

На правах рукописи

Бурков Иван Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СУБЛИМАЦИОННОЙ
СУШКИ ЗАКВАСОЧНЫХ КУЛЬТУР ДЛЯ КИСЛОМОЛОЧНЫХ
ПРОДУКТОВ**

Специальность 4.3.3. Пищевые системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (ФГАНУ «ВНИМИ»)

**Научный
руководитель:**

Рябова Анастасия Евгеньевна
доктор технических наук

**Официальные
оппоненты:**

Бредихин Сергей Алексеевич
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры процессов и аппаратов
перерабатывающих производств ФГБОУ ВО
«Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Ганина Вера Ивановна

доктор технических наук, профессор, ведущий
научный сотрудник ПНИЛ «Конструирование и
внедрение продуктов и рационов
персонализированного питания» ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет
технологий и управления имени К.Г.
Разумовского (Первый казачий университет)»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Кемеровский государственный
университет»

Защита состоится «04» июня 2026 г. в 12 часов 00 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 24.1.515.01 при ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» по адресу 115093, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35, к.7, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности». Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» <http://www.vnimi.org>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Т.С. Бычкова

Актуальность работы. Одной из ключевых задач при производстве заквасок для пищевой промышленности является обеспечение длительной сохранности жизнеспособности микроорганизмов и их нативных свойств. Для решения этой задачи применяются технологические приемы, позволяющие приостановить метаболическую активность клеток без нарушения их структурной целостности. На практике используются два основных подхода: хранение при пониженных температурах и стабилизация за счет удаления влаги, эффективность которых определяется биологическими особенностями сохраняемых микроорганизмов.

Сублимационная сушка (лиофилизация) является наиболее предпочтительным промышленным методом длительного сохранения микробных культур, что обусловлено более низкими, по сравнению с криоконсервацией, затратами на хранение и удобством транспортировки. В отличие от распылительной сушки, широко используемой в молочной промышленности и требующей от микроорганизмов выраженной термотолерантности, сублимационная сушка осуществляется при низких температурах и не сопровождается тепловым стрессом для клеток, что обеспечивает длительное сохранение их жизнеспособности: до 35 лет для ряда бактериальных культур и до 30 лет для штаммов дрожжей. В то же время процесс высушивания может приводить к повреждению клеточных мембран, денатурации белков и ферментов, а также нарушениям целостности ДНК.

Эффективность сублимационной сушки определяется совокупностью параметров технологического процесса и биологических характеристик микроорганизмов, включая форму и размеры клеток, условия их культивирования, состав защитной среды и режимы последующего хранения. Несмотря на широкое промышленное применение, многие аспекты сублимационной сушки заквасок остаются эмпирическими, что обуславливает необходимость научно обоснованного совершенствования ключевых параметров процесса.

В соответствии со Стратегией научно-технологического развития РФ, Доктриной продовольственной безопасности РФ, Стратегией повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года и др., одной из системных задач государства является обеспечение населения доступными и качественными продуктами питания. В этой связи особую актуальность приобретают исследования, направленные на совершенствование технологий получения заквасочных культур, основанные на научно обоснованном выборе режимов предварительного замораживания и сублимационной сушки. Необходимость таких исследований обусловлена стремлением к снижению удельных энергетических затрат и повышению управляемости и воспроизводимости технологических процессов, от которых в значительной степени зависят стабильность качества заквасок и эффективность их промышленного применения в молочной отрасли.

Степень разработанности темы. Теоретические и технологические основы вакуумной сублимационной сушки в отечественной научной школе представлены в трудах Гуйго Э.И., Журавской Н.К., Каухчешвили Э.И.,

Семенова Г.В., Ермакова С.А., Красновой И.С. и других исследователей, где рассмотрены тепломассоперенос, температурные режимы и аппаратурное оформление процесса. Подходы к моделированию и масштабированию сублимации развиты Rambhatla S., Pikal M.J., Nail S.L., Tang X., Kazarin P., Wallen A.J. и др. Особенности молочнокислых культур изучены Ганиной В.И., Рожковой И.В., Свириденко Г.М., Семенихиной В.Ф., Сорокиной Н.П., Santivarangkna G., Saarela S., Morgan C., Fonseca F. и другими авторами.

Цель работы заключается в совершенствовании параметров процесса сублимационной сушки молочнокислых заквасочных культур, включая режимы предварительного замораживания, для обеспечения максимальной выживаемости микроорганизмов и качества готового продукта.

Для достижения поставленной цели сформулированы и реализованы следующие **задачи**:

1. Обобщить современное состояние способов длительного хранения и сублимационной сушки молочнокислых заквасок, выявить ограничения существующих технологий и выделить факторы, влияющие на выживаемость заквасочных культур при сублимации.

2. Исследовать влияние скорости и целевой температуры замораживания на выживаемость *Streptococcus thermophilus* и *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* – как отдельных культур, так и в консорциуме. Определить оптимальный режим предварительного замораживания для обеспечения максимальной жизнеспособности клеток.

3. Изучить влияние температуры полки сублиматора и величины вакуума на скорость сублимации и выживаемость заквасочных культур; установить оптимальные значения этих параметров.

4. Оценить влияние состава и концентрации дополнительных защитных сред (криопротекторов) на жизнеспособность исследуемых микроорганизмов при сублимационной сушке.

5. Усовершенствовать существующую технологию сублимационной сушки заквасочных культур на основе экспериментально установленных оптимальных параметров.

6. Предложить математическую модель для использования при масштабировании технологии от лабораторных условий до промышленного производства.

7. Провести сравнительный анализ характеристик Мечниковской простокваши, выработанной с использованием закваски, полученной по усовершенствованной технологии, и продукта на основе жидкой закваски.

8. Подготовить и оформить изменения к действующей Технологической инструкции по производству заквасок на основании полученных экспериментальных данных.

Научная новизна работы:

Установлены оптимальные технологические параметры сублимационной сушки исследованных заквасочных культур, обеспечивающие высокую скорость сушки и максимальную выживаемость микроорганизмов;

Разработана и верифицирована численная модель процесса предварительного замораживания сублимируемой суспензии с учетом ее теплофизических свойств, которая позволила получить распределение температур во всем объеме замораживаемого продукта;

Установлены зависимости влияния технологических параметров на выживаемость заквасочных культур.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Исследовано комплексное влияние теплофизических факторов на процесс сублимационной сушки заквасочных культур;

Создан экспериментальный аппаратно-программный комплекс с автоматизированной регистрацией параметров для исследования процессов сублимационной сушки заквасок;

На основе проведенных исследований усовершенствована существующая технология производства сублимированных заквасочных культур, обеспечивающая их конкурентоспособность;

Результаты исследования внедрены в производство и оформлены в виде изменения № 1 ТИ ТУ 10.89.19-098-00419785-2023 Технологическая инструкция по производству заквасок.

Методология и методы исследования. Экспериментальная часть работы выполнена на базе ФГАНУ «ВНИМИ». Вычислительная часть исследования, включающая математическое моделирование тепловых процессов предварительного замораживания, проведена в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В работе использован комплекс стандартизованных и общепринятых методов исследования, применяемых в пищевой промышленности для контроля физико-химических, микробиологических и органолептических показателей заквасочных культур и кисломолочных продуктов. Обработка экспериментальных данных осуществлялась методами математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованные параметры процесса сублимационной сушки (температура и продолжительность замораживания, давление в камере сублиматора, температура полки) закваски для Мечниковской простокваши, обеспечивающие высокое сохранение клеток и качество готового продукта.

2. Закономерности влияния параметров предварительного замораживания и режимов сублимационной сушки на сохранность жизнеспособности исследованных заквасочных микроорганизмов.

3. Способ масштабирования процесса предварительного замораживания образцов с лабораторного уровня на промышленный на основе математического моделирования, обеспечивающий научный подход к сохранению воспроизводимости при производстве сублимированной закваски.

Степень достоверности диссертационной работы обусловлена ее опорой на общепринятые научные принципы и современные подходы в области процессов сублимационной сушки и биотехнологии. Достоверность экспериментальной части подтверждается применением стандартизованных методов исследования, использованием необходимого аналитического

оборудования, многократной воспроизводимостью опытов, высокой сходимостью полученных данных и их статистической обработкой. Теоретические и экспериментальные материалы диссертации в полном объеме отражены в публикациях в рецензируемых научных изданиях.

Личный вклад автора. Все исследования, представленные в диссертации, выполнены автором самостоятельно. Личный вклад включает анализ научной литературы по теме, формулирование цели и постановку задач исследования, планирование и проведение экспериментов, выполнение необходимых расчетов, обработку и интерпретацию полученных данных и подготовку общих выводов по работе.

Апробация работы: Основные результаты диссертации были доложены и обсуждены на 7 международных и всероссийских конференциях, в том числе: II Всероссийский научно-практический конгресс «Биотехнология и устойчивое развитие» (Москва, 2024); Международный симпозиум «Пищевые технологии» (Кемерово, 2024); Международная научно-практическая конференция «Стратегии развития АПК России на основе рационального использования региональных генетических и сырьевых ресурсов» (Волгоград, 2024), VII Поландовские чтения (Москва, 2025), X Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам» (Вологда, 2025), Конференция молодых ученых и специалистов отделения сельхознаук РАН (Москва, 2025).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе: 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus, 7 статей в материалах конференций и журналах, индексируемых РИНЦ, получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 128 страницах, включает введение, обзор литературы, методологию исследований, результаты исследований и их анализ, заключение. Диссертация содержит 17 таблиц, 26 рисунков и 6 приложений. Список литературы включает 148 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлены цель и задачи, изложены научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту. Приведены результаты апробации, публикационная активность автора по теме исследования, структура и объем диссертации.

В Главе 1 представлен анализ отечественных и зарубежных научных источников, посвященных способам сохранения заквасочных культур, физико-технологическим основам сублимационной сушки и факторам, определяющим выживаемость молочнокислых микроорганизмов. Показано, что сублимационная сушка является предпочтительным способом длительного хранения заквасок,

поскольку обеспечивает высокую сохранность клеток и удобство промышленного применения. Вместе с тем эффективность процесса зависит от видовых особенностей микроорганизмов, режимов предварительного замораживания, параметров сушки и состава защитной среды. Установлено, что оптимальные технологические параметры получения сухих заквасочных культур носят штаммоспецифический характер и требуют экспериментального обоснования для каждого конкретного объекта исследования. На основании анализа литературы определены цель и задачи исследования.

В Главе 2 изложена методология проведения исследований. Объектом исследования являлся технологический процесс сублимационной сушки молочнокислых заквасочных культур, включая стадию предварительного замораживания. В качестве биологической модели использовали культуры *S. thermophilus* 159 и *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* ЛЗ7/7, а также их консорциум (4:1), применяемый при производстве Мечниковской простокваши. Показана структура

и схема проведения исследования, представленная на Рисунке 1. При выполнении работы применялись стандартизованные, общеизвестные и оригинальные методы исследований, принятые в пищевой промышленности и широко применяемые в научных исследованиях при контроле физико-химических, микробиологических и органолептических показателей кисломолочных продуктов и компонентов для их производств.

Разработан экспериментальный стенд для сублимационной сушки малых объемов исследуемых образцов (Рисунок 2). Установка включает охлаждаемую



Рисунок 1 – Общая схема проведения исследования

вакуумную камеру с конденсатором, нагреваемую полку для образцов, вакуумный насос, систему датчиков (температуры, давления) и микроконтроллер для

автоматического управления процессом. Алгоритм работы установки реализован с помощью кода на языке C++, загруженного в микроконтроллер ESP32, и позволяет автоматизировать процесс замораживания и сушки по заданному циклу. Авторские права на разработанное программное обеспечение зарегистрированы.

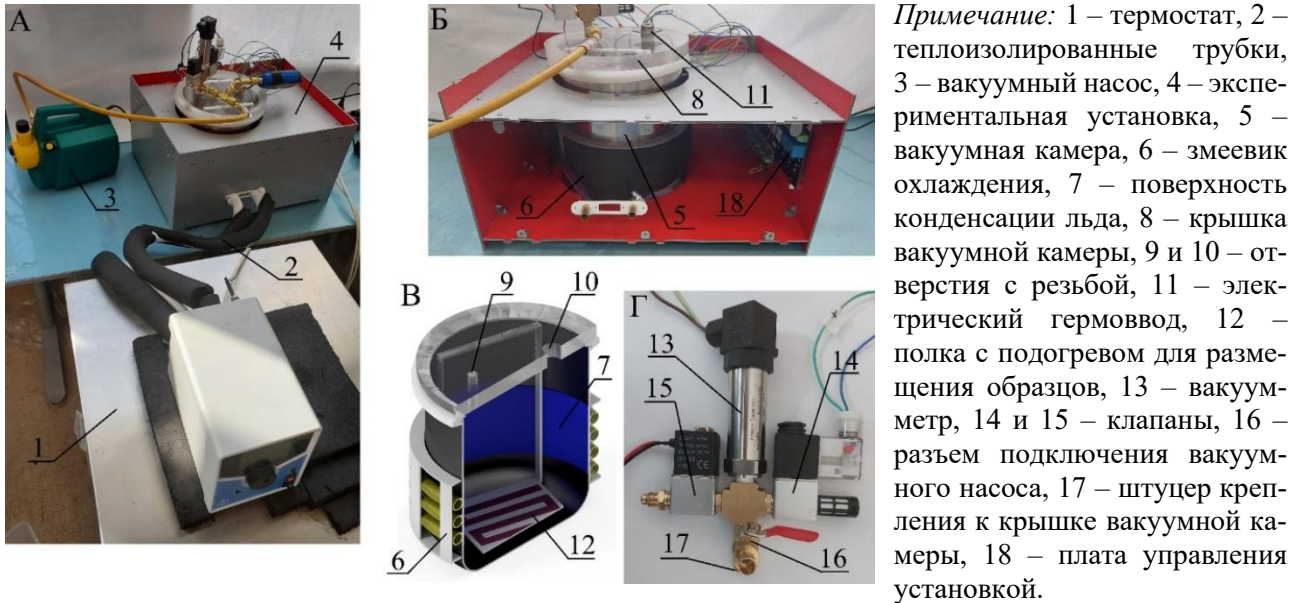


Рисунок 2 – Экспериментальный стенд для сублимационной сушки: А – общий вид стенда; Б – внутреннее устройство созданной вакуумной сушильной установки; В – схема вакуумной камеры в разрезе; Г – пневматическое оборудование, размещенное на крышке вакуумной камеры

Для проведения теплофизического анализа процесса замораживания разработан автономный логгер температуры на базе микроконтроллера ESP8266 с датчиком Pt-100 класса А. Также разработано и зарегистрировано программное обеспечение устройства (Свидетельство № 2024667794). Логгер и датчик верифицированы в жидкостной среде (этиловый спирт, вода) путем сравнения с эталонным измерителем ТЦЭ-005/М2. Погрешность измерений в диапазоне от -196 до +100 °С не превышает 1 °С.

Математическое моделирование процесса замораживания включает формулировку модели нестационарного теплового процесса замораживания жидкого образца, задание граничных условий и теплофизических параметров среды, а также программную реализацию в ANSYS CFX; корректность модели проверена экспериментально по температурным кривым охлаждения образца.

Обработка экспериментальных данных выполнялась методами математической статистики. Исследования проводили в трех-пяти повторностях, результаты представлены в виде средних значений. Для статистической обработки и визуализации данных использовались программные пакеты Excel 2003 (Microsoft, США) и Origin 2018 (OriginLab Corporation, США).

В Главе 3 представлены результаты исследований влияния режимов предварительного замораживания, параметров сублимационной сушки и состава дополнительных защитных сред на выживаемость *S. thermophilus* и *L. delbrueckii*

subsp. *bulgaricus* и их консорциума.

На первом этапе изучали влияние протоколов предварительного замораживания, отличающихся целевой температурой и скоростью охлаждения (Таблица 1). Установлено, что быстрое охлаждение обеспечивает значительно более высокую скорость снижения температуры по сравнению с медленным: 7,7-9,6 °С/мин против 0,2-0,8 °С/мин соответственно. Результаты исследований приведены в Таблицах 2-4.

Таблица 1 – Протоколы замораживания образцов

№ протокола	Описание протокола			Средняя скорость охлаждения, °С/мин
	Температура замораживания, °С	Медленное охлаждение	Быстрое охлаждение	
1	Минус 30	✓		0,2
2	Минус 30		✓	7,7
3	Минус 50	✓		0,8
4	Минус 50		✓	9,0
5	Минус 70	✓		2,5
6	Минус 70		✓	9,6
7	Минус 70, отогрев до минус 20, повторно минус 70 °С,	✓		Замораж. 2,9; отогрев 3,3; замораж. 2,9

Оценка выживаемости микроорганизмов после замораживания и последующей сублимационной сушки (Таблицы 2-4) показала, что снижение конечной температуры замораживания не приводило к повышению выживаемости культур. Для *Str. thermophilus* установлено, что при температуре замораживания минус 30 °С после замораживания наблюдалось логарифмическое снижение численности клеток на 0,45, а итоговая выживаемость после сублимационной сушки составляла около 15,7 %. При минус 70 °С степень инактивации возрастала, и итоговая выживаемость снижалась до 3,6 %. *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* характеризовалась более высокой чувствительностью к понижению температуры: общее логарифмическое снижение численности клеток достигало 2,0-2,07. Для консорциума культур при минус 30 °С после замораживания сохранялось около 71,4 % клеток. Установлено, что влияние скорости охлаждения проявлялось преимущественно при экстремально низких температурах: при минус 70 °С быстрый режим сопровождался более выраженным снижением численности клеток по сравнению с медленным, тогда как при минус 30 °С различия между режимами охлаждения были незначительными. Полученные результаты показали, что оптимальным режимом предварительного замораживания является охлаждение до минус 30 °С, независимо от скорости охлаждения. При этом консорциум культур проявлял более высокую устойчивость по сравнению с отдельными штаммами.

Таблица 2 – Количество *Str. thermophilus* (КОЕ/г) и процент выживаемости (контроль = $7,0 \cdot 10^9$ КОЕ/г) при различных протоколах замораживания и сушки

№ протокола	После замораживания		После сублимации		Выж. общая (%) / LR общий
	Количество (КОЕ/г)	Выж. (%) / LR	Количество (КОЕ/г)	Выж. (%) / LR	
1	$2,5 \cdot 10^9$	35,7 / 0,45	$1,1 \cdot 10^9$	44,0 / 0,36	15,7 / 0,8
2	$2,5 \cdot 10^9$	35,7 / 0,45	$1,1 \cdot 10^9$	44,0 / 0,36	15,7 / 0,8
3	$2,5 \cdot 10^9$	35,7 / 0,45	$1,1 \cdot 10^9$	44,0 / 0,36	15,7 / 0,8
4	$2,5 \cdot 10^9$	35,7 / 0,45	$1,1 \cdot 10^9$	44,0 / 0,36	15,7 / 0,8
5	$2,5 \cdot 10^9$	35,7 / 0,45	$1,1 \cdot 10^9$	44,0 / 0,36	15,7 / 0,8
6	$7,0 \cdot 10^8$	10,0 / 1,0	$2,5 \cdot 10^8$	35,7 / 0,45	3,6 / 1,45
7	$2,5 \cdot 10^9$	35,7 / 0,45	$1,1 \cdot 10^9$	44,0 / 0,36	15,7 / 0,8

Таблица 3 – Количество *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (КОЕ/г) и процент выживаемости (контроль = $7,0 \cdot 10^8$ КОЕ/г) при разных протоколах замораживания и сушки

№ протокола	После замораживания		После сублимации		Выж. общая (%) / LR общий
	Количество (КОЕ/г)	Выж. (%) / LR	Количество (КОЕ/г)	Выж. (%) / LR	
1	$7,0 \cdot 10^8$	100,0 / 0,0	$1,1 \cdot 10^8$	15,7 / 0,8	15,7 / 0,8
2	$2,5 \cdot 10^8$	35,7 / 0,45	$1,1 \cdot 10^8$	44,0 / 0,36	15,7 / 0,8
3	$2,5 \cdot 10^8$	35,7 / 0,45	$1,1 \cdot 10^8$	44,0 / 0,36	15,7 / 0,8
4	$2,5 \cdot 10^8$	35,7 / 0,45	$7,0 \cdot 10^7$	28,0 / 0,55	10,0 / 1,0
5	$2,5 \cdot 10^7$	3,6 / 1,45	$7,0 \cdot 10^6$	28,0 / 0,55	1,0 / 2,0
6	$2,5 \cdot 10^7$	3,6 / 1,45	$6,0 \cdot 10^6$	24,0 / 0,62	0,9 / 2,07
7	$2,5 \cdot 10^7$	3,6 / 1,45	$7,0 \cdot 10^6$	28,0 / 0,55	1,0 / 2,0

Таблица 4 – Количество микроорганизмов консорциума (КОЕ/г) и процент выживаемости относительно контрольного образца консорциума (контроль = $7,0 \cdot 10^9$ КОЕ/г)

№ протокола	После замораживания		После сублимации		Выж. общая (%) / LR общий
	Количество (КОЕ/г)	Выж. (%) / LR	Количество (КОЕ/г)	Выж. (%) / LR	
1	$5,0 \cdot 10^9$	71,4 / 0,15	$5,0 \cdot 10^9$	100,0 / 0,0	71,4 / 0,15
2	$5,0 \cdot 10^9$	71,4 / 0,15	$5,0 \cdot 10^9$	100,0 / 0,0	71,4 / 0,15
3	$2,5 \cdot 10^9$	35,7 / 0,45	$2,5 \cdot 10^9$	100,0 / 0,0	35,7 / 0,45
4	$2,5 \cdot 10^9$	35,7 / 0,45	$7,0 \cdot 10^8$	28,0 / 0,55	10,0 / 1,0
5	$1,1 \cdot 10^9$	15,7 / 0,8	$7,0 \cdot 10^8$	63,6 / 0,2	10,0 / 1,0
6	$5,0 \cdot 10^8$	7,1 / 1,15	$5,0 \cdot 10^8$	100,0 / 0,0	7,1 / 1,15
7	$5,0 \cdot 10^8$	7,1 / 1,15	$5,0 \cdot 10^8$	100,0 / 0,0	7,1 / 1,15

На следующем этапе исследовали влияние температуры полки сублиматора на выживаемость консорциума культур. Установлено, что в диапазоне температур от минус 5 до 20 °С существенных различий по сохранности клеток не наблюдалось (Рисунок 3). Повышение температуры полки сопровождалось увеличением скорости сублимации, что приводило к интенсификации процесса сушки. При дальнейшем повышении температуры до 40-60 °С отмечалось выраженное снижение выживаемости микроорганизмов. Таким образом, температура полки 20 °С была определена как рациональная, поскольку обеспечивает максимальную скорость сублимационной сушки без снижения сохранности клеток.

Влияние остаточного давления в сушильной камере изучалось в диапазоне от 10 до 100 Па (Рисунок 4). Установлено, что изменение давления в указанных

пределах не оказывало статистически значимого влияния на выживаемость консорциума культур. Вместе с тем снижение давления сопровождалось увеличением энергозатрат процесса. С учетом совокупности факторов (выживаемости микроорганизмов, скорости сушки и энергетической эффективности) рациональным диапазоном давления определены значения 60-100 Па.

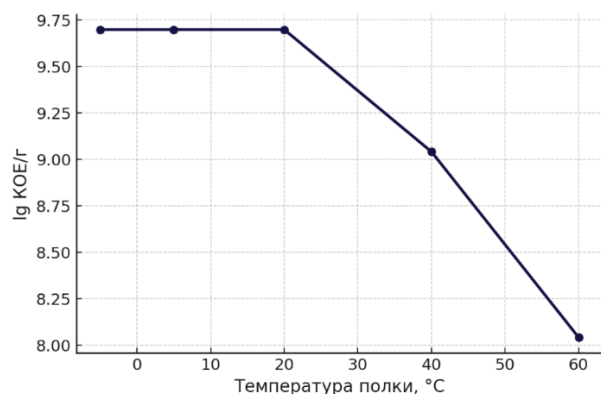


Рисунок 3 – Зависимость выживаемости культур от температуры полки сублиматора

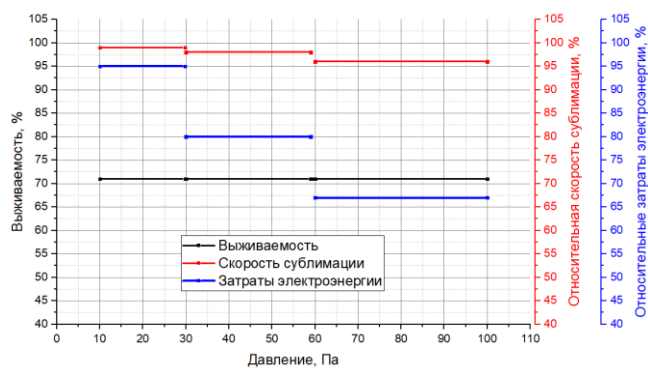


Рисунок 4 – Эффективность процесса сублимации консорциума

На следующем этапе изучали влияние дополнительных защитных сред (криопротекторов) на сохранность заквасок. При этом базовой средой для сушки служило обезжиренное молоко, обладающее естественными защитными свойствами. В качестве дополнительных криопротекторов применяли глицерин и желатозу в концентрациях 2,5 %, 5 % и 10 %. Образцы высушивали при оптимальных режимах (предварительное замораживание при минус 30 °C в течение 6 ч., сушку проводили на экспериментальной установке при давлении в камере от 60 до 100 Па и температуре полки 20 °C в течение 24 ч.). Сводные результаты (Таблица 5) показали, что введение указанных криопротекторов не приводит к значимому повышению выживаемости микроорганизмов.

Таблица 5 – Микробиологические и технологические показатели заквасок в зависимости от типа и объема, внесенного криопротектора

Условные обозначения	Защитная среда	Концентрация защитной среды	Количество (КОЕ/г)	Наличие обоих видов культур	Время сквашивания (ч.)
К (контроль)	-	-	$1,1 \cdot 10^9$	+	6
Г2,5	Глицерин	2,5 %	$7,0 \cdot 10^9$	+	5
Г5,0	Глицерин	5,0 %	$5,0 \cdot 10^9$	+	5
Г10,0	Глицерин	10,0 %	$5,0 \cdot 10^9$	+	5
Ж2,5	Желатоза	2,5 %	$2,5 \cdot 10^9$	+	6
Ж5,0	Желатоза	5,0 %	$5,0 \cdot 10^9$	+	5
Ж10,0	Желатоза	10,0 %	$5,0 \cdot 10^9$	+	5

Во всех вариантах сохранялась высокая численность жизнеспособных клеток и присутствие обоих видов микроорганизмов в составе консорциума. При этом в отдельных случаях наблюдалось некоторое сокращение времени сквашивания

вания молока, что свидетельствовало о повышении активности закваски. С учетом отсутствия выраженного защитного эффекта применение данных веществ не является обязательным элементом технологии.

Таким образом, установлено, что оптимальным режимом предварительного замораживания для исследованного консорциума культур является охлаждение до минус 30 °С. Температура полки 20 °С обеспечивает интенсификацию процесса сублимационной сушки без снижения выживаемости микроорганизмов. Давление в камере целесообразно поддерживать в диапазоне 60-100 Па, поскольку дальнейшее его снижение не повышает сохранность культур, но приводит к увеличению энергозатрат. Дополнительно введение глицерина или желатозы в систему перед сублимационной сушкой не приводит к существенному повышению выживаемости микроорганизмов.

В Главе 4 разработан подход к анализу процессов предварительного замораживания при переходе от лабораторных условий к промышленным на основе методов математического моделирования теплообмена. В качестве инструмента использован программный комплекс ANSYS CFX 2020.

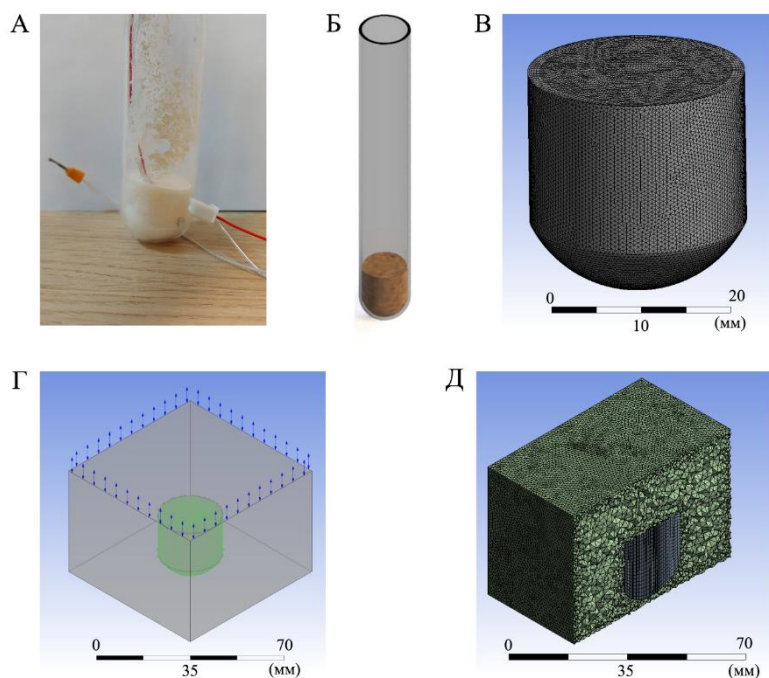


Рисунок 5 – А – исходная пробирка с замораживаемым раствором и размещенным в ней температурным датчиком, Б – 3D-модель пробирки с раствором, В – расчетная геометрия раствора, Г – итоговая расчетная геометрия раствора и воздуха, Д – среднее сечение сетки конечных элементов расчетной геометрии.

сuspензии и воздушного окружения, моделирующего условия в холодильной установке. Данная геометрия была разбита на сетку конечных элементов, среднее сечение которой показано на Рисунке 5Д.

Начальными условиями расчета являлись: температура закваски 10 °С, температура неподвижного воздуха минус 30 °С. Граничные условия: свободное движение воздуха при температуре минус 30 °С через стенки геометрии воздуха,

На первом этапе выполнена валидация математической модели на лабораторном эксперименте. В качестве объекта использовали пробирку с 10 мл закваски, замороженную по протоколу №1 (минус 30 °С, медленное охлаждение). В центр объема помещался температурный датчик, регистрировавший ход охлаждения (Рисунок 5А).

Была создана 3D-модель пробирки и находящейся в ней высушиваемой закваской (Рисунок 5Б). Стенки пробирки в расчете заменялись эквивалентным сопротивлением теплообмена (Рисунок 5В). Итоговая расчетная геометрия (Рисунок 5Г) состояла из двух тел – замораживаемой

а также температура минус 30 °С горизонтальной стенки, на которой стоит пробирка. На границе раздела «воздух-раствор» было задано термическое сопротивление, эквивалентное стеклянной стенке пробирки толщиной 1 мм. Температурно-зависимые свойства закваски приведены в Таблице 6. Между приведенными точками осуществлялась линейная интерполяция значений. Значительный скачок теплоемкости в температурном диапазоне от минус 10 до минус 0,5 °С соответствует тепловому эффекту фазового перехода. Данный подход несколько снижает точность вычислений, однако избавляет от необходимости проведения крайне сложных и дорогих исследований с применением дифференциальной сканирующей калориметрии.

Таблица 6 – Термофизические свойства замораживаемой суспензии

Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Минус 60,0	1000	1800	2,2
Минус 20,0	1000	2500	2,0
Минус 10,1	1000	3500	1,8
Минус 10,0	1000	29000	1,8
Минус 0,5	1030	32000	0,5
Минус 0,4	1030	3800	0,5
40,0	1030	3800	0,5

Свойства воздуха были заданы из встроенной базы данных решателя: плотность описывалась моделью идеального газа, теплопроводность принималась равной 0,0261 Вт/(м·К), а теплоемкость – 1004 Дж/(кг·К) в расчетном диапазоне температур.

При моделировании тепловых полей в замораживаемом растворе использовалось уравнение теплопроводности (1):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где, ρ – плотность (кг/м³), C_p – теплоемкость (Дж/(кг·К)), T – температура (К), t – время (с), x , y , z – пространственные координаты (м), k – теплопроводность (Вт/(м·К)).

Конвективный теплообмен моделировался в зависимости от давления. В вакуумной камере его расчет основывался на режиме течения, определяемом числом Кнудсена (2):

$$Kn = \frac{\lambda}{L}, \quad (2)$$

где, λ – длина свободного пробега молекулы, L – характерный размер течения.

При рабочем давлении 1-100 Па число Кнудсена находится в интервале от 0,01 до 1, что соответствует переходному режиму течения. В этом режиме сохраняется сплошность среды, но отсутствует условие прилипания.

Математическая модель конвективного теплообмена описывалась следующими уравнениями:

Уравнение неразрывности (3):

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Уравнения Навье-Стокса (4-6):

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + g_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

где, u – скорость текучей среды (м/с), g_y – ускорение свободного падения.

Уравнение энергии для текучей среды:

$$\rho_f C_{p,f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u_x \frac{\partial T_f}{\partial x} + u_y \frac{\partial T_f}{\partial y} + u_z \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) \quad (7)$$

где, индекс f относится к свойствам текучей среды.

При моделировании в камере сублиматора использовалось условие про- скальзывания газа на границе (8).

$$u_{bond}(x, y, z, t) \neq 0 \quad (8)$$

где, $bond$ – граница между твердой и текучей средой.

При атмосферном давлении – условие прилипания:

$$u_{bond}(x, y, z, t) = 0 \quad (9)$$

Данные уравнения решались для каждого контрольного объема расчетной области, образуя систему уравнений. Решение уравнений осуществлялось итерационным методом (методом последовательных приближений). Все вычисления производились с двойной точностью в настройках решателя.

В результате расчета было получено распределение температуры в объеме суспензии и воздуха, для среднего сечения расчетной геометрии (Рисунок 6). Моделирование пока-

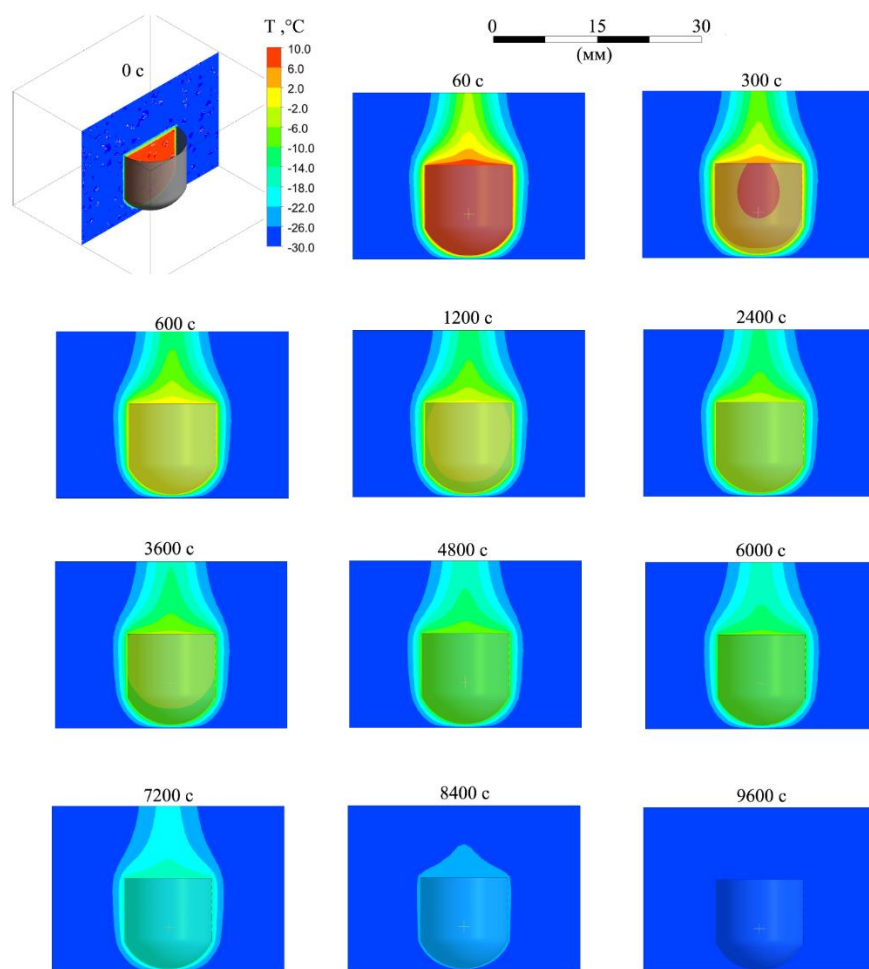


Рисунок 6 – Температурное поле в среднем сечении пробирки с суспензией в процессе замораживания

зало выраженный нестационарный характер процесса замораживания: фронт кристаллизации распространяется от периферии образца к центру. Наиболее длительной стадией является фазовый переход, что подтверждается длительным существованием изотерм в диапазоне от 0 °C до минус 10 °C.

Для валидации модели были сопоставлены экспериментальная и расчетная временные зависимости температуры в контрольной точке, расположенной в центре пробирки (Рисунок 7).

Как следует из графика, вычислительный эксперимент обеспечивает несколько более высокие значения температуры в области фазового перехода. Наиболее важным параметром, однако, является общее время достижения суспензией целевой температуры. Это время в обоих случаях практически совпадает, а расхождение не превышает 5 %.

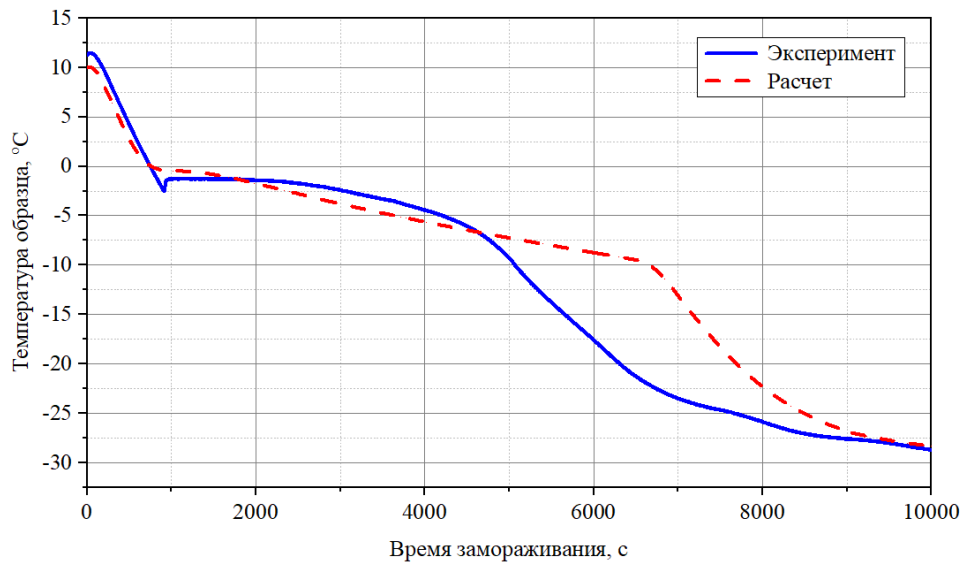


Рисунок 7 – Сравнение температурных кривых, полученных в ходе физического эксперимента (датчик в центре пробирки) и численного моделирования (температура в центре расчетной области).

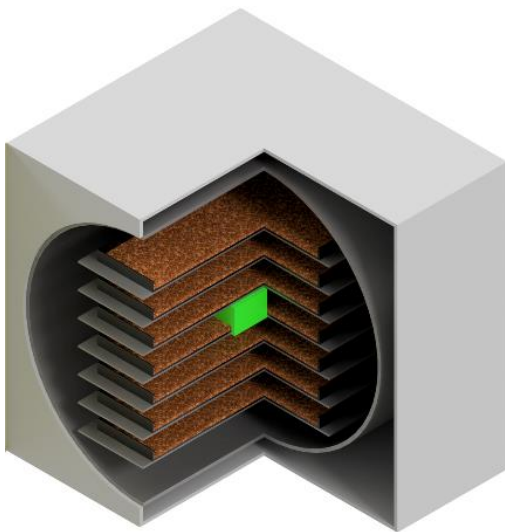


Рисунок 8 – Расчетная геометрия для моделирования замораживания в поддоне (область расчета выделена зеленым)

часть выделена зеленым на Рисунке 8.

Поддон моделировался как тепловое сопротивление толщиной 2 мм из нержавеющей стали AISI 304. Тепловой контакт между полкой и поддоном принимался идеальным. Граничные условия и свойства воздуха задавались в соответствии с методикой, описанной ранее.

Таким образом, выбранная модель замораживания и численный алгоритм признаны адекватными, что дало основание применять их для прогнозирования процесса в промышленных условиях.

Далее проведена серия вычислительных экспериментов, направленных на масштабирование результатов на промышленные условия. Проведено численное моделирование трех способов замораживания: конвективного (воздушного) охлаждения; комбинированного – конвективного и кондуктивного через полку; вакуумного охлаждения в условиях пониженного давления. Для сокращения вычислительных ресурсов моделировалась центральная область поддона, где скорость охлаждения минимальна. В расчет включались полка, поддон и воздушный зазор между полками. Расчетная

Результаты моделирования при температуре замораживания минус 30 °С (Рисунок 9) показали, что при увеличении толщины слоя раствора от 4 до 14 мм время достижения требуемой температуры увеличивается нелинейно: при чисто конвективном охлаждении – на 40-60 %, при кондуктивном – на 20-25 %.

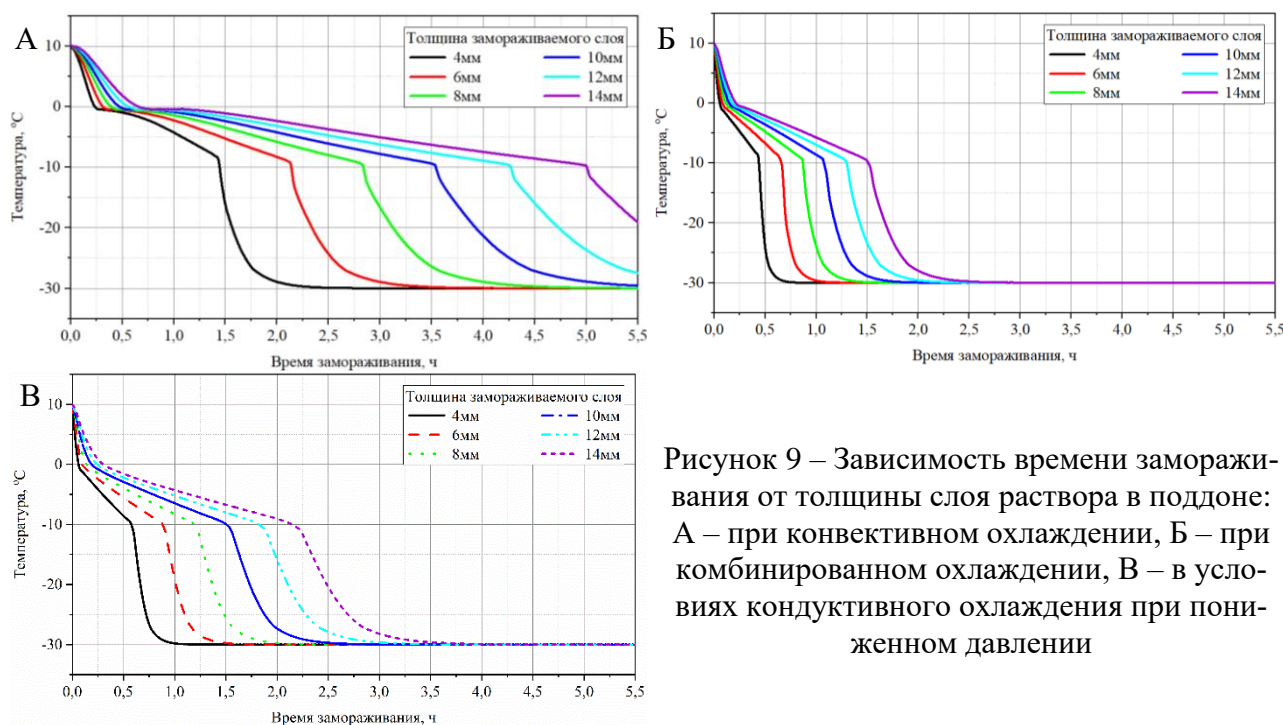


Рисунок 9 – Зависимость времени замораживания от толщины слоя раствора в поддоне: А – при конвективном охлаждении, Б – при комбинированном охлаждении, В – в условиях кондуктивного охлаждения при пониженном давлении

Полученные результаты могут использоваться для оптимизации технологических режимов и прогнозирования времени замораживания при масштабировании процесса до промышленных объемов. Разработанная и верифицированная математическая модель адекватно описывает процесс замораживания заквасочной суспензии и подтверждена сопоставлением расчетных и экспериментальных данных. Показано, что при толщине слоя 10-15 мм применение кондуктивного охлаждения при пониженном давлении или комбинированного охлаждения позволяет сократить время замораживания суспензии на 40-60 % по сравнению с конвективным режимом, что обосновывает выбор данных режимов для масштабирования процесса без снижения качества культуры.

В Главе 5 представлена апробация разработанных режимов сублимационной сушки заквасочных микроорганизмов в условиях опытного производства.

Для опытно-промышленной выработки были подготовлены три варианта суспензии заквасочных микроорганизмов: без защитной среды, с добавлением 2,5 % глицерина и с добавлением 5 % желатозы. Подготовленные суспензии разливали в поддоны объемом 500 ± 50 мл и размещали в сублимационной установке ТГ-50 (Германия), работавшей по усовершенствованным режимам (Таблица 7). Контрольный поддон без криопротектора сушили по традиционной технологии. Обозначение образцов представлено в Таблице 8. Продолжительность сублимационной сушки составляла до 24 часов.

Таблица 7 – Сравнительная характеристика параметров процесса сублимационной сушки

Наименование параметра	Традиционные режимы	Экспериментальные режимы					
Температура замораживания, °С	Минус 35±5	Минус 30±1					
Время замораживания поддона, ч Толщина слоя, мм:		конвективное охлаждение		кондуктивное охлаждение		кондуктивное охлаждение при пониженном давлении	
4	4,5±0,5		2ч 30мин		45мин		1ч
6	4,5±0,5		3ч 30мин		1ч		1ч 30мин
8	4,5±0,5		4ч 30мин		1ч 15мин		2ч
10	4,5±0,5		5ч 45мин		1ч 45мин		2ч 30мин
12	4,5±0,5		7ч		2ч		3ч
14	4,5±0,5	8ч	2ч 30мин	3ч 30мин			
Температура полки при сублимации, °С	30±5	20±1					
Давление при сублимации, Па	не более 1,3	60...100					

Таблица 8 – Обозначения опытных образцов закваски

Закваска без защитной среды, выработанная по технологии с традиционными режимами	К
Закваска без защитной среды, выработанная по технологии с экспериментальными режимами	Э
Закваска с добавлением 2,5 % глицерина	ЭГ2,5
Закваска с добавлением 5,0 % желатозы	ЭЖ5

Результаты опытно-промышленной апробации подтвердили эффективность разработанной технологии. В образце Э, высушенном по усовершенствованным режимам, выживаемость микроорганизмов составила $7,0 \cdot 10^9$ КОЕ/г (Таблица 9). Однако образцы с криопротекторами проявили повышенную гигроскопичность и склонность к комкованию. Все показатели микробиологической безопасности соответствовали требованиям ТР ТС 033/2013 и ТР ТС 021/2011.

Таблица 9 – Сравнительный анализ показателей качества опытных образцов сублимированной закваски

Наименование показателя	К	Э	ЭГ2,5	ЭЖ5
Массовая доля влаги, %	4,75±0,06	4,67±0,05	5,02±0,03	5,18±0,05
Кислотность, °Т	136,5±0,92	135,8±0,75	132,2±0,54	132,5±0,67
Количество молочнокислых бактерий, КОЕ/г	$5,0 \cdot 10^9$	$7,0 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^9$
Морфологическое описание	полиморфная микроструктура, представленная диплококками, палочковидными формами, а также цепочками кокков и палочек различной длины			
Внешний вид и консистенция	Однородный сухой порошок		Однородный сухой порошок, заметна склонность к образованию легко разрушаемых комков	
Вкус и запах	Чистый кисломолочный			

Наименование показателя	К	Э	ЭГ2,5	ЭЖ5
Цвет	Кремовый, однородный по всей массе	Светло-кремовый, однородный по всей массе		Кремовый, однородный по всей массе

Для оценки активности восстановленных заквасок была проведена выработка опытных партий Мечниковской простокваши после трех месяцев хранения. Контролем служил продукт на стандартной жидкой закваске. Динамика кислотности в процессе сквашивания представлена на Рисунке 10. Органолептические показатели представлены в Таблице 10, профилограммы – на Рисунке 11.

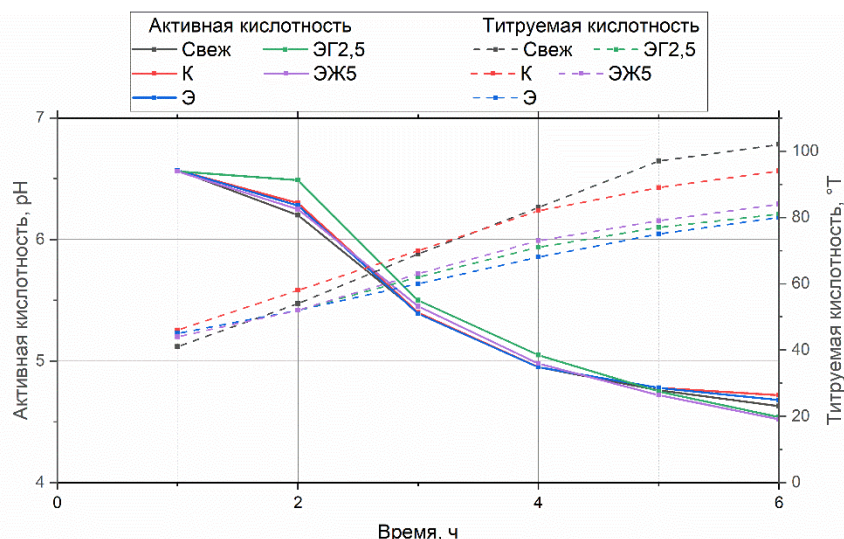


Рисунок 10 –
Динамика изменения активной и титруемой кислотности в процессе сквашивания Мечниковской простокваши

Таблица 10 – Органолептические показатели исследованных образцов

Образец	Вкус и запах	Цвет	Консистенция
Свеж.	Чистые, кисломолочные, без посторонних привкусов и запахов; вкус умеренно кислый, хорошо выраженный	Молочно-белый, равномерный по всей массе	Однородная, с плотным ненарушенным сгустком
К	Чистые, кисломолочные, без посторонних привкусов и запахов; вкус выражено кислый		Достаточно плотная, незначительная крупитчатость; с незначительным отделением сыворотки
Э	Чистые, кисломолочные, без посторонних привкусов и запахов; вкус умеренно кислый, сбалансированный		Однородная, с плотным ненарушенным сгустком
ЭГ2,5	Чистые, кисломолочные, без посторонних привкусов и запахов; вкус недостаточно выраженный, мягкий		Нежная, однородная, сгусток недостаточно плотный, непрочный
ЭЖ5	Чистые, кисломолочные, без посторонних привкусов и запахов; вкус мягкий, с недостаточно выраженной кислотностью		Нежная, однородная, сгусток недостаточно плотный, непрочный

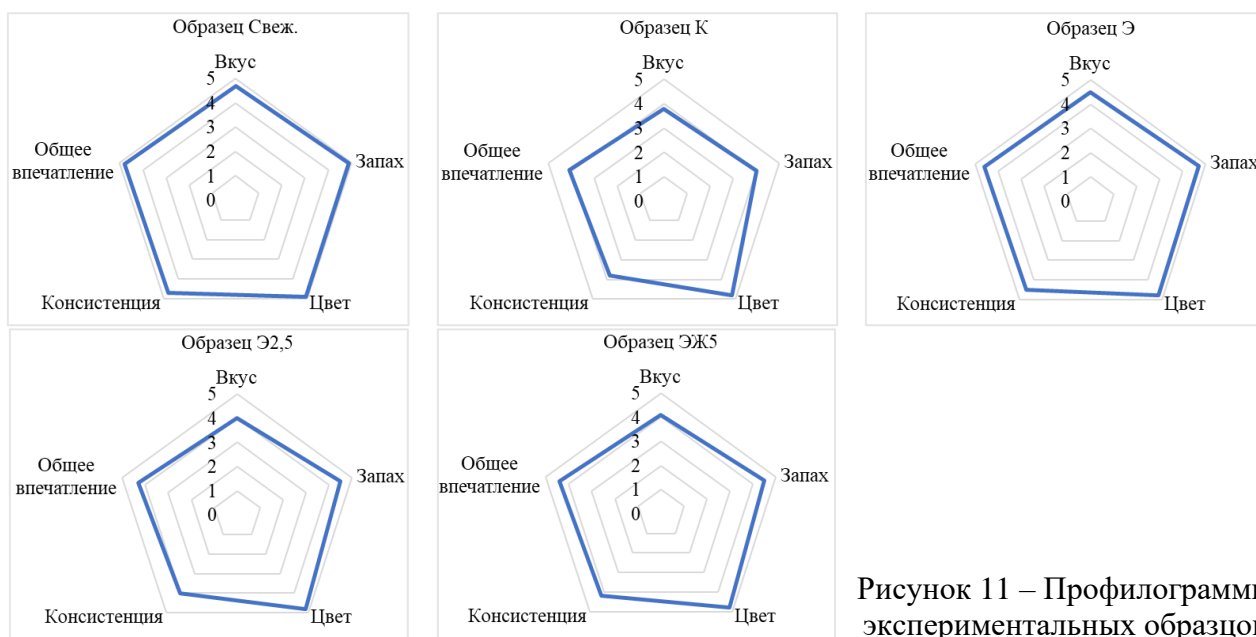


Рисунок 11 – Профилограммы экспериментальных образцов

Результаты исследования показали, что все исследованные образцы соответствовали требованиям нормативной документации. При этом продукты, выработанные с использованием заквасок Э и К, по совокупности органолептических и физико-химических показателей были наиболее близки к контрольному образцу, изготовленному с применением жидкой закваски. Образцы, полученные с использованием заквасок с криопротекторами (ЭГ2,5 и ЭЖ5), формировали менее плотный стужок и характеризовались менее выраженным вкусом.

Таким образом, результаты опытно-промышленной апробации показали, что применение оптимизированных режимов предварительного замораживания и сублимационной сушки позволяет получать сухие заквасочные препараты, соответствующие требованиям нормативной документации и обладающие высокой активностью. Наилучшие показатели качества готового продукта были получены при использовании заквасок, высушенных по усовершенствованным режимам без применения дополнительных криопротекторов.

Предлагаемые технические решения обеспечивают снижение энергозатрат на процесс сублимационной сушки до 30 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования позволили усовершенствовать параметры процесса сублимационной сушки, включая режимы предварительного замораживания, что обеспечило максимальную выживаемость исследованных молочнокислых микроорганизмов и высокое качество сухой закваски при снижении энергозатрат до 30 %.

1. Проведен анализ научно-технической литературы по теме исследования. Систематизирован и обобщен материал по аспектам сохранения, сушки и производства молочнокислых заквасочных культур. Выявлены основные факторы и ограничения, влияющие на жизнеспособность культур при замораживании и сублимационной сушке.

2. Экспериментально исследовано влияние режимов предварительного замораживания на выживаемость культур *S. thermophilus* и *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (индивидуально и в консорциуме). Показано, что оптимальным является замораживание до минус 30 °С; дальнейшее снижение температуры не повышает выживаемость. Быстрое (иммерсионное) охлаждение целесообразно лишь при умеренных температурах; при экстремальных температурах (минус 70 °С) оно приводит к бóльшему повреждению клеток, чем медленное.

3. Определены оптимальные технологические параметры процесса сублимационной сушки закваски. Установлено, что температура греющих полок сублиматора 20 °С обеспечивает высокую скорость сушки без снижения выживаемости микроорганизмов. Давление в вакуумной камере в диапазоне 60-100 Па не оказывает влияния на сохранность клеток, но существенно влияет на энергозатраты. Рекомендован диапазон 60-100 Па как оптимальный компромисс между скоростью сушки и энергоэффективностью процесса.

4. Установлено, что добавление дополнительных криопротекторов в исследуемых концентрациях не приводит к значимому увеличению выживаемости заквасочных культур после сублимационной сушки, поскольку оптимальные режимы сушки сами по себе обеспечивают их сохранность >70 %. Тем не менее, использование глицерина или желатозы несколько повышает активность закваски (уменьшая время сквашивания продукта примерно на 10-15 %).

5. Научно обосновано усовершенствование технологии производства отечественных сублимированных заквасочных культур для Мечниковской простокваши. Технология включает оптимизированные режимы замораживания (минус 30 °С) и сублимационной сушки (температура полок 20 °С, вакуум 60-100 Па, продолжительность 24 часа), обеспечивающие сохранение необходимого количества жизнеспособных клеток (не менее $1 \cdot 10^9$ КОЕ/г).

6. Разработана математическая модель замораживания, валидированная на лабораторных данных, и проведены расчеты для различных толщин слоя и условий охлаждения. Полученные результаты используются для масштабирования процесса на промышленный уровень.

7. Проведен сравнительный анализ показателей Мечниковской простокваши, который показал отсутствие различий в качестве продукта, выработанного с использованием сухой закваски по усовершенствованным режимам, и продукта на основе жидкой закваски.

8. По результатам работы разработано и внедрено в промышленность: Изменение № 1 ТИ ТУ 10.89.19-098-00419785-2023 Технологическая инструкция по производству заквасок, регламентирующее уточненные параметры технологического процесса. Проведена промышленная апробация разработанных положений, по результатам которой оформлены соответствующие акты.

**Список трудов, опубликованных по материалам диссертации
Статьи в журналах, входящих в международные реферативные базы
данных и системы цитирования Web of Science и Scopus**

1. Experimental and computational thermal analysis of partial-body cryotherapy / I. A. Burkov, L. M. Kolishkin, A. V. Pushkarev [et al.] // International

Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 183. – P. 122194. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122194. – EDN GACEKL.

2. Numerical simulation of controlled precision cryosurgery using argon Joule–Thomson and liquid nitrogen evaporation cryoprobes / I. A. Burkov, A. V. Pushkarev, S. S. Ryabikin [et al.] // International Journal of Refrigeration. – 2022. – Vol. 133. – P. 30-40. – DOI 10.1016/j.ijrefrig.2021.10.020. – EDN YZLLRN.

3. Numerical simulation of multiprobe cryoablation synergy using heat source boundary / I. A. Burkov, A. V. Pushkarev, A. V. Shakurov [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 147. – P. 118946. – DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118946. – EDN YKZLHA.

Статьи в журналах перечня ВАК, относящихся к категории К1-К2

4. Бурков, И. А. Моделирование и масштабирование процесса криообработки заквасочных микроорганизмов / И. А. Бурков, А. Е. Рябова, А. Г. Галстян // Пищевая промышленность. – 2025. – № 10. – С. 11-15. – DOI 10.52653/PPI.2025.10.10.002. – EDN XTHWWE.

5. Бурков, И. А. Влияние криопротекторов на выживаемость заквасочных микроорганизмов при сублимационной сушке / И. А. Бурков, В. А. Митрова, А. Е. Рябова // Пищевая промышленность. – 2025. – № 5. – С. 144-147. – DOI 10.52653/PPI.2025.5.5.027. – EDN ESOYAL.

6. Бурков, И. А. Исследование выживаемости заквасочных культур мечниковской простокваши в процессе замораживания / И. А. Бурков, А. Ю. Колоколова, А. Е. Рябова // Пищевая промышленность. – 2024. – № 11. – С. 29-33. – DOI 10.52653/PPI.2024.11.11.005. – EDN JXGSEQ.

Статьи в материалах конференций и журналах, индексируемых в РИНЦ

7. Бурков, И. А. Подбор температуры полки сублиматора при сушке закваски для Мечниковской простокваши / И. А. Бурков, А. Е. Рябова // Поландовские чтения: Сборник материалов VII международной научно-практической молодежной конференции, посвященной 80-летию победы в Великой Отечественной Войне и 90-летию со дня рождения Поландовой Ларисы Дмитриевны. – Москва: ООО "Белый Ветер", 2025. – С. 122-124. – EDN JERXAU.

8. Бурков, И. А. Современные методы консервации заквасочных культур в молочной промышленности / И. А. Бурков // Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов – регионам. – Вологда-Молочное: ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, 2025. – С. 228-232. – EDN YULHBG.

9. Бурков, И. А. Подход к масштабированию режимов замораживания от малой партии к промышленной / И. А. Бурков // Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук. – 2025. – № 1. – С. 32-34. – EDN MVYFRT.

10. Бурков, И. А. Оптимизация процесса замораживания в технологии сублимации молочнокислых заквасок / И. А. Бурков, А. Ю. Колоколова, А. Е. Рябова // Пищевые технологии: Сборник тезисов III Международного Симпозиума, посвященного 90-летию со дня рождения доктора технических

наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ, основателя научной школы Льва Александровича Остроумова. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2024. – С. 30-34. – EDN IYAYBY.

11. Бурков, И. А. Установки сублимационной сушки - существующие решения и особенности работы / И. А. Бурков, А. Е. Рябова // Стратегия развития АПК России на основе рационального использования региональных генетических и сырьевых ресурсов: Материалы Международной научно-практической конференции. – Волгоград: ООО "СФЕРА", 2024. – С. 201-205. – EDN YUXHKI.

12. Бурков, И. А. Перспективы развития рынка молочных заквасок в России / И. А. Бурков, А. Е. Рябова // Переработка молока. – 2024. – № 1(291). – С. 36-38. – DOI 10.33465/2222-5455-2024-1-36-38. – EDN VZGKAT.

13. Numerical modeling of heat and mass transfer processes in rooms with an ice rink / I. A. Burkov, M. A. Kolosov, A. A. Zharov [et al.] // AIP Conference Proceedings : International Scientific and Practical Conference "Modeling in Education 2019". – Moscow: American Institute of Physics Inc., 2019. – P. 020022. – DOI 10.1063/1.5140122. – EDN AAWDRG.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

14. Программа управления температурным логгером / И. А. Бурков, А. Е. Рябова, Н. С. Пряничникова. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667794 Российская Федерация: заявл. 09.07.2024: опубл. 30.07.2024. – EDN RYVKYH.

15. Программа управления экспериментальной установкой сублимационной сушки / И. А. Бурков, А. Е. Рябова, Н. С. Пряничникова. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662935 Российская Федерация: заявл. 29.04.2025: опубл. 23.05.2025. – EDN XTHMGQ.