistics supply chains in modern economic conditions. *Nauchnye trudy belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* (pp. 210–216). Belarus State Economic University.
- Рябова, А. Е., Бурков, И. А., Семипятный, В. К., Пряничникова, Н. С., & Галстян, А. Г. (2023). *Программа расчета времени охлаждения жестебанки сгущенного молока* (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023663645). Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности.
- Ryabova, A. E., Burkov, I. A., Semipyatny, V. K., Pryanichnikova N. S., & Galstyan A. G. (2023). *Programma rascheta vremeni oxlazhdeniya zhestebanki sgushhennogo moloka* (Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy` dlya E` VM № 2023663645). Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut molochnoj promy'shlennosti.
- Туровская, С. Н., Кручинин, А. Г., Илларионова, Е. Е., & Большакова, Е. И. (2024). Исследование воздействия критических температур внешней среды на сгущенное молоко с сахаром. *Вестник КрасГАУ*, 1(202, 189–200). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-1-189-200>
- Turovskaya, S. N., Kruchinina, G., Illarionova, E., & Bolshakova, E. I. (2024). Study of the critical ambient temperatures impact on sweetened condensed milk. *Bulletin of KSAU* (pp. 189–200). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-1-189-200>
- Antonopoulos, K. A., & Tzivanidis, C. (1996). Analytical solution of boundary value problems of heat conduction in composite regions with arbitrary convection boundary conditions. *Acta Mechanica*, 118, 65–78. <https://doi.org/10.1007/BF01176344>
- Biswas, P., & Singh, S. (2015). Analytical solution of 1-D multilayer heat conduction problem with time varying ambients. In *23rd National and 1st International ISHMT-ASTFE Heat and Mass Transfer Conference* (p. 1–9). Trivandrum.
- Bunta, O., Festila, D., Muresan, V., Coloși, T., Stan, O. P., Unguresan, M. L., & Baciut, M. (2023). Mathematical modeling and digital simulation of teeth dynamics for the approximation of orthodontic treatment duration. *Applied Sciences*, 13(10), 5932. <https://doi.org/10.3390/app13105932>
- Churchill, S. W., & Chu, H. H. S. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323–1329. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90235-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90235-2)
- Derossi, A., de Pilli, T., La Penna, M. P., & Severini, C. (2012). Prediction of heating length to obtain a definite F value during pasteurization of canned food. *Journal of Food Process Engineering*, 36, 211–219. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2012.00686.x>
- Destro, F., Hur, I., Wang, V., Abdi, M., Feng, X., Wood, E., Coleman, S., Firth, P., Barton, A., Barolo, M., & Nagy, Z. K. (2021). Mathematical modeling and digital design of an intensified filtration-washing-drying unit for pharmaceutical continuous manufacturing. *Chemical Engineering Science*, 244, 116803. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116803>
- Erdogdu, F. (2023). Mathematical modeling of food thermal processing: Current and future challenges. *Current Opinion in Food Science*, 51, 101042. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2023.101042>
- Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. H., & O'Mahony, J. A. (2015). Heat-Induced changes in milk. In *Dairy Chemistry and Biochemistry* (pp. 345–375). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2_9)
- Fujii, T., & Imura, H. (1972). Natural-convection heat transfer from a plate with arbitrary inclination. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, 755–767. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(72\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90063-1)
- Galstyan, A. G., Petrov, A. N., Illarionova, E. E., Semipyatniy, V. K., Turovskaya, S. N., Ryabova, A. E., Khurshudyan, S. A., Vafin, R. R., & Radaeva, I. A. (2019). Effects of critical fluctuations of storage temperature on the quality of dry dairy product. *Journal of Dairy Science*, 102, 10779–10789. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17229>
- Hu, D., Zhang, H., Li, L., Zhou, R., & Sun, Y. (2013). Mathematical modeling, design and optimization of conceptual configuration of soil-like substrate bioreactor based on system dynamics and digital simulation. *Ecological Engineering*, 51, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.037>
- Kızıltaş, S., Erdoğdu, F., & Palazoğlu, T. K. (2010). Simulation of heat transfer for solid–liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions. *Journal of Food Engineering*, 97, 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.11.024>

- Kumar, A., Bhattacharya, M., Blaylock, J. (1990). Numerical simulation of natural convection heating of canned thick viscous liquid food products. *Journal of Food Science*, 55(5), 1403–1411. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb03946.x>
- LeBlanc, D. (2005). Land transportation of fresh fruits and vegetables: An update. *Stewart Postharvest Review*, 1(1), 1–13. <https://doi.org/10.2212/spr.2005.1.4>
- Lienhard, J. H. (2019). *A heat transfer textbook* (5th ed.). Courier Dover Publications.
- Medennikov, V., & Raikov, A. N. (2020). Formation of the Digital Platform for Precision Farming with Mathematical Modeling. In *DAMDID/RCDL* (Supplementary Proceedings) (pp. 121–133). CEUR Workshop Proceedings.
- Medennikov, V., & Raikov, A. (2021). Optimizing of product logistics digital transformation with mathematical modeling. *Journal of Physics: Conference Series*, 1864(1), 012100. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012100>
- Micheev, M. A., & Micheeva, I. M. (1977). *Basics of heat exchange* (2nd ed.). Energiya.
- Nagar, S., & Sreenivasa, S. (2024). Mathematical modeling, numerical simulation and experimental validation of temperature profiles of PCMs and their applications in industry 4.0: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 238(17), 8850–8876. <https://doi.org/10.1177/09544062241242704>
- Patel, A. A., Gandhi, H., Singh, S., & Patil, G. R. (1996). Shelf-life modeling of sweetened condensed milk based on kinetics of Maillard browning. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20, 431–451.
- Paul, D. A., Anishaparin, A., & Anandharamakrishnan, C. (2011). Computational fluid dynamics studies on pasteurisation of canned milk. *International Journal of Dairy Technology*, 64, 305–313. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2011.00687.x>
- Rao, M. A., & Anantheswaran, R. C. (1988). Convective heat transfer to fluid foods in cans. In *Advances in food research* (vol. 32, pp. 39–84). Academic Press.
- Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., & Cho, Y. I. (1998). *Handbook of heat transfer* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Ryabova, A., Tolmachev, V., & Galstyan, A. (2022). Phase transitions of sweetened condensed milk in extended storage temperature ranges. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52, 526–535. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2379>
- Ryabova, A. E. (2023). Study of the thermophysical properties of sweetened condensed milk. *Food Industry*, 5(2), 52–55. <https://doi.org/10.52653/ppi.2023.2.2.012>
- Singh, B. K., and Negi, S. (2018). Cold chain logistics: An impediment in the perishable food industry of India. *International Journal of Logistics Economics and Globalisation*, 7(4), 332. <https://doi.org/10.1504/ijleg.2018.10018593>
- Sharma, P., Patel, H., & Patel, A. (2015). *Evaporated and sweetened condensed milks*. In *Dairy Processing and Quality Assurance* (pp. 310–332). <https://doi.org/10.1002/9781118810279.ch13>
- Vanek, F., & Sun, Y. (2008). Transportation versus perishability in life cycle energy consumption: A case study of the temperature-controlled food product supply chain. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(6), 383–391. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.07.001>
- Zhu, S., Li, B., & Chen, G. (2022). Improving prediction of temperature profiles of packaged food during retort processing. *Journal of Food Engineering*, 313, 110758. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110758>