

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

На правах рукописи



Камартдинова Дарья Рафаэловна

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЗАКВАСКИ МОЛОЧНОКИСЛЫХ
БАКТЕРИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗЕРНОВОГО ХЛЕБА ИЗ ПОЛБЫ**

4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Китаевская Светлана Владимировна

Екатеринбург – 2025

Оглавление

Введение.....	4
1 Обзор литературы.....	11
1.1 Роль молочнокислых бактерий в технологии хлеба	11
1.2 Биотехнологический потенциал молочнокислых бактерий	15
1.3 Цельнозерновой хлеб в рационе питания населения	25
1.4 Зерно полбы: химический состав, характеристика и перспективы применения в хлебопечении	32
Заключение по обзору литературы	40
2 Материалы и методы исследования	41
2.1 Организация работы и схема проведения эксперимента.....	41
2.2 Объекты и материалы исследования	41
2.3 Способ подготовки зерна и производство хлеба	44
2.4 Методы исследований	45
2.4.1 Методы анализа свойств молочнокислых бактерий	45
2.4.2 Методы оценки качества сырья, полуфабрикатов и готовых изделий	52
2.4.3 Математические методы обработки результатов	57
3 Анализ биотехнологических свойств молочнокислых бактерий.....	58
3.1 Изучение культурально-морфологических свойств молочнокислых бактерий	58
3.2 Изучение кислотообразующей активности молочнокислых бактерий	62
3.3 Изучение ферментативной активности молочнокислых бактерий	64
3.4 Исследование степени устойчивости молочнокислых бактерий к неблагоприятным факторам внешней среды	70
3.5 Исследование антагонистической активности молочнокислых бактерий	73
3.6 Оценка антиоксидантной активности молочнокислых бактерий	76
3.7 Анализ главных компонент биотехнологических показателей молчнокислых бактерий.....	82

4 Обоснование видового состава и соотношения молочнокислых бактерий в составе консорциума.....	85
4.1 Изучение роста молочнокислых бактерий на зерновой массе.....	85
4.2 Оценка биосовместимости штаммов молочнокислых бактерий	88
4.3 Изучение процесса ферментации диспергированной зерновой массы консорциумами молочнокислых бактерий	93
4.4 Математическая оптимизация технологических параметров и рецептурного состава зернового хлеба из полбы на заквасках	96
4.5 Исследование влияния ферментированной зерновой массы из полбы на качественные характеристики тестовых полуфабрикатов и зернового хлеба	99
5 Разработка технологии зернового хлеба из полбы на заквасках	112
5.1 Разработка рецептуры и технологии зернового хлеба.....	112
5.2 Изучение хранимоспособности ферментированной зерновой массы из полбы	116
5.3 Исследование пищевой ценности зернового хлеба из полбы на заквасках	122
5.4 Расчет экономической эффективности и конкурентоспособности зернового хлеба из полбы на заквасках.....	128
Заключение	135
Список сокращений и условных обозначений	137
Список литературы	138
Приложение А Технические условия на закваску молочнокислых бактерий для зерновых сортов хлеба	164
Приложение Б Патент на изобретение «Способ получения зернового хлеба»	165
Приложение В Нормативно-техническая документация на зерновой хлеб «Борай»	166
Приложение Г Акт производственных испытаний.....	169
Приложение Д Справка о внедрении результатов в учебный процесс	172

Введение

Актуальность темы исследования. Современные достижения в прикладной биотехнологии значительно расширили понимание функционально-технологических свойств молочнокислых бактерий (МКБ), а также области их применения в различных пищевых системах.

В настоящее время ведутся интенсивные научные исследования в области выделения и характеристики новых штаммов МКБ с промышленно значимыми свойствами: высокой жизнеспособностью и ферментативной активностью, выраженной антимикробной активностью, способностью подавлять рост плесневых грибов и патогенных бактерий. Особое значение приобретают исследования, направленные на комплексную оценку и отбор перспективных культур лактобацилл для формирования новых заквасочных составов с целью решения сложных биотехнологических задач в хлебопекарной промышленности.

Современные тенденции в хлебопечении требуют разработки новых заквасочных консорциумов, адаптированных к специфике сырья и технологическим условиям производства, способствующих снижению влияния антипитательных факторов и улучшению усвояемости аминокислот, минеральных веществ и витаминов, что приобретает особую значимость в условиях растущего спроса на продукты здорового питания с повышенной пищевой ценностью.

Перспективным и востребованным направлением развития хлебопекарной промышленности является разработка новых технологий зернового хлеба, расширение сырьевых источников, повышение качества готовой продукции. Использование различных зерновых культур в хлебопечении позволяет сохранить в хлебе биологически активные вещества зерна: лимитирующие аминокислоты, витамины, клетчатку, минеральные вещества, органические кислоты и ферменты. Зерно полбы характеризуется сбалансированным химическим составом и представляет особый интерес для производителей хлебобулочных изделий, что открывает перспективы для расширения ассортимента зернового хлеба.

Существенной проблемой при производстве зернового хлеба является снижение потребительских характеристик готовой продукции, связанное с наличием зерновых оболочек и относительно низким содержанием клейковины в тесте, что обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования технологических процессов, главным образом путем разработки и применения высокоэффективных заквасок молочнокислых бактерий.

Степень разработанности темы. Значительный научно-практический вклад в развитие и совершенствование технологических этапов производства продуктов питания с использованием молочнокислых бактерий внесли отечественные и зарубежные авторы Г. С. Волкова, А. В. Бегунова, А. Л. Брюханов, А. С. Дерунец, Г. Н. Дудикова, А. Н. Иркитова, Е. В. Никитина, Е. Д. Рожнов, Е. М. Серба, Ю. В. Соловьева, Л. Г. Стоянова, М. Н. Школьникова, N. O. Arcanjo, A. Corsetti, M. Gobbetti, K. Katina, L. Sun, T. Zotta и др.

Теоретические и научно-практические основы совершенствования технологии зернового хлеба изложены в трудах Н. Н. Алехиной, И. А. Баженовой, Т. Г. Богатыревой, Л. Г. Ермош, С. Я. Корячкиной, Е. А. Кузнецовой, Л. И. Кузнецовой, Н. В. Лабутиной, И. В. Матвеевой, В. А. Помозовой, Е. И. Пономаревой, И. Ю. Потороко, О. А. Савкиной, Е. В. Хмелевой, О. В. Чугуновой, М. А. Яновой, E. Escarnot, E. Marconi, M. Mencin, H. Zielinski и др.

Таким образом, исследование и создание эффективного состава консорциума молочнокислых бактерий для хлебопекарной промышленности представляет собой актуальное и перспективное направление, ориентированное на комплексное решение задач повышения качества и безопасности зернового хлеба, импортозамещения зарубежных заквасок и создания инновационных продуктов повышенной пищевой ценности.

Цель диссертационной работы – обоснование и создание закваски молочнокислых бактерий с высокими функционально-технологическими свойствами для производства зернового хлеба из полбы.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие **задачи**:

- 1) изучить функционально-технологические свойства молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* – *L. fermentum* 10, *L. acidophilus* 9, *L. casei* 16, *L. casei* 32, *L. casei* МДП-1, *L. plantarum* 24, *L. plantarum* 71 и *L. plantarum* 131 – и определить перспективные штаммы для хлебопекарной промышленности;
- 2) обосновать и разработать состав консорциума молочнокислых бактерий для применения в качестве закваски в технологии зернового хлеба;
- 3) исследовать влияние ферментированной зерновой массы на формирование качественных характеристик полуфабрикатов и зернового хлеба из полбы;
- 4) определить оптимальные технологические параметры производства зернового хлеба из полбы на заквасках;
- 5) обосновать режимы хранения ферментированной зерновой массы из полбы в охлажденном и замороженном виде;
- 6) разработать техническую документацию на новый вид зернового хлеба из полбы, провести производственные испытания и рассчитать экономическую эффективность.

Научная новизна. Работа содержит элементы научной новизны в соответствии с п. 1, 14, 21 паспорта научной специальности 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ.

1. Впервые проведена комплексная характеристика перспективных штаммов молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* – *L. fermentum* 10, *L. acidophilus* 9, *L. casei* 16, *L. casei* 32, *L. casei* МДП-1, *L. plantarum* 24, *L. plantarum* 71 и *L. plantarum* 131 для производства зернового хлеба с точки зрения их антагонистической способности, кислотообразующей, ферментативной и антиоксидантной активности, устойчивости к неблагоприятным факторам среды (п. 1 паспорта научной специальности 4.3.5).

2. На основе исследования биотехнологических характеристик и математического анализа главных компонент разработан консорциум молочнокислых бактерий, характеризующийся высоким уровнем кислотообразующей, фитазной, антиоксидантной активности и предназначенный для использования в качестве за-

кваски при производстве зернового хлеба (п. 14, 21 паспорта научной специальности 4.3.5).

3. Теоретически обоснована и экспериментально доказана эффективность внедрения стадии ферментации диспергированной зерновой массы из полбы разработанным консорциумом молочнокислых бактерий при производстве зернового хлеба, что обеспечивает улучшение органолептических, физико-химических, структурно-механических свойств готовых изделий и повышает конкурентоспособность продукции (п. 1, 14 паспорта научной специальности 4.3.5).

4. Впервые выявлены закономерности изменения показателей качества зернового хлеба из полбы в зависимости от дозировки ферментированной зерновой массы и продолжительности процесса ферментации, что позволяет оптимизировать технологический процесс, повысить потребительские характеристики и микробиологическую чистоту зернового хлеба из полбы (п. 14 паспорта научной специальности 4.3.5).

Новизна технических решений подтверждена патентом РФ «Способ производства зернового хлеба» (№ 2829513).

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении научных знаний в области создания консорциумов микроорганизмов для пищевой промышленности, получении новых данных по оценке качества и эффективности применения зерна полбы в хлебопечении, углублении базы знаний о применении заквасок молочнокислых бактерий в практике производства зернового хлеба.

Практическая значимость. На основе проведенных исследований создана закваска молочнокислых бактерий, обладающая значительным потенциалом для импортозамещения в хлебопекарной промышленности. Внедрение данной закваски позволяет получить хлебопекарную продукцию с высокими потребительскими характеристиками, расширить ассортимент зернового хлеба, увеличить конкурентоспособность продукции.

Разработаны рекомендации по хранению ферментированной зерновой массы из полбы, сроки хранения составляют 5 и 21 сут при температуре $(2 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и минус $18\text{--}20 ^\circ\text{C}$ соответственно.

Разработаны и утверждены технические условия на закваску молочнокислых бактерий для зерновых сортов хлеба (ТУ 10.89.19.300-002-02069639-2025).

Разработана и утверждена техническая документация: технические условия, технологическая инструкция и рецептура на новый вид зернового хлеба из полбы «Борай» (ТУ 10.71.11-002-2005989134-2024).

Практическая значимость работы подтверждена результатами промышленной апробации в условиях пекарни малой мощности (ИП Рамеев Р. Р., г. Набережные Челны, Республика Татарстан), которые показали ее эффективность за счет получения зернового хлеба высокого качества.

Материалы диссертации используются в образовательном процессе кафедры технологии пищевых производств ФГБОУ ВО «КНИТУ» при подготовке студентов по направлениям 19.03.02, 19.04.02 «Продукты питания из растительного сырья» и 19.03.04, 19.04.04 «Технология и организация продукции общественного питания».

Методология и методы исследования. Методологической основой исследований явились труды российских и зарубежных ученых, направленные на анализ биотехнологического потенциала молочнокислых бактерий, создание консорциума молочнокислых бактерий, изучение химического состава и пищевой ценности зерна полбы. Для решения поставленных задач применяли современные общепринятые и специальные методы исследования молочнокислых бактерий, сырья, полуфабрикатов и хлебобулочных изделий. Исследования проводились в 3–5-кратной повторности.

Основные исследования выполнены на кафедре технологии пищевых производств ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Положения, выносимые на защиту:

– результаты оценки функционально-технологических свойств молочнокислых бактерий с целью выявления перспективных штаммов для применения в хлебопекарной промышленности;

- состав консорциума молочнокислых бактерий и его влияние на процесс ферментации диспергированной зерновой массы из полбы;
- математическая модель и ее практическая реализация для определения оптимальных технологических параметров и рецептурного состава зернового хлеба из полбы;
- обоснование внедрения стадии молочнокислой ферментации при производстве зернового хлеба из полбы;
- результаты оценки показателей качества зернового хлеба из полбы, выработанного с использованием предлагаемой закваски молочнокислых бактерий.

Достоверность результатов исследования подтверждается проведением экспериментов в многократной повторности с применением стандартных и специальных методов исследования, статистической обработкой результатов эксперимента с использованием компьютерных программ Microsoft Excel, Statistica 12 (Statsoft), GraphPad Prism8, программного обеспечения Origin, согласованностью результатов исследований с теоретическими данными, апробацией полученных результатов в промышленности и опубликованием основных положений работы в научных изданиях.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих научно-практических мероприятиях: Международная научная конференция «Современные проблемы пищевой безопасности» (Санкт-Петербург, 2020); Всероссийская научная интернет-конференция «Интеграция науки и высшего образования в области био- и органической химии и биотехнологии (Уфа, 2020); Международная научно-техническая конференция «Наука, образование и инновации для АПК: состояние, проблемы и перспективы» (Майкоп, 2020); Всероссийская научно-практическая конференция «Горизонты биотехнологии» (Орел, 2021); Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Фундаментальные аспекты и практические вопросы современной микробиологии и биотехнологии» (Ульяновск, 2022); IV Международный биотехнологический форум «BIOAsia-Altai 2024» (Барнаул, 2024); Всероссийская кон-

ференция молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Пищевые технологии и биотехнологии» (Казань, 2021, 2023, 2025).

Личное участие автора заключается в теоретическом обосновании актуальности исследования, формулировании цели и постановке задач, планировании и проведении экспериментов, обработке полученных данных, формулировании выводов, подготовке научных публикаций, представлении результатов работы на конференциях.

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 17 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России; 1 статья в издании, входящем международные реферативные базы данных и системы цитирования; получен 1 патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Работа изложена на 172 страницах и содержит 51 таблицу и 28 рисунков. Список литературы включает 229 наименований, в том числе 116 иностранных источников.

Благодарности. Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору О. А. Решетник за внимательное отношение к работе, ценные консультации и поддержку на всех этапах исследования; сотрудникам Казанского федерального университета за помощь в проведении экспериментальных исследований для определения микроструктуры полуфабрикатов и хлеба.

1 Обзор литературы

1.1 Роль молочнокислых бактерий в технологии хлеба

Важным аспектом в производстве хлебобулочных изделий является жизнедеятельность микрофлоры муки и тестовых полуфабрикатов: активность хлебопекарных дрожжей и молочнокислых бактерий, обеспечивающих разрыхление теста, повышение кислотности полуфабрикатов, накопление в тесте веществ, участвующих в формировании вкуса и аромата готовых изделий [25; 112].

На всех стадиях производства хлеба протекают микробиологические и биохимические процессы, которые составляют биотехнологическую основу хлебопекарного производства.

Молочнокислые бактерии – это группа микроорганизмов, которые сбраживают углеводы с образованием молочной кислоты как одного из основных продуктов. Лактобациллы имеют сферическую (*Streptococcaceae*) и палочкообразную форму (*Lactobacillaceae*). Молочнокислые бактерии, относящиеся к данным семействам, являются грамположительными и не образуют спор [112]. Отмечается, что большинство бактерий рода *Lactobacillaceae* неподвижны. Подвижность наблюдается только у представителей некоторых видов, обладающих перитрихиальными жгутиками: *L. agilis*, *L. aquaticus*, *L. capillatus*, *L. ghanensis*, *L. mali*, *L. nagelii*, *L. oeni*, *L. ruminis*, *L. satsumensis*, *L. sucicola*, *L. uvarum*, *L. vini* [112].

Оптимальная температура культивирования молочнокислых бактерий зависит от их вида. Однако отмечается, что практически все лактобациллы являются мезофилами и проявляют максимальную активность при температуре 30–40 °C [25; 49; 112].

Поскольку молочнокислые бактерии являются факультативными анаэробами, большинство штаммов демонстрируют аэротолератность. Поэтому опти-

мально проводить культивирование в анаэробных условиях или при низком содержании кислорода [112].

Важная особенность молочнокислых бактерий – устойчивость к кислотам и спиртам. Отмечается, что наиболее благоприятными условиями для роста лактобацилл выступают среды со значением pH в диапазоне от 5,4 до 6,4 или содержащие этиловый спирт в концентрации от 18 % до 24 % [112].

В зависимости от продуктов метаболизма молочнокислые бактерии делят на две группы: гомоферментативные и гетероферментативные. В результате гомоферментативного молочнокислого брожения образуются молочная кислота и незначительная часть летучих кислот, этанола и диоксида углерода, которые также характеризуют антибактериальную и антимикробную активность бактерий [112]. При гетероферментативном молочнокислом брожении наряду с молочной кислотой образуются этанол, уксусная кислота, диоксид углерода и другие продукты. Гетероферментативное молочнокислое брожение протекает как с выделением диоксида углерода, так и без него [112].

Лактобациллы широко применяются в пищевой промышленности при производстве ферментированных продуктов питания: молочных продуктов, хлебобулочных изделий, мясопродуктов и квашеных овощей. Молочнокислые бактерии оказывают влияние на органолептические, физико-химические и биотехнологические характеристики готовых изделий, повышают пищевую ценность [3; 25; 49; 112]. Продуцирование органических кислот и перекисей лактобациллами обеспечивает подавление роста патогенных и нежелательных микроорганизмов, что способствует увеличению сроков хранения и предотвращению порчи продуктов питания [29; 48; 52; 96].

В процессе производства хлеба в тестовых полуфабрикатах протекает молочнокислое брожение, вызываемое молочнокислыми бактериями. В результате наблюдается повышение кислотности теста, способствующее набуханию и пептонизации белков муки, повышению вязкости и газоудерживающей способности теста [26].

Молочнокислые бактерии продуцируют молочную кислоту, летучие кислоты, ароматические соединения, которые оказывают воздействие на вкус и аромат хлебобулочных изделий. Помимо этого, кислоты влияют на состояние и структуру белков в тесте, способствуют их пептизации и набуханию, увеличивают гидрофильность, а также влияют на активность ферментов [26].

В процессе развития молочнокислые бактерии продуцируют гомо- и гетерополисахариды, которые положительно влияют на реологию теста, удельный объем хлеба, структуру мякиша и препятствуют черствению изделий [29].

Метаболиты дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, включая витамины (пантотеновая кислота, рибофлавин) и аминокислоты, положительно влияют на рост лактобацилл [77].

С целью улучшения хлебопекарных свойств основного и дополнительного сырья, улучшения качества и обеспечения микробиологической чистоты тестовых полуфабрикатов и готовых изделий в технологии хлеба применяют закваски, в состав которых входят разные виды и штаммы молочнокислых бактерий.

Термофильные молочнокислые бактерии *Lactobacillus delbrueckii* используются для приготовления мучной осахаренной заварки, которая является питательной средой для дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Высокая протеолитическая активность термофильных лактобацилл способствует образованию свободных аминокислот в заварке и улучшает ее питательные свойства. Дрожжи в дальнейшем применяются в технологии хлеба из пшеничной муки и смеси ржаной и пшеничной муки, в качестве биологического разрыхлителя. Также важно отметить, что в заквашенной заварке образуется молочная кислота (1–1,3 %), которая подавляет развитие посторонней микрофлоры [13].

В пшеничных заквасках наиболее часто применяются бактерии рода *Lactobacillus* – *L. casei*, *L. brevis*, *L. fermentum*, *L. plantarum*, *L. delbrueckii*, *L. leichmanii*, а также дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*.

В хлебопекарной промышленности для оптимизации технологических свойств и улучшения качественных характеристик пшеничного теста используется широкий спектр заквасок, среди которых мезофильная, концентрированная молоч-

нокислая, комплексная, ацидофильная, дрожжевая, пропионовокислая, витаминная. Характеристика пшеничных и ржанных заквасок, применяющихся в технологии хлеба, приведена в таблице 1 [26].

Таблица 1 – Характеристика пшеничных и ржанных заквасок

Вид закваски	Состав	Оптимальная температура роста, °С	Титруемая кислотность, град
Пшеничные закваски			
Мезофильная	<i>L. fermenti</i> 27	37	15–16
Комплексная молочнокислая (КМК)	<i>L. plantarum</i> 30, <i>L. casei</i> 26, <i>L. brevis</i> 1, <i>L. fermenti</i> 34	30–37	18–24
Пропионовокислая	<i>Propionibacterium freudenreichii</i> ssp. <i>shermanii</i> (BKM 103)	30–37	12–14
Комплексная	<i>L. casei</i> C1, <i>L. brevis</i> B78, <i>L. fermenti</i> 34, ssp. <i>shermanii</i> (BKM 103), <i>Propionibacterium freudenreichii</i> , <i>S. cerevisiae</i> (0,5:0,25:0,25:0,02:1)	30–37	8–12
Ацидофильная	<i>L. acidophilus</i> 146, дрожжи «Рязанские – 17»	40–45	9–12
Мезофильная дрожжевая	<i>L. casei</i> C1, <i>L. plantarum</i> A63, дрожжи «ФР-3»	25–28	10–12
Ржанные закваски			
Ржаная закваска спонтанного брожения	Дрожжи прессованные хлебопекарные, мука ржаная обойная	28–29	11–14
Густая закваска	<i>L. plantarum</i> 63, <i>L. brevis</i> 5, <i>L. brevis</i> 78, <i>S. minor</i> «Чернореченский»	30–37	11–16
Жидкая закваска без заварки	<i>L. plantarum</i> 30, <i>L. casei</i> 26, <i>L. brevis</i> 1, <i>L. fermenti</i> 34, <i>S. cerevisiae</i> Л-1, <i>S. minor</i> «Чернореченский»	30–37	9–13
Жидкая закваска с заваркой	<i>L. plantarum</i> 30, <i>L. casei</i> 26, <i>L. brevis</i> 1, <i>L. fermenti</i> 34, <i>S. cerevisiae</i> Л-1	30–37	9–12
Концентрированная бездрожжевая молочнокислая (КМКЗ)	<i>L. plantarum</i> 30, <i>L. casei</i> 26, <i>L. brevis</i> 1, <i>L. fermenti</i> 34	30–37	18–22

Ржаной хлеб характеризуется липким, влажным и заминающимся мякишем за счет содержания в муке активного фермента α -амилазы, который ускоряет процесс гидролиза крахмала до декстринов. В связи с этим отмечается, что для получения ржаного хлеба хорошего качества необходима высокая кислотность, которая

повышается за счет жизнедеятельности молочнокислых бактерий и способствует набуханию и пептизации белков ржаной муки. В результате увеличивается вязкость и газодерживающая способность теста [26].

Использование в заквасках молочнокислых бактерий позволяет увеличить сроки хранения хлеба. Исследования показывают, что лактобациллы проявляют ингибирующую активность в отношении разных видов плесневых грибов, которые служат причинами развития болезней хлеба (*Fusarium culmorum*, *F. graminearum*, *F. proliferatum*, *Aspergillus niger* и *Penicillium expansum*) [211].

В настоящее время разработаны способы производства хлеба, которые характеризуются приготовлением закваски с добавлением смеси молочнокислых бактерий, позволяющие улучшить физико-химические и органолептические показатели тестовых полуфабрикатов и готовых изделий [67; 68].

Таким образом, применение молочнокислых бактерий является перспективным направлением совершенствования технологии хлеба и хлебобулочных изделий, позволяющим корректировать технологический процесс производства и улучшать физико-химические, реологические, органолептические и микробиологические показатели хлеба. В литературе [73; 144] имеются данные, что применение молочнокислых бактерий в производстве хлеба способствует гидролизу фитиновой кислоты, что повышает биодоступность минеральных веществ в хлебе и улучшает их усвоение организмом человека.

1.2 Биотехнологический потенциал молочнокислых бактерий

Научные исследования подтверждают наличие у молочнокислых бактерий биотехнологического потенциала, позволяющего создавать продукты питания с лечебно-профилактическими и специализированными свойствами. Это обусловлено способностью лактобацилл продуцировать биологически активные вещества, улуч-

шать усвоение питательных компонентов, подавлять рост патогенной микрофлоры или повышать общую биологическую ценность пищевых продуктов питания. В настоящее время применение молочнокислых бактерий является перспективным направлением для разработки функциональных продуктов питания.

Результаты исследований, представленные в статьях российских и зарубежных ученых, свидетельствуют о выраженной способности лактобацилл проявлять антагонистическую активность в отношении патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, а также демонстрировать устойчивость к неблагоприятным факторам среды, которые возникают при производстве бактериальных препаратов [62; 83; 96]. В работах [83; 96] отмечается, что молочнокислые бактерии *Streptococcus thermophilus* и *Lactococcus lactis* обладают антимикробной активностью, благодаря чему они способны подавлять рост *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, однако они не обладают подобным эффектом в отношении грибов рода *Candida*. Результаты исследования антагонистической активности молочнокислых бактерий по отношению к различным штаммам бактериальных тест-культур показали, что многие штаммы подавляют рост бактерий рода *E. coli* [177].

В работе зарубежных ученых [208] выявлено, что 51,35 % исследуемых лактобацилл, выделенных из сырого молока, пастеризованного молока, пастеризованных сливок и масла, обладали протеолитической, липолитической и антимикробной активностью против *Listeria monocytogenes* ATCC 7644.

Оценка биотехнологического потенциала молочнокислых бактерий включает определение их устойчивости к фенолу, желчи, хлориду натрия и этанолу. Полученные данные свидетельствуют, что большинство лактобацилл способны противостоять химически агрессивным факторам среды, что расширяет спектр их потенциального применения в различных биотехнологических процессах [96].

Показан хороший рост молочнокислых бактерий при концентрации желчи от 10 % до 30 %. Лактобациллы продемонстрировали более высокую желчеустойчивость, сохраняя жизнеспособность при концентрации 50 %, в отличие от стрептококков, рост которых ограничивался концентрацией 40 % [25; 34]. Штамм *Lactobacillus sakei* LSK-103 устойчив к наличию желчи: выживаемость бактерий состав-

ляет 86,02 % и 89,25 % при содержании в питательной среде 40 % и 20 % желчи соответственно [96]. В качестве ключевых механизмов, обеспечивающих защиту молочнокислых бактерий от воздействия высоких концентраций желчи, учеными рассматриваются продуцирование экзополисахаридов, а также синтез ферментов, катализирующих гидролиз желчных кислот [96].

Активная кислотность (pH) является одним из наиболее важных параметров культивирования лактобацилл, ее изменение оказывает комплексное воздействие на метаболическую активность микроорганизмов: активность ферментов, состояние и число промежуточных продуктов биосинтеза, их диссоциацию, растворимость и другие физико-химические свойства [94; 96].

В работе И. Ю. Солохиной и И. А. Гнеушевой [91] установлено, что, наряду со способностью нормализовать функции микрофлоры кишечника, пробиотические бактерии могут оказывать антимуtagenное, гепатопротекторное, антиканцерогенное и гипохолестеринемическое действие.

Молочнокислые бактерии проявляют антиканцерогенные свойства, характеризующиеся способностью связывать токсины, продуцируемые распространенными видами плесневых грибов – *Aspergillus flavus* и *Aspergillus nomius*, которые являются потенциально канцерогенными веществами. Предполагается, что лактобациллы и лактококки потенциально могут использоваться для связывания и удаления афлатоксина АФМ1 из молока [2].

Исследования показывают, что молочные продукты, содержащие молочнокислые бактерии рода *Lactobacillus* оказывают положительное влияние на липидный обмен в организме человека, а также снижают уровень холестерина в сыворотке крови, что было подтверждено большим количеством экспериментов *in vivo* и *in vitro* [148].

Высокий уровень бифидобактерий и лактобацилл в желудочно-кишечном тракте детей снижает частоту развития аллергических заболеваний в дальнейшем [39]. Результаты клинических исследований показывают, что употребление продуктов питания, содержащих смесь лактобацилл, позволяет облегчить симптомы аллергии на куриный белок. Показано, что употребление мышами ферментирован-

ного кефира снизило уровень антиовальбуминовых IgE и IgG1 антител в сыворотке крови, в отличие от мышей, получавших воду и неферментированное молоко [173].

Будучи неотъемлемой частью микробиоты желудочно-кишечного тракта, молочнокислые бактерии играют ключевую роль в процессе метаболизма различных субстратов (биогенные амины, органические кислоты и газы) и синтезе ферментов, витаминов и антиоксидантов. Отмечается, что лактобациллы стимулируют иммунную систему на поверхности слизистой оболочки кишечника [90].

В работе [30] сделан вывод, что результаты исследований последних десятилетий указывают на то, что пробиотические бактерии характеризуются способностью активировать иммунитет, вызывая быструю реакцию на введение патогенных микроорганизмов.

Взаимодействие пробиотических бактерий с эпителиальными клетками кишечника активирует врожденный иммунитет, обеспечивающий быстрое обезвреживание патогенных микроорганизмов. Данный механизм поддерживает барьерную функцию слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта [30; 148].

Результаты исследований свидетельствуют, что введение пробиотиков может защитить организм от оксидативного стресса, оказывать влияние на продукции белков теплового шока и регуляцию апоптоза [30].

Многие виды молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* традиционно классифицируются как аэротолерантные анаэробные микроорганизмы, способные утилизировать кислород в качестве субстрата в реакциях, катализируемых флавиновыми оксидазами, а некоторые из них могут синтезировать минимальную дыхательную электронно-транспортную цепь [225]. Также отмечается, что к аэробному дыхательному росту хорошо приспособлены различные штаммы видов *L. casei*, *Lactiplantibacillus plantarum* и *Latilactobacillus sakei* [227].

В настоящее время актуальным направлением исследований является разработка продуктов питания, характеризующихся антиоксидантными свойствами и способных поддерживать антиоксидантный статус организма человека. Особо важным направлением является повышение антиоксидантной активности готовых изделий за счет применения в технологии природных антиоксидантов. С этой це-

люю проводятся многочисленные исследования по определению содержания антиоксидантов в различных продуктах питания, а также изучаются антиоксидантные свойства молочнокислых бактерий [77; 113; 121; 149; 178].

Лактобациллы широко используются в качестве пробиотиков в ферментированных продуктах и напитках, так как обладают многочисленными пробиотическими свойствами, среди которых аэротолерантность клеток и способность улучшать антиоксидантный статус организма-хозяина [166; 189].

Отмечается, что биотехнологические процессы с участием молочнокислых бактерий могут приводить к изменению оптимальных условий для их существования. Это проявляется в преобразовании физико-химических параметров, накоплении продуктов биосинтеза, которые замедляют активность клеток и вводят их в состояние стресса [16; 25].

Пробиотические молочнокислые бактерии, обладающие антиоксидантной активностью, способны снижать последствия окислительного стресса и могут выполнять защитную роль в организме человека. Штаммы, отличающиеся высокой антиоксидантной активностью, могут применяться в медицине, ветеринарии, а также пищевой промышленности [25].

В процессе ферментации молочнокислые бактерии подвергаются действию аэробных условий, в результате чего образуются токсичные для клетки вещества: активные формы кислорода (АФК), пероксид водорода [25]. Для удаления кислородных радикалов микроорганизмы используют защитные механизмы, которые могут зависеть как от ферментов (супероксиддисмутаза (СОД), каталаза, NADH-оксидаза, NADH-пероксидаза)), так и от неферментных агентов (Mn^{2+} , аскорбат, токоферолы, глутатион) [166].

Следует отметить, что реакция лактобацилл на АФК зависит от конкретного штамма и проявляется в экспрессии генов, регулирующих клеточный метаболизм, ответе на окислительный стресс и формировании клеточной стенки и других процессах [180]. Отмечается, что молочнокислые бактерии родов *Lactobacillus* и *Lactococcus* обладают разными антиоксидантными свойствами. Они различаются по внутриклеточному содержанию ферментов СОД и глутатиона, обладают разной

способностью к нейтрализации свободных радикалов, а также ингибированию окисления аскорбиновой и линолевой кислот [119; 129].

Штаммы *Limosilactobacillus fermentum*, *Lactocaseibacillus paracasei* и *Lactocaseibacillus rhamnosus* отличаются высокой устойчивостью к окислительному стрессу, так как обладают наибольшей антиоксидантной активностью [133]. Штаммы *Lactobacillus acidophilus* и *Levilactobacillus brevis* характеризуются значительным антиоксидантным потенциалом в качестве пробиотических культур [119].

Наиболее распространенным ферментативным механизмом является система NADH-оксидаза/NADH-пероксидаза. NADH-пероксидазы (Npr) участвуют в реакции распада пероксида водорода, поэтому наличие данного фермента у штаммов *L. casei* играет важную роль в механизме устойчивости штамма к окислительному стрессу [16; 186].

Усиление антиоксидантных свойств молочнокислых бактерий (например, за счет присутствия высокоактивных ферментов окислительного стресса), в том числе с помощью генной инженерии, представляет собой высокоэффективный подход к повышению жизнеспособности лактобацилл в условиях окружающей среды [166].

По доступным данным гены гем-зависимой каталазы присутствуют в следующих штаммах: *L. brevis*, *L. plantarum*, *L. sakei*, *L. casei* N87, а также два штамма *L. zeae* (содержат как Fe-, так и Mn-зависимые каталазы) [25]. Синтез супероксид-дисмутазы в геноме молочнокислых бактерий встречается редко и отмечается в штаммах *L. casei*, *L. paracasei* и *L. sakei* [25].

Исследования зарубежных ученых [227] демонстрируют ключевую роль глутатиона в адаптации лактобацилл к различным видам стресса, включая окислительный, кислотный и осмотический. Глутатион, присутствующий во многих клетках молочнокислых бактерий, участвует в сохранении структуры клеточной мембраны и регулирует антиоксидантный потенциал. Штаммы *L. brevis*, *L. buchneri*, *L. parabuchneri*, *L. plantarum* и *L. casei* способны получать глутатион из окружающей среды и применять его для нейтрализации негативного действия H_2O_2 . Виды, которые не содержат и не способны транспортировать глутатион, такие как *L. delbrueckii*, *L. reuteri*, наиболее подвержены негативному стрессовому воздействию [227].

Отмечается, что молочнокислые бактерии, выделенные из организма человека (*L. acidophilus*, *L. johnsonii*, *L. brevis*), проявляют активность глутатионпероксидазы, устойчивость к перекиси водорода и подавляют процесс перекисного окисления липидов [117; 168; 223].

Также в антиоксидантной защите участвуют предшественники глутатиона - цистеин и γ -глутамилцистеин [224].

Условия культивирования микроорганизмов оказывают влияние на рост и выживание молочнокислых бактерий при оксидативном стрессе. Например, некоторые лактобациллы – *L. casei*, *L. plantarum* – лучше справляются с оксидативным стрессом при наличии в питательной среде ненасыщенных жирных кислот L-аспарагина, L-пролина и L-серина [229].

Эксперименты по изучению штаммов молочнокислых бактерий *L. plantarum*, *Lactiplantibacillus paraplantarum*, *Lactiplantibacillus pentosus* и *L. casei* показали, что культивирование с аэрацией увеличивало выход биомассы в стационарной фазе роста, особенно если в среду культивирования добавляли хлорид железа или витамин K₂ для обеспечения формирования дыхательной электронно-транспортной цепи, что повышало устойчивость клеток к окислительному и перекисному стрессу [153; 175; 219].

На устойчивость к оксидативному стрессу также влияет способ ферментации. В работе [228] отмечается, что при культивировании штамма *L. plantarum* C17 в трех режимах (непрерывном, с подпиткой, периодическом) при воздействии H₂O₂ устойчивость к оксидативному стрессу выше у культуры, выращиваемой в режиме ферментации с подпиткой и в режиме непрерывной ферментации с наименьшей скоростью разбавления.

В работе [91] отмечается, что образцы штаммов молочнокислых бактерий *L. plantarum*, *L. paracasei*, *L. acidophilus* обладают высоким уровнем общей антиоксидантной активности через 24 и 48 ч культивирования.

Изучение антиоксидантной активности ряда лактобацилл показали, что клеточный лизат проявляет бóльшую активность в сравнении с интактными клетками [40; 41; 42].

В работе [135] проведен эксперимент *in vitro* с использованием животных клеток, который позволяет выявить антиоксидантные свойства молочнокислых бактерий и их влияние на живые организмы. Отмечается, что введение суспензии *Lactobacillus delbrueckii* ATCC7830 в среду с животными клетками ингибирует повреждающее действие H_2O_2 , клетки сохраняют жизнеспособность в сравнении с контролем, который не содержит лактобациллы.

В соответствии с классификацией (таблица 2) молочнокислые бактерии можно разделить на группы по способности восстанавливать кислород в зависимости от наличия генов *cudABCD*, которые кодируют синтез цитохром-bd-оксидазного комплекса [190]. Лактобациллы, которые не имеют генов *cud*, не способны к внутриклеточному восстановлению кислорода. Отмечается, что по содержанию ферментов восстановления кислорода близкородственные виды молочнокислых бактерий не обязательно относятся к одной категории.

Таблица 2 – Примеры молочнокислых бактерий, классифицированных по способности восстанавливать кислород

Путь восстановления кислорода	<i>Streptococcaceae</i>	<i>Lactobacillus</i>
Восстановление кислорода в присутствии экзогенного гема	<i>L. lactis</i> , <i>L. garviae</i>	—
Восстановление кислорода в присутствии экзогенного гема и витамина K ₂	—	<i>L. antri</i> , <i>L. brevis</i> , <i>L. buchneri</i> , <i>L. casei</i> , <i>L. coryniformis</i> , <i>L. crispatus</i> , <i>L. fermentum</i> , <i>L. gasseri</i> , <i>L. hilgardii</i> , <i>L. johnsonii</i> , <i>L. oris</i> , <i>L. paracasei</i> , <i>L. plantarum</i> , <i>L. reuteri</i> , <i>L. rhamnosus</i> , <i>L. salivarius</i> , <i>L. ultunensis</i> , <i>L. vaginalis</i>
Отсутствие внутриклеточного восстановления кислорода	—	<i>L. acidophilus</i> , <i>L. iners</i> , <i>L. sakei</i> , <i>L. delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i>

Молочнокислые бактерии, которые не обладают способностью синтезировать соединения, обеспечивающие восстановление кислорода, активируют данный процесс с помощью экзогенного гема или менахинона [176; 190]. В результате происходит утилизация кислорода и уменьшается его негативное действие, нормализуется углеродный и энергетический обмен, поддерживается оптимальный окисли-

тельно-восстановительный баланс, улучшается рост и аэротолерантность ряда лактобацилл [207].

Активные формы кислорода оказывают влияние на клетки и вступают в реакции с белками, липидами и нуклеиновыми кислотами, полифенолами, аскорбатом и катехоламинами. Воздействие пероксида водорода инактивирует действие ряда ферментов, стимулирует окисление органических соединений, а также может приводить к разрыву цепей ДНК и РНК [120; 162].

Супероксиддисмутаза представляет собой металлофермент, катализирующий реакцию расщепления супероксидного анион-радикала до перекиси водорода и молекулярного кислорода [166]. Известны четыре вида данных ферментов, которые различаются по типу металла, входящего в состав активного центра: железосодержащие (Fe-СОД), марганецсодержащие (Mn-СОД), медь/цинксодержащие (Cu/Zn-СОД), никельсодержащие (Ni-СОД).

Отмечается, что Mn-содержащая СОД обеспечивает дополнительную защиту от оксидативного стресса и повышает устойчивость молочнокислых бактерий к действию пероксида водорода [180].

Фермент каталаза вносит значительный вклад в уменьшение отрицательного воздействия перекисного стресса путем разложения пероксида водорода на воду и кислород. Существует два типа каталаз: гем-зависимые каталазы (истинные), широко распространенные у многих видов молочнокислых бактерий, однако проявляющие активность исключительно при наличии гема или гематина в питательной среде, а также Mn-содержащие (псевдокаталазы), редко встречающиеся у лактобацилл и не нуждающиеся в наличии гема или гематина для своей активности [151]. Наличие каталазы является преимуществом для создания стартовых культур, используемых в пищевой промышленности [227].

Фермент тиоредоксинредуктаза участвует в процессе окисления тиоредоксина (TRX) с использованием НАДФН. Тиоредоксин играет центральную роль в восстановительных процессах, способствует антиоксидантной защите клеток, восстановлению белков и биосинтезу нуклеиновых кислот [160; 178].

Установлено, что марганец также выступает в качестве антиоксиданта в клетках молочнокислых бактерий. Предполагается, что защита от токсического воздействия O_2 связана с активным накоплением $Mn(II)$ в клетках. Представители группы *L. casei*, *L. paracasei* способны к внутриклеточному накоплению марганца, который эффективно устраняет супероксидные анионы во время аэробного роста [203].

В работе [166] отмечается, что употребление продуктов питания, которые содержат антиоксидантные добавки, может снизить уровень АФК в тканях и значительно снизить риск окислительного повреждения у людей и животных. Наиболее известными антиоксидантами являются аскорбиновая кислота (витамин С), токоферол (витамин Е), β -каротин (провитамин А), холекальциферол (витамин D_3), коэнзим Q_{10} и каротиноидный пигмент ликопин. К природным антиоксидантам также относятся полифенолы: флавины и флавоноиды, танины, антоцианы, линолевая кислота и белковые фракции.

Молочнокислые бактерии доставляют ферменты антиоксидантной защиты в желудочно-кишечный тракт для предотвращения и (или) лечения различных патологических воспалительных процессов [171].

В настоящее время в работах зарубежных ученых доказано, что клетки многих лактобацилл обладают антиканцерогенными, антимикробными, иммуномодулирующими и антиоксидантными свойствами [132; 147; 154; 175; 181; 221].

Биотехнологический потенциал молочнокислых бактерий играет важную роль для развития инновационных технологий в пищевой промышленности, медицине и других областях. Их способность синтезировать биологически активные вещества и улучшать качество продуктов питания делает лактобациллы ценным ресурсом для создания функциональных продуктов питания и пробиотических препаратов.

1.3 Цельнозерновой хлеб в рационе питания населения

Рацион питания оказывает влияние на здоровье, рост и развитие человека. В связи с этим важно организовать сбалансированное питание, которое будет обеспечивать потребность организма в белках, жирах, углеводах, витаминах и минеральных веществах. В настоящее время потребители все больше интересуются здоровьем, взаимосвязью между питанием и самочувствием человека.

Злаковые продукты являются основным источником углеводов, а также обогащают рацион растительными белками и жирами, витаминами и минеральными веществами. Зерна злаковых содержат в среднем 7–16 % растительных белков и 0,7–6 % жиров [18; 44; 45; 86]. Диетологи всего мира рекомендуют увеличивать употребление продуктов на основе злаков.

Потребление зерновых продуктов за счет высокого содержания в них клетчатки защищает организм человека от развития заболеваний, связанных с питанием, таких как избыточный вес и ожирение, сердечно-сосудистые заболевания, диабет II типа, онкология [45; 78; 113].

Важную роль в питании населения имеет хлеб, являющийся основным продуктом ежедневного рациона человека на протяжении всей жизни.

В настоящее время рынок хлеба представлен широким ассортиментом изделий, которые способны удовлетворять запросы разных потребителей. Однако статистика указывает на снижение потребления хлебобулочных изделий в последние годы. На рисунке 1 представлена динамика потребления хлеба на душу населения и динамика производства хлеба и хлебобулочных изделий в Российской Федерации [9; 98].

Представленные данные свидетельствуют, что в настоящее время наблюдается снижение спроса потребителей на хлебобулочные изделия. Также наблюдается снижение объемов производства хлеба и хлебобулочных изделий, которое предположительно обуславливается ростом доходов населения и корректировкой рациона в пользу потребления мяса, рыбы, овощей и фруктов.

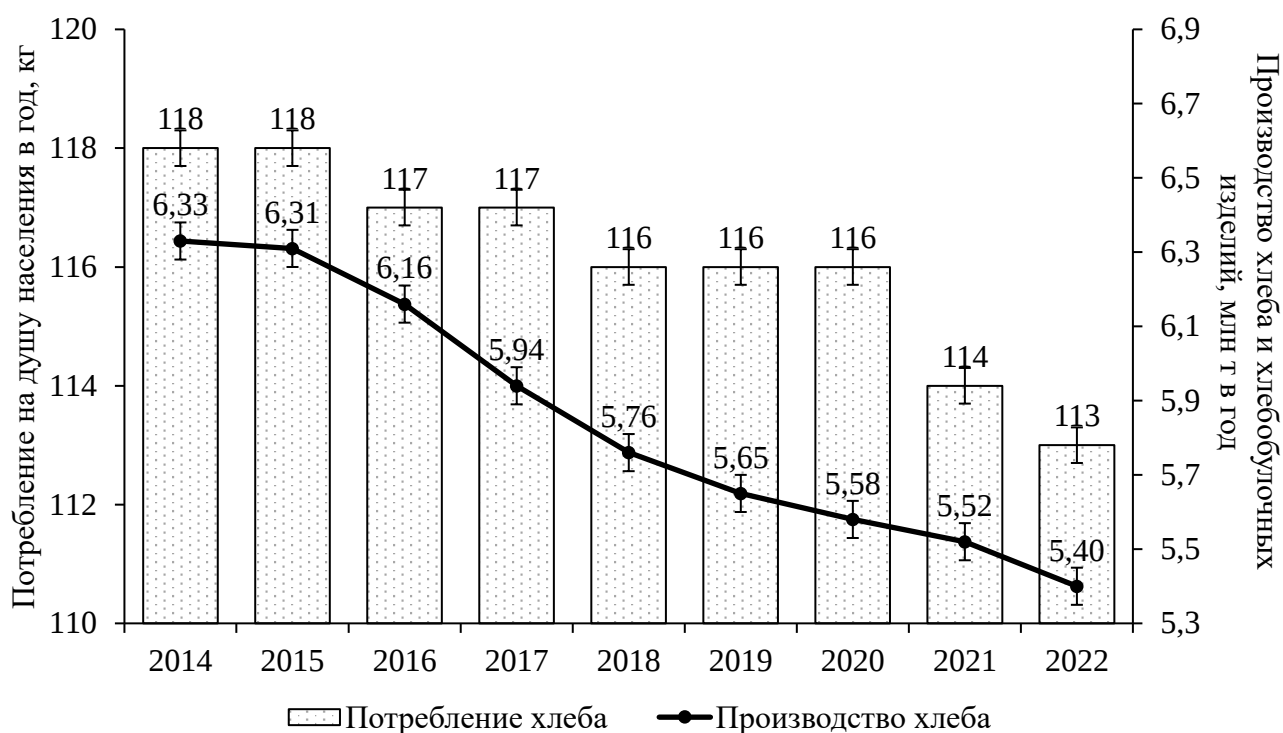


Рисунок 1 – Изменение уровней временных рядов производства и потребления хлебобулочных изделий в Российской Федерации за период с 2014 по 2022 г.

Анализ ассортимента хлеба и хлебобулочных изделий, реализуемых торговыми предприятиями в Казани и Республике Татарстан в 2024 г., представлен на рисунке 2. Представленные данные свидетельствуют, что в настоящее время перечень предлагаемой продукции очень разнообразен. Основную долю рынка занимает хлеб, выработанный из смеси пшеничной и ржаной муки, что составляет 33,78 % от общего объема реализуемых изделий.

Предпочтения потребителей в настоящее время направлены на введение в рацион продуктов питания с высоким содержанием полезных микроэлементов, обогащенных биоактивными добавками, способствующими лечению и (или) профилактике ряда заболеваний [9]. Производство хлеба из целого зерна позволяет удовлетворить запрос потребителей на введение в ежедневный рацион продуктов, отличающихся высокой пищевой и физиологической ценностью.

Перспективным направлением производства хлебобулочных изделий является выработка хлеба из целого зерна, содержащего все его морфологические части, так как ценные минеральные вещества в основном сконцентрированы в оболочке, алейроновом слое и зародыше зерна.

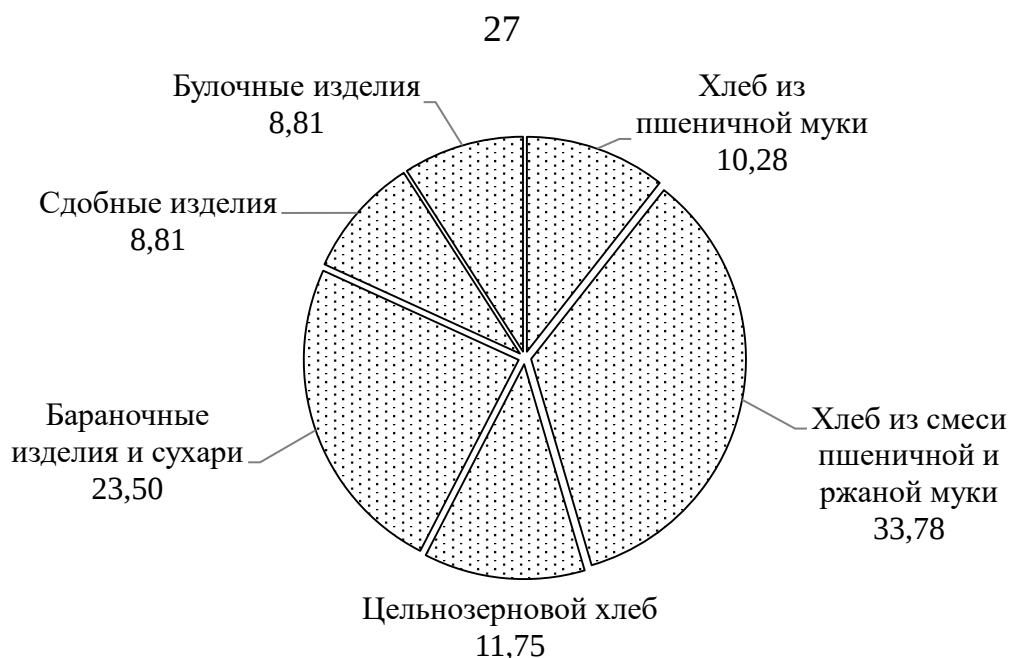


Рисунок 2 – Ассортимент хлеба и хлебобулочных изделий, реализуемых торговыми предприятиями Республики Татарстан в 2024 г.

Важно отметить, что переработка зерна в муку сопровождается потерями микронутриентов, которые содержатся в его оболочке [77]. В настоящее время ассортимент цельнозернового хлеба составляет 11,75 % от общего объема реализуемой продукции.

Функциональные продукты питания, выработанные из зерна, а также дополнительно обогащенные про- и пребиотиками, витаминами, минеральными веществами, аминокислотами, полиненасыщенными жирными кислотами, имеют популярность среди потребителей [84].

В настоящее время зарегистрировано большое количество патентов на способ производства зернового хлеба. Рассмотрены вопросы подбора оптимальных параметров подготовки зерна, влияния способов измельчения зерна на технологию зернового хлеба, корректировки рецептурного состава изделий, а также выбора рациональных режимов расстойки и выпечки зернового хлеба [68; 69; 73; 74; 75].

Зерновой хлеб является источником биологически активных веществ, таких как лимитирующие аминокислоты, витамины, минеральные вещества [3; 54; 80].

Основные стадии технологического процесса производства зернового хлеба: шелушение, мойка и дезинфекция зерен, замачивание, измельчение в диспергаторе,

внесение рецептурных компонентов и замешивание теста, брожение тестового полуфабриката, формование изделий, расстойка и выпечка зернового хлеба [88].

Важной технологической стадией производства зернового хлеба является замачивание зерна в воде в течение 10–24 ч. Поглощение зерном воды и его последующее набухание приводят к размягчению оболочек и гидролизу веществ, содержащихся в зерне. Так, в процессе биоактивации зерна под действием ферментов, содержащихся в его составе, белки распадаются на аминокислоты, крахмал – на декстрины и мальтозу, а жиры – на глицерин и жирные кислоты [3; 80; 104].

Разрушение стенки клеток эндосперма происходит под воздействием цитолитического комплекса ферментов, состоящего из целлюлозы, гемицеллюлозы и ксиланазы. Это делает стенки клеток более доступными для воздействия других ферментов. Расщепление крахмала до низкомолекулярных соединений происходит под воздействием амилолитических ферментов (амилазы и глюкоамилазы) и приводит к образованию большого количества сахаров, которые участвуют в процессе дыхания клетки и используются в строении новых тканей [58; 80].

В процессе проращивания зерна повышается активность протеолитических ферментов, под воздействием которых белковые вещества расщепляются до пептидов и аминокислот [86].

Биоактивация зерна повышает активность фермента фитазы, который участвует в гидролизе фитина до неорганических фосфатов с образованием ионов магния, фосфора, кальция и железа [86; 99; 190]. В результате повышается биодоступность минеральных веществ зерна и улучшается их усвоение организмом человека.

Таким образом, в процессе набухания зерна активизируются биохимические процессы, которые способствуют биотрансформации высокомолекулярных веществ до низкомолекулярных соединений.

Важно отметить, что процесс замачивания зерна в воде протекает в условиях, благоприятных для роста и развития посторонней микрофлоры зерна. На поверхности зерна могут присутствовать и развиваться микроорганизмы *Bacillus subtilis*, *Bacillus proteus*, *Aspergillus niger*, а также обнаруживаются представители родов *Erwinea*, *Pseudomonas*, *Penicillium* и др. В связи с этим при подготовке зерна при-

меняются различные методы дезинфекции, которые обеспечивают снижение общего количества микроорганизмов.

В данном направлении проводятся многочисленные исследования следующими авторами: Н. Н. Алехина, С. Я. Корячкина, Е. И. Пономарева, Е. В. Хмелева, О. А. Савкина, Л. И. Кузнецова и др.

С целью дезинфекции зерна применяются физические и химические методы, а также вводится натуральное сырье, обладающее антисептическими свойствами в отношении роста и развития патогенной микрофлоры [71; 76; 79; 104; 107].

Действие химических препаратов, обладающих ярковыраженным антисептическим действием, может оказывать негативное воздействие на технологические свойства сырья и качество готового продукта. Например, применение пиросульфита натрия при длительном замачивании зерна в присутствии ферментных препаратов целлюлолитического действия приводит к ухудшению свойств клейковины зерна [47].

В работе Е. В. Хмелевой [104] предлагается способ подготовки зерна, заключающийся в его замачивании в растворе хлорида натрия. Установлено, что замачивание зерна в растворах хлорида натрия в концентрации 1,5 % и 2 % в сравнении с замачиванием в воде способствует снижению развития посторонних микроорганизмов: количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) – на 42–63 %, плесневых грибов – на 60–67 %, дрожжей – до 56 %.

Учеными Воронежского государственного университета инженерных технологий разработан способ приготовления зернового хлеба повышенной безопасности, основанный на выдерживании зерна в отваре шишек хмеля и введении хмелевой композиции [79]. Применение продуктов переработки хмеля препятствует развитию грамотрицательных бактерий, например рода *Enterobacter*, и способствует развитию грамположительных молочнокислых бактерий, которые играют важную роль в технологии производства зернового хлеба.

Отмечается, что применение отвара или пюре плодов и ягод (например, рябины обыкновенной, облепихи, калины, отвара черноплодной рябины и пасты чес-

нока), содержащих вещества, обладающие выраженным фитонцидным и бактерицидным действиям на ряд микроорганизмов, позволяет уничтожить многие бактерии и плесневые грибы [47]. В работе Е. В. Хмелевой [107] отмечается, что для усиления бактерицидного действия целесообразно создавать композиции, состоящие из отваров и настоев растительного сырья (черноплодная рябина, рябина обыкновенная, шалфей, зверобой, мята, ромашка).

В работе [47] установлено, что применение отвара черноплодной рябины при замачивании зерна позволяет уменьшить число КМАФАнМ на 5 %, спорообразующих бактерий – на 8,7 %, а плесневых грибов и дрожжей – на 8,2 %.

Во время измельчения зерна происходит процесс разрушения структуры зерна до частиц, которые являются достаточно крупными по сравнению с размером частиц муки. В связи с этим предполагается, что содержание в зерновой массе пентозанов, отрубянистых частиц препятствует созданию клейковинного каркаса теста [48].

В своей работе С. Я. Корячкина [48] отмечает, что при оценке пищевой ценности хлеба необходимо не только учитывать химический состав изделия, но и ориентироваться на правильность формы хлеба, привлекательность его внешнего вида, наличие глянцевої корки, эластичного мякиша, выраженного вкуса и аромата, так как данные критерии вызывают аппетит у потребителей и усиливают секрецию желудочного сока. По данным признакам хлеб из целого зерна чаще всего уступает хлебу, выработанному из муки.

Анализ научно-технической литературы свидетельствует, что зерновой хлеб характеризуется низкими органолептическими и физико-химическими показателями [3; 8]. Качество зернового хлеба зависит от газообразующей способности зерна, обусловленной состоянием углеводно-амилазного и белково-протеиназного комплексов [100].

С целью расширения ассортимента и повышения пищевой ценности зернового хлеба, а также улучшения физико-химических показателей качества теста и готовых изделий разрабатываются рецептуры, в которых зерно частично заменяется на пшеничную и ржаную обдирную муку [70; 73; 75]. Помимо этого, в качестве

рецептурных компонентов при производстве зернового хлеба применяют пюре калины, рябины или облепихи. При внесении данных добавок отмечается улучшение показателей удельного объема и формоустойчивости хлеба, общей деформации мякиша и пористости изделий по сравнению с контролем [47].

Известен способ применения водно-спиртового экстракта молодых побегов кедрового стланика, который насыщает зерновую массу биологически активными веществами, среди которых флавоноиды, каротиноиды, сахара, минеральные вещества, а также повышает пищевую ценность готового хлеба [75].

Для совершенствования технологии производства зернового хлеба проводятся исследования влияния ферментных препаратов на улучшение структуры и увеличение объемного выхода хлеба. Показано, что внесение ферментных препаратов на этапе замачивания зерна обеспечивает более интенсивный гидролиз некрахмальных полисахаридов, при этом улучшаются качественные характеристики готовых изделий: пористость увеличивается на 2,0–4,5 %, удельный объем – на 4,8–9,8 % по сравнению с контролем [47].

Одним из перспективных подходов к расширению ассортимента функциональных хлебобулочных изделий повышенной пищевой и биологической ценности является использование технологии на основе проросшего (биоактивированного) диспергированного зерна ржи или пшеницы, отличающегося повышенным содержанием витаминов, минеральных веществ в биоусвояемой форме, незаменимых аминокислот и др. [69; 80].

Производство муки и хлеба из зерна сопровождается значительными потерями полезных веществ, в то время как в процессе роста зерна их содержание существенно увеличивается. Зародыш зерна содержит больше минеральных веществ (фосфор, калий, железо, цинк и др.) и витаминов группы В по сравнению с целым зерном [109].

Белок зародыша содержит структурные и ферментативные белки, которые близки по свойствам к физиологическим белкам животной ткани, за счет чего обладает повышенной биологической ценностью и усвояемостью (91,6 %) [31]. О повышении биологической ценности продуктов из проросшего зерна также свиде-

тельствует увеличение содержания лизина, треонина, лейцина, валина, изолейцина и метионина в результате проращивания [11; 32].

Введение проростков в рацион питания помогает организму человека вырабатывать тепловую энергию, а также нормализовать процесс пищеварения за счет высокого содержания клетчатки в проростках (4,6 г/100 г) по сравнению с зерном пшеницы (3,3 г/100 г) [111].

В работе Е. В. Хмелевой [105] отмечается, что хлеб, выработанный из целого зерна, характеризуется низкими показателями объема и формоустойчивости изделия, а также отличается плотным мякишем и присутствием в объеме хлеба частично неизмельченных зерен.

Таким образом, анализ литературных источников свидетельствует о том, что зерновой хлеб играет важную роль в рационе питания человека, так как является источником биологически активных веществ, а также имеет преимущества по химическому составу и полезным свойствам по сравнению с хлебом, выпеченным из муки. В настоящее время отечественными и зарубежными учеными проводятся многочисленные исследования, направленные на совершенствование технологии производства зернового хлеба за счет применения новых видов сырья, оптимизации технологических режимов производства, введения в рецептуру хлебопекарных улучшителей.

1.4 Зерно полбы: химический состав, характеристика и перспективы применения в хлебопечении

В современном производстве зернового хлеба в качестве основных компонентов применяется зерно пшеницы и ржи, использование которых представляет собой отработанную технологию, накопленную за многие годы опыта, что позволяет обеспечить стабильное качество изделий и удовлетворить запросы потребите-

лей [54; 79; 103; 105; 106]. Однако в настоящее время исследуется возможность применения в технологии хлебопекарного производства других злаковых культур, что открывает широкие перспективы для внедрения инноваций с целью улучшения качества, обогащения новыми вкусовыми и питательными характеристиками хлеба, выработанного из целого зерна. Одним из основных объектов для изучения выступает зерно полбы, которое представляет особый интерес благодаря своим уникальным свойствам [50; 105; 109].

Полба (лат. *Triticum dicoccum*, спельта) – это вид пшеницы, который характеризуется особым строением зерна и колоса. История возделывания данной культуры уходит во времена глубокой древности, она является прародительницей современных видов мягкой и твердой пшеницы. Полбу выращивали на территории стран Средиземноморья, Древнего Египта и Вавилона. В России она широко распространилась в X–XI вв. и активно возделывалась до середины XIX в. Затем посевы полбы на территории России стали резко сокращаться, уступая площади более урожайной мягкой пшенице [33; 65; 109].

В настоящее время возрос интерес к использованию полбы для производства экологически чистых продуктов питания, что привело к возобновлению ее выращивания. Отмечается, что сейчас производственные посевы данной культуры встречаются на территории Татарстана, Башкортостана, Чувашии, Северного Кавказа, Сибири и Орловской области, а также в некоторых странах Центральной и Средней Европы (например, в Германии, Австрии, Словении, Италии и др.) [33]. В последние годы крупа из полбы и блюда из нее стали очень популярными во многих диетических ресторанах Италии, Ирана, Турции, Индии.

Полба демонстрирует высокую устойчивость к факторам окружающей среды и способна расти во влажном и холодном климате, а также на почвах с ограниченным плодородием без использования пестицидов [33; 50].

С точки зрения влияния на здоровье организма человека полба рекомендуется к употреблению при лечении язвенного колита, нейродермита и других аллергий, а также при повышенном уровне холестерина и сахара в крови [140]. Согласно

данным зарубежных исследований, проведенных *in vitro*, перевариваемость белков полбы (80,1 %) выше в сравнении с зерном пшеницы (78,9 %) [137; 167].

В работе [7] приведены морфобиологические характеристики зерна полбы, которые свидетельствуют о его схожести с твердой пшеницей.

Полба имеет богатый химический состав и представляет особую ценность для применения в технологии зернового хлеба. Химический состав зерна полбы и пшеницы представлен в таблице 3 [14; 51; 89; 109].

Таблица 3 – Химический состав зерна полбы и пшеницы (на 100 г продукта)

Показатель	Пшеница	Полба
Белки, г	11,8	14,6
Жиры, г	2,2	2,4
Полиненасыщенные жирные кислоты, г	0,4	1,3
Углеводы, г	59,5	70,2
Крахмал, г	55,5	53,9
Пищевые волокна, г	10,8	10,7
Витамины		
В ₁ (тиамин), мг	0,44	0,36
В ₂ (рибофлавин), мг	0,15	0,12
В ₅ (пантотеновая кислота), мг	1,15	1,16
В ₆ (пиридоксин), мг	0,53	0,23
В ₉ (фолиевая кислота), мкг	37,5	45,0
Е (α-токоферол), мг	3,00	1,20
РР (никотиновая кислота), мг	5,30	2,57
Макроэлементы		
Кальций, мг	54	27
Калий, мг	337	338
Магний, мг	108	136
Микроэлементы		
Железо, мг	5,40	4,44
Марганец, мг	108,00	115,00
Медь, мкг	470,00	511,00
Селен, мкг	29,00	11,70
Цинк, мг	2,79	3,28

Сравнительный анализ данных свидетельствует о том, что зерно полбы превосходит пшеницу по содержанию белка на 23,7 %, углеводов – на 17,9 %, содержанию полиненасыщенных жирных кислот – в 3 раза. Помимо этого, данная культура имеет большую пищевую ценность за счет высокого содержания некоторых витаминов группы В (пантотеновая кислота и фолиевая кислота), минеральных веществ (магний, марганец, медь и цинк).

Полбяная мука во многом сохраняет свойства исходного зерна и отличается высоким содержанием белков, пищевых волокон, макро- и микроэлементов, витаминов в сравнении с пшеничной мукой [89; 114]. В муке полбы отмечается высокое содержание общего сахара и редуцирующих сахаров, что характеризует высокую сахарообразующую способность муки и амилалитическую активность, что положительно сказывается на жизнедеятельности хлебопекарных дрожжей при выпечке хлеба [109].

Полба как высокобелковый сорт пшеницы служит ценным источником растительного белка в рационе человека наряду с другими зерновыми культурами [24; 105]. Анализ аминокислотного состава белка в пшеничной и полбяной муке, представленный на рисунках 3 и 4, является важным аспектом оценки их пищевой ценности [89; 109].

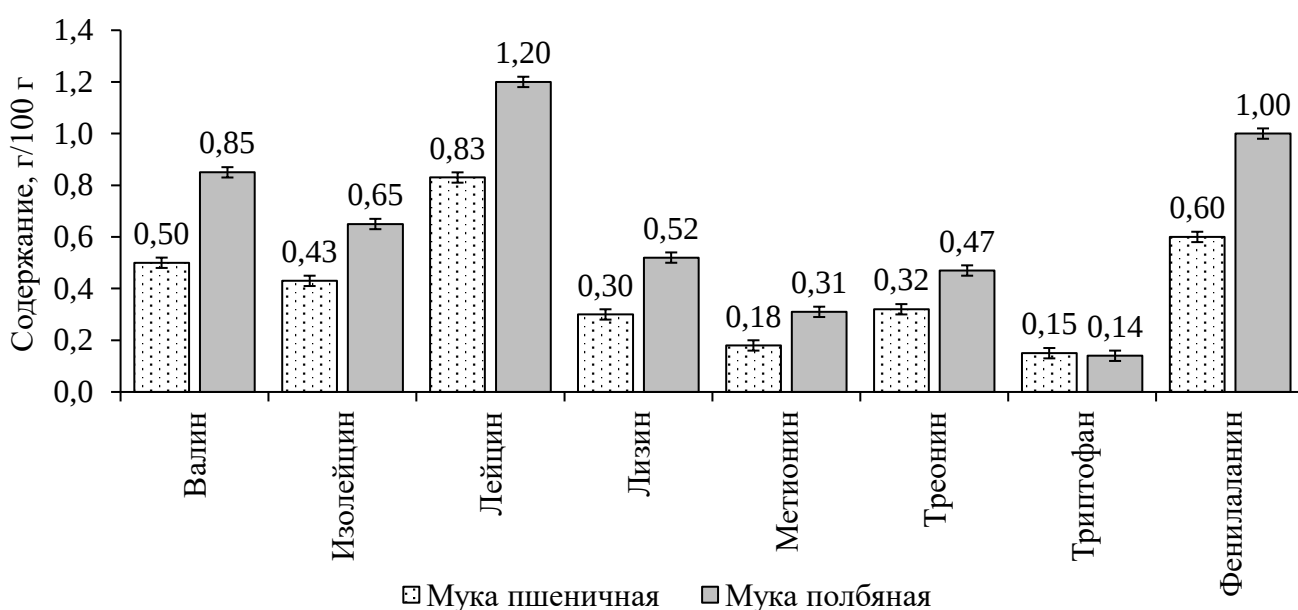


Рисунок 3 – Содержание незаменимых аминокислот в пшеничной и полбяной муке

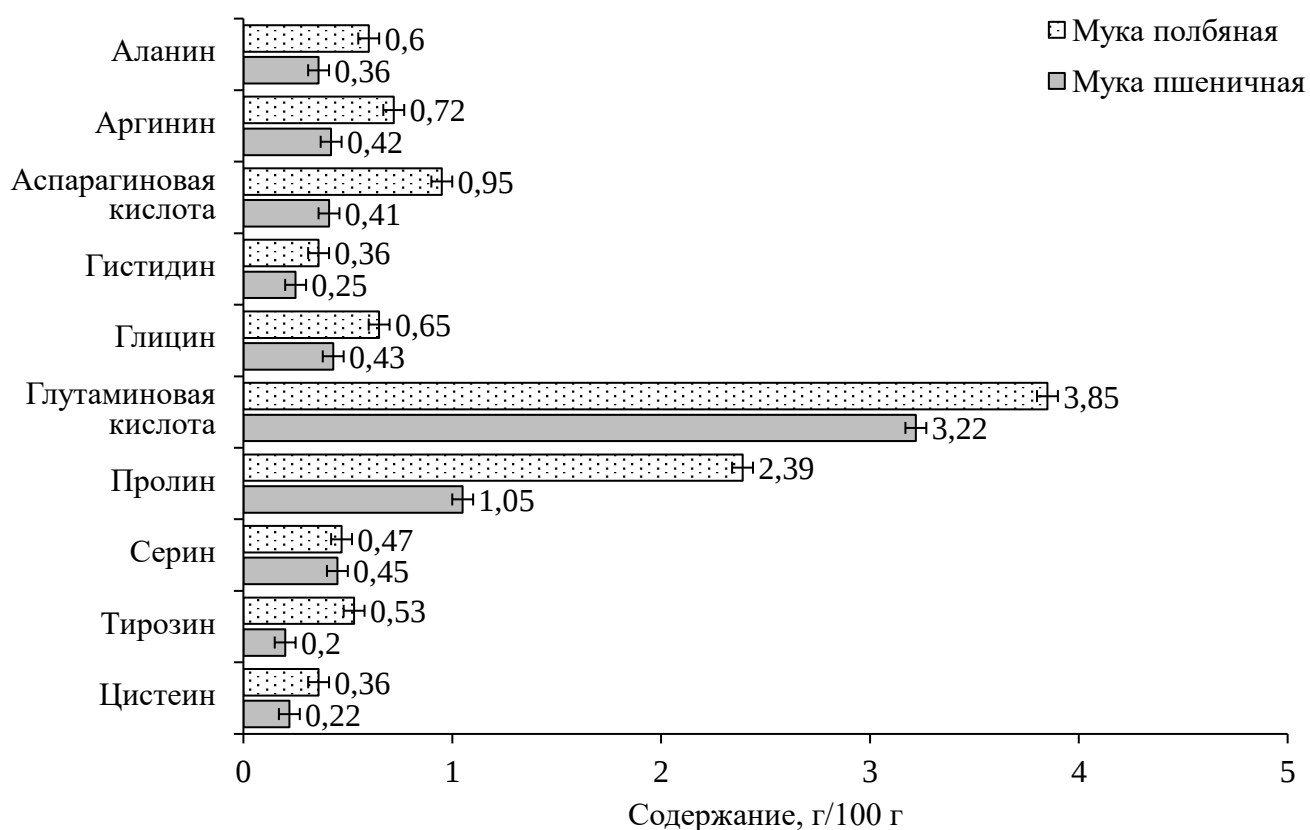


Рисунок 4 – Содержание заменимых аминокислот в пшеничной и полбяной муке

Отмечается, что доля незаменимых аминокислот в полбяной муке составляет 29,7 %, заменимых – 70,3 %; скоры незаменимых аминокислот превышают 90 %. Содержание валина, изолейцина, лейцина, суммы метионин+цистеин приближается к «идеальному» белку [50; 109].

В полбяной муке наблюдается повышенное содержание аргинина, участвующего в биосинтезе витамина PP; глутаминовой кислоты, которая участвует в нормализации обмена веществ, а также придает специфический вкус и аромат продуктам питания.

Цельнозерновая мука из полбы отличается от пшеничной муки более высоким содержанием золы (2,2 %) и клейковины, а также меньшим содержанием крахмала (66,7 %). Повышенное содержание золы в цельнозерновой муке из полбы, вероятно, обусловлено богатым составом макро- и микроэлементов [45; 47]. Химический состав и характеристика клейковины пшеничной и полбяной муки приведены в таблице 4 [6; 14].

Таблица 4 – Химический состав и характеристика клейковины пшеничной и полбяной муки

Показатель	Пшеничная мука	Полбяная мука
Кислотность, град	$6,10 \pm 0,02$	$5,92 \pm 0,02$
Титруемая кислотность, град	$30,28 \pm 1,2$	$44,20 \pm 0,5$
Влажность, %	$11,39 \pm 0,2$	$10,65 \pm 0,2$
Содержание золы, %	$0,68 \pm 0,01$	$2,21 \pm 0,02$
Содержание крахмала, %	$87,89 \pm 0,8$	$66,66 \pm 0,6$
Характеристика клейковины		
Влажность, %	$31,55 \pm 0,4$	$40,99 \pm 0,5$
Растяжимость, %	$10,70 \pm 0,2$	$15,80 \pm 0,3$
Набухание, %	$18,00 \pm 0,5$	$0,60 \pm 0,5$
Сухая клейковина, %	$10,30 \pm 0,4$	$16,00 \pm 0,3$

Полбяная мука по сравнению с пшеничной характеризуется улучшенными показателями качества клейковины муки, которая играет важную роль в производстве хлебобулочных изделий.

Отруби из полбы являются источником пищевых волокон, которые состоят в основном из арабиноксиланов (70 %), целлюлозы (24 %) и β -глюканов (6 %) [121]. Зерно полбы также содержит фенольные соединения, среди которых отмечается высокое содержание кумаровой, феруловой, синаповой и хлорогеновой кислот [149].

В работе [185] отмечается, что обработка зерна полбы ферментами значительно улучшает общее содержание экстрагируемых фенолов и антиоксидантную активность *in vitro*. Литературные данные свидетельствуют о том, что при комбинировании проращивания и ферментативной обработки содержание экстрагируемых фенолов увеличивается на 28 %. Ферментация зерна в присутствии *S. cerevisiae* увеличивает общее содержание экстрагируемых и связанных фенолов до 1,35 и 9,74 мг/г сухого вещества соответственно. В пророщенных и ферментированных зернах полбы ферментативная обработка привела к значительному увеличению общего содержания экстрагируемых фенолов, повышению антиоксидантной активности, а также экстрагируемых *n*-кумаровой, феруловой, кофейной и *n*-гидроксibenзойной кислот. Благодаря комбинации проращивания и ферментации значи-

тельно увеличилось содержание трансферуловой кислоты в экстрагируемой фракции [185].

Проращивание зерна в условиях абиотического стресса или ферментации в присутствии *S. cerevisiae* значительно повышает общее содержание фенолов и антиоксидантов по сравнению с сырыми зёрнами полбы. Таким образом, комбинирование биотехнологических процессов является эффективным способом высвобождения большого количества связанных фенольных веществ в экстрагируемой форме, а также улучшает их биодоступность [183].

Анализ литературных данных, результатов экспериментальных исследований свидетельствует о возможности применения полбяной муки с целью производства продуктов питания повышенной пищевой ценности [7; 14; 51; 64; 65; 74; 105; 106].

В работе И. А. Баженовой [7] исследованы технологические свойства зерна полбы. Отмечается, что по содержанию сырой клейковины полба находится на одном уровне с пшеницей, однако по качеству клейковина характеризуется как серая, малоэластичная, темнеющая на воздухе, что ограничивает использование данной культуры в производстве хлеба. Предполагается, что при выработке изделий полбяную муку необходимо использовать в качестве добавки к ржаной или пшеничной муке II сорта [7].

Обычно полбу применяют при производстве хлеба и хлебобулочных изделий, так как по реологическим и технологическим свойствам она схожа с пшеницей. Кроме того, данную культуру применяют при производстве других продуктов питания, таких как макароны, хлопья и т. п. [97; 65].

Отмечается, что технология производства хлеба из полбяной муки требует адаптированных методов выпечки, так как тесто характеризуется низкой стабильностью, меньшей эластичностью и большей растяжимостью в сравнении с тестом из пшеничной муки [201].

Зерновые культуры, в частности полба, содержат фитиновую кислоту, которая способна связывать ионы фосфора, кальция, магния и железа, что негативно сказывается на их усвоении, снижает доступность аминокислот и пищевую ценность готовых изделий. Предложен способ производства зернового хлеба, заклю-

чающийся в замачивании зерна полбы в молочной сыворотке, что приводит к значительному снижению содержания фитина в зерне (до 80 % по сравнению с исходным зерном) [73].

Дробленое зерно полбы, измельченное до частиц размером 0,6–1,5 мм, применяется в качестве сырья для расширения ассортимента диетических и профилактических хлебобулочных изделий. Включение зерна полбы в рацион позволяет удовлетворить суточную потребность организма в белке на 20,6 %, жире на 7,0 %, углеводах на 19,8 %, пищевых волокнах на 23,3 % [74].

Комбинирование цельнозерновой муки полбы с мукой льна и люпина в технологии производства хлеба повышенной пищевой ценности, предназначенного для массового и специализированного питания, позволяет получить готовые изделия, характеризующиеся низким гликемическим индексом, высоким содержанием пищевых волокон и сбалансированным аминокислотным составом [70].

Разработаны хлебобулочные изделия на основе ржаной и полбяной муки с использованием термофильной гречневой закваски [64]. Отмечается, что использование полбяной муки уменьшает влажность готового изделия, улучшает его пористость, значительно влияет на вкус и аромат хлеба, а также способствует повышению пищевой и биологической ценности хлебобулочных изделий.

Исследуется возможность использования муки полбы при производстве мучных кондитерских изделий. Выявлено, что добавление полбяной муки в концентрации 5–40 % взамен пшеничной при замесе песочного теста придает изделиям специфический вкус, аромат и цвет, а также увеличивает намокаемость печенья на 12 % и способствует формированию более пористой структуры [52; 109].

Однако стоит отметить, что цельнозерновой хлеб отличается низкими показателями качества по сравнению с изделиями, выработанными из муки. В связи с этим необходимо учитывать эти особенности и совершенствовать технологию производства зернового хлеба. На наш взгляд, одним из эффективных способов повышения качества зернового хлеба из полбы является применение в рецептуре функционально-активных заквасок молочнокислых бактерий, которые позволят улучшить органолептические и физико-химические характеристики продукта.

Заключение по обзору литературы

Анализ научно-исследовательской литературы свидетельствует, что в настоящее время наблюдается повышенный спрос потребителей на продукты питания, отличающиеся повышенной пищевой ценностью. В связи с этим перспективным направлением хлебопекарной отрасли является производство хлеба из целого зерна, выступающего ценным источником углеводов, растительных белков, минеральных веществ и витаминов.

Кроме того, отмечается возрастающий интерес к использованию в производстве хлебопекарной продукции зерна полбы, которая характеризуется высоким содержанием белков, углеводов, полиненасыщенных жирных кислот, витаминов и макроэлементов.

Результаты исследований российских ученых свидетельствуют, что хлеб из целого зерна характеризуется низкими значениями пористости мякиша, эластичности и удельного объема. В связи с этим совершенствование технологии зернового хлеба является актуальной задачей.

Одним из перспективных направлений для улучшения органолептических и физико-химических показателей качества зернового хлеба из полбы является применение заквасок молочнокислых бактерий. Рынок отечественных заквасок характеризуется недостаточным разнообразием, что подчеркивает актуальность разработки новых заквасочных культур с заданными свойствами, направленных на расширение ассортимента заквасок и зернового хлеба.

2 Материалы и методы исследования

2.1 Организация работы и схема проведения эксперимента

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях на кафедре технологии пищевых производств ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Теоретические и экспериментальные исследования выполнены в соответствии с поставленными задачами. Схема проведения экспериментальных исследований представлена на рисунке 5.

2.2 Объекты и материалы исследования

В работе использовали зерно полбы (ТУ 9294-002-53860659-13), муку полбяную цельнозерновую (ТУ 9293-014-89751414-11), дрожжи прессованные хлебопекарные (ТУ 9182-038-48975583-2011), соль пищевую (ГОСТ Р 51574-2018), воду питьевую (СанПиН 1.2.3685-21).

В соответствии с поставленными задачами на разных этапах работы объектами исследования являлись культуры молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus*: из коллекции микроорганизмов кафедры технологии пищевых производств ФГБОУ ВО «КНИТУ» – *L. fermentum* 10, *L. acidophilus* 9, *L. casei* 16, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24 и Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов – *L. casei* МДП-1, *L. plantarum* 71, *L. plantarum* 131, а также полуфабрикаты и хлебобулочные изделия на основе диспергированной зерновой массы с применением заквасок МКБ.

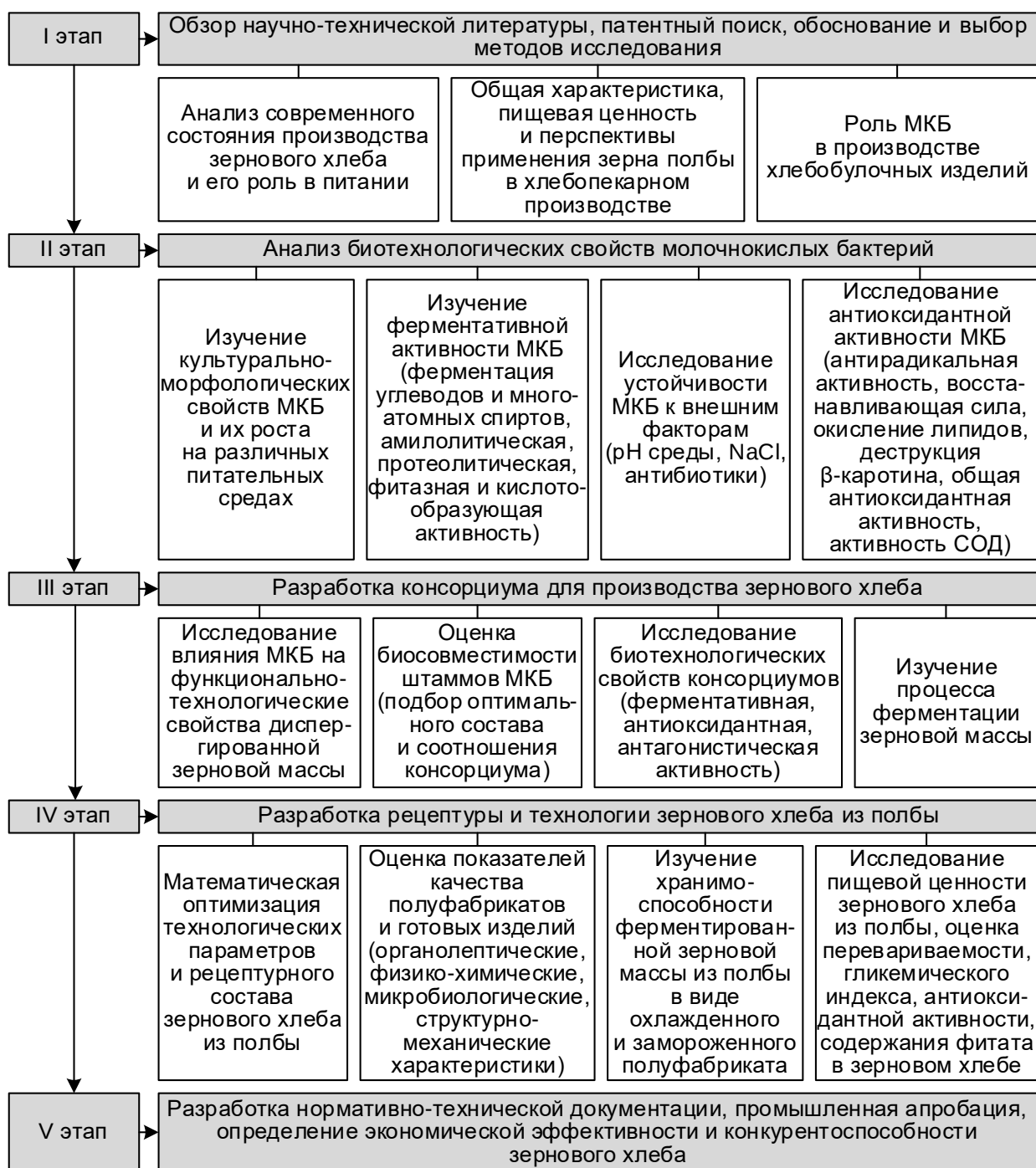


Рисунок 5 – Схема экспериментальных исследований

Характеристика штаммов молочнокислых бактерий, которые применялись в работе, представлена в таблице 5.

Свойства зерна полбы оценивали в соответствии с ГОСТ 9353-2016. Показатели качества используемого зерна полбы приведены в таблице 6.

Таблица 5 – Характеристика штаммов молочнокислых бактерий

Штамм	Характеристика
<i>L. fermentum</i> 10	Палочки средней длины (4–15 × 0,5–0,6 мкм), расположенные в цепочках, неподвижные, неспорообразующие
<i>L. acidophilus</i> 9	Толстые палочки средней длины (3–40 × 1,0–1,5 мкм), расположенные одиночно или в коротких цепочках, неподвижные, неспорообразующие
<i>L. casei</i> 16	Палочки средней длины (0,7–1,1 × 2–4 мкм), расположенные одиночно или в коротких цепочках, неподвижные, неспорообразующие
<i>L. casei</i> 32	
<i>L. casei</i> МДП-1	
<i>L. plantarum</i> 24	Палочки разной длины, расположенные в длинных и коротких цепочках, неподвижные, неспорообразующие
<i>L. plantarum</i> 71	
<i>L. plantarum</i> 131	

Таблица 6 – Показатели качества проб зерна полбы

Показатель	Номер пробы		
	1	2	3
Состояние	В здоровом негреющем состоянии		
Запах	Без посторонних запахов, соответствующий здоровому зерну полбы		
Цвет	Свойственный здоровому зерну		
Влажность, %	13,1 ± 0,2	12,9 ± 0,4	13,9 ± 0,6
Массовая доля белка, %	15 ± 0,7	14 ± 0,3	14 ± 0,3
Качество клейковины НИДК _{деф} , усл. ед.	65 ± 1,3	67 ± 0,7	67 ± 0,7
Стекловидность, %	42 ± 1,3	44 ± 0,7	44 ± 0,7
Натура, г/м³	780 ± 8,3	795 ± 6,7	790 ± 1,7
Сорная примесь, %	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1
Зерновая примесь, %	3,1 ± 0,4	3,4 ± 0,1	4,1 ± 0,6
Зараженность вредителями	Отсутствует		

Технологические характеристики муки полбяной цельнозерновой оценивали в соответствии с ГОСТ 26574-2017. Показатели качества муки полбяной цельнозерновой приведены в таблице 7.

Анализ качества дрожжей прессованных хлебопекарных осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 54731-2011. Показатели качества дрожжей приведены в таблице 8.

Таблица 7 – Показатели качества проб муки полбяной цельнозерновой

Показатель	Номер пробы				
	1	2	3	4	5
Влажность, %	14,0 ± 0,1	14,1 ± 0,2	13,8 ± 0,1	13,6 ± 0,3	14,0 ± 0,1
Кислотность, град	5,0 ± 0,12	5,2 ± 0,08	5,4 ± 0,28	4,8 ± 0,32	5,2 ± 0,08
Автолитическая активность, с	212 ± 1,2	215 ± 4,2	205 ± 5,8	213 ± 2,2	209 ± 1,8
Газообразующая способность, см ³ /100 г	1050 ± 32	1020 ± 2	1050 ± 32	990 ± 28	980 ± 38

Таблица 8 – Показатели качества проб дрожжей прессованных хлебопекарных

Показатель	Номер пробы			
	1	2	3	4
Содержание сухих веществ, %	30,0 ± 1,0	30,1 ± 0,9	32,2 ± 1,1	31,8 ± 0,7
Стойкость, ч	58–65	56–62	58–65	50–60
Подъемная сила, мин	38 ± 3,5	36 ± 1,5	35 ± 1,0	29 ± 5,5
Мальтазная активность, мин	28 ± 6,7	33 ± 1,8	40 ± 5,2	38 ± 3,2
Зимазная активность, мин	42 ± 6,0	44 ± 8,0	30 ± 6,0	28 ± 8,0
Осмочувствительность, мин	10 ± 3,5	7,5 ± 1,0	4,0 ± 2,5	4,5 ± 2,0

2.3 Способ подготовки зерна и производство хлеба

Для производства зернового хлеба осуществляли подготовку зерна [66]. Зерно полбы предварительно очищали от сорной и зерновой примеси, промывали и выдерживали в питьевой воде до набухания при температуре 18–20 °С в течение 20–24 ч, периодически меняя воду. Затем зерно снова промывали и подвергали проращиванию в течение 10–12 ч до появления ростков размером не более 1,5 мм. После этого пророщенное зерно полбы измельчали на диспергаторе РДН-Х (диаметр решеток не более 2 мм).

Зерновой хлеб готовили в соответствии с рецептурой, включающей зерно полбы (100 кг), муку полбяную цельнозерновую (48 кг), соль пищевую (3,2 кг), дрожжи прессованные хлебопекарные (4,11 кг), воду питьевую (по расчету).

Для получения ферментированной зерновой массы к измельченному зерну добавляли культуры молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* и проводили ферментацию при температуре 37 °C в течение 4–10 ч в зависимости от экспериментальных задач.

При замешивании теста на лабораторной тестомесильной машине Labomix 1000 в течение 3–5 мин при частоте вращения месильного органа 3,18 с⁻¹ вносили рецептурные компоненты: муку полбяную цельнозерновую, соль пищевую, дрожжи хлебопекарные прессованные, воду. Тестовый полуфабрикат помещали в термостат для брожения при температуре (30 ± 1) °C на 60 мин. Затем тестовый полуфабрикат ставили на расстойку при температуре (38 ± 1) °C и относительной влажности воздуха 80–85 % на 30–40 мин.

Выпечку готовых изделий проводили в хлебопекарной печи при температуре хлебопекарной камеры 220 °C в течение 40–50 мин. Выпеченные изделия охлаждали при температуре 18 °C и анализировали через 18–20 ч.

2.4 Методы исследований

2.4.1 Методы анализа свойств молочнокислых бактерий

Культуры молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* поддерживали на агаризованной среде MRS и осуществляли пересев на свежую питательную среду 1 раз в 3 мес. Для культивирования микроорганизмов в исследовании применяли питательные среды, представленные в таблице 9.

Таблица 9 – Питательные среды для культивирования микроорганизмов

Компонент	Содержание
2 % мясопептонный агар (МПА)	
Агар	2,0 г
Мясопептонный бульон	100 см ³
MRS (жидкая)	
Пептон	10,0 г
Дрожжевой экстракт	4,0 г
Глюкоза	20,0 г
Твин-80	1,0 см ³
Цитрат триаммония	2,0 г
Сульфат магния	0,2 г
Сульфат марганца ($\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	0,05 г
Агар	15,0 г
Вода дистиллированная	До 1000 см ³
MRS (агаризованная)	
МРС (жидкая)	1000 см ³
Агар	15,0 г
Среда Бликфельдта (жидкая)	
Лактоза	10,0 г
Глюкоза	10,0 г
Пептон	5,0 г
Экстракт дрожжевой	40,0 г
Углекислый кальций	5,0 г
Вода дистиллированная	До 1000 см ³
Капустная среда жидкая	
Свежая размельченная капуста	200 г
Вода водопроводная	1000 см ³
Глюкоза	20,0 г
Пептон	10,0 г
Среда Эндо (агаризованная)	
Пептон	10,0 г
Калий фосфорнокислый двузамещенный K_2HPO_4	2,5 г
Лактоза	10,0 г
Сульфит натрия (безводный)	3,3 г
Фуксин	0,3 г
Агар	12,5 г
Вода дистиллированная	До 1000 см ³

Продолжение таблицы 9

Компонент	Содержание
Среда Сабуро (агаризованная)	
Агар	18,0 г
Пептон	10,0 г
Глюкоза	40,0 г
Вода дистиллированная	До 1000 см ³

Молочнокислые бактерии культивировали в термостате при температуре 37 °С. Посевным материалом служили 12–15-часовые культуры. Продолжительность культивирования составляла 1–4 сут в зависимости от целей эксперимента.

Посевы молочнокислых бактерий осуществляли глубинным и поверхностным методом на питательные среды согласно ГОСТ 26670-91. Для посева в жидкие питательные среды и в чашки Петри глубинным методом отбирали 1,0 см³ подготовленной пробы продукта и его разведения. Для посева на поверхности плотной питательной среды в чашке Петри отбирали 0,1 см³ пробы.

Оценка биотехнологического потенциала молочнокислых бактерий. Количество жизнеспособных молочнокислых бактерий определяли в соответствии с ГОСТ 10444.11-2013.

Присутствие и подсчет лактобацилл производили при посеве на жидких питательных средах: капустной, Бликфельда и MRS. Инкубирование проводили в термостате при температуре 37 °С в течение 12–24 ч.

Подсчет количества бактерий рода *Lactobacillus* осуществляли при посеве на агаризованной питательной среде MRS. Инкубирование проводили в термостате при температуре 37 °С в течение 48 ч.

Подготовка культуры молочнокислых бактерий. Культуру штамма молочнокислых бактерий переносили стерильно со скошенного агара в пробирки с питательной средой MRS для получения «ночной» культуры и инкубировали в термостате при температуре 37 °С в течение 12 ч.

Приготовление фильтрата культуральной жидкости. Молочнокислые бактерии выращивали на питательной среде MRS при температуре 37 °С в течение 8 ч

до плотности $2,7 \cdot 10^{10}$ клеток/см³ и 36 ч до плотности $3,9 \cdot 10^{10}$ клеток/см³. Затем биомассу отделяли в центрифуге при 8000 об/мин в течение 15 мин. Надосадочную жидкость стерилизовали через мембранный фильтр $d = 0,45$ мкм. Полученную культуральную жидкость использовали для дальнейших исследований.

Кислотообразующую активность молочнокислых бактерий оценивали при росте штаммов на обезжиренном молоке. Измерение активной кислотности определяли потенциометрическим методом с помощью рН-метра. Титруемую кислотность определяли в соответствии с ГОСТ 31976-2012.

Амилолитическую активность молочнокислых бактерий определяли колориметрическим методом в соответствии с ГОСТ 20264.4-74. Метод основан на способности амилалитических ферментов катализировать гидролиз крахмала до декстринов. Пробирку, содержащую 10 см³ 1 % раствора крахмала, помещали на водяную баню при температуре 30 °С на 10 мин. Затем вносили 5 см³ ферментного раствора, перемешивали и выдерживали на водяной бане 10 мин. Из пробирки отбирали 0,1 см³ раствора, переносили в колбу, добавляли 10 см³ раствора йода и перемешивали. Визуально фиксировали интенсивность окраски раствора, которая свидетельствует о степени гидролиза крахмала. После этого на фотоэлектроколориметре определяли оптическую плотность раствора при $\lambda = 656$ нм.

Количество гидролизованного крахмала C определяли по формуле

$$C = \frac{0,1(D_1 - D_2)}{D_1}, \quad (1)$$

где D_1 – оптическая плотность контрольного раствора; D_2 – оптическая плотность опытного раствора.

Протеолитическую активность молочнокислых бактерий определяли по количеству высвободившегося тирозина, накапливающегося в субстрате за 1 ч под действием протеаз [87]. В качестве субстрата использовали 2 % раствор гемоглобина на универсальном буфере (уксусная, ортофосфорная и борная кислоты с концентрацией 0,1 М, смешанные в равных соотношениях) со значениями рН 5,0; 6,5

и 8,0 для определения протеолитической активности слабокислых, нейтральных и щелочных протеаз молочнокислых бактерий соответственно.

Фитазную активность молочнокислых бактерий определяли по ГОСТ 31487-2012. Метод основан на определении содержания неорганических фосфатов, образующихся в результате действия фитазы на фитат натрия.

Для получения основного раствора молочнокислые бактерии освобождали от культуральной жидкости центрифугированием при 7000 об/мин в течение 15 мин. Для анализа использовали надосадочную жидкость, которую для приготовления рабочего раствора разводили дистиллированной водой в 20 раз. Пробирку, содержащую 1 см³ рабочего раствора и 1 см³ фитата натрия, помещали в термостат при 37 °C на 15 мин. Затем добавляли 2 см³ раствора молибдата натрия, 0,5 см³ раствора хлорида олова и тщательно перемешивали. Оптическую плотность опытной пробы измеряли на спектрофотометре при 650 нм. За единицу активности принимали количество фермента, катализирующего процесс гидролиза фитата натрия с образованием 1 мкмоль неорганического фосфата за 1 мин.

Для выявления устойчивости штаммов к неблагоприятным условиям проводили исследования степени выживаемости лактобацилл при экспозиции в течение 24 ч в жидкой питательной среде с различными концентрациями NaCl (2 %, 4 %, 6,5 %), а также при разных значениях pH среды (от 3,0 до 9,0) [112].

Антибиотикоустойчивость молочнокислых бактерий определяли по диаметру зоны задержки роста исследуемых штаммов вокруг дисков, пропитанных антибиотиками [59]. Культуру исследуемого микроорганизма засекали на агаризованную питательную среду. Внесение антибиотиков осуществляли путем размещения дисков с антибиотиками. Результаты оценивали через 24 ч на основе визуального анализа зон задержки роста вокруг дисков.

Антагонистическую активность молочнокислых бактерий оценивали методом диффузии в агар, путем измерения зон подавления роста тест-культур патогенных и условно-патогенных микроорганизмов [112].

Антиоксидантную активность молочнокислых бактерий определяли с помощью следующих методов: антирадикальная активность, способность ингибиро-

вать процесс окисления липидов и деструкции β -каротина, восстанавливающая сила и активность фермента супероксиддисмутазы.

Антирадикальную активность определяли по методу, который основан на снижении оптической плотности раствора 2,2-дифенил-1-пикрилгидрозила (ДФПГ) в присутствии антиоксидантов [124]. Для приготовления реакционной смеси использовали 0,25 см³ исследуемого образца, 1,75 см³ 80 % этанола и 2 см³ 0,2 мМ раствора ДФПГ. Пробирки хорошо встряхивали и оставляли на 1 ч в темноте при комнатной температуре, затем измеряли оптическую плотность при длине волны 517 нм. Антирадикальную активность рассчитывали по формуле

$$AO = 100 - \frac{D_k - D_o}{D_k}, \quad (2)$$

где D_k – оптическая плотность в отсутствие антиоксидантов (контроль); D_o – оптическая плотность в присутствии антиоксидантов.

Способность ингибировать процесс окисления липидов оценивали по методу TBARS [116]. Для анализа исследуемый образец центрифугировали при 7000 об/мин в течение 10 мин. Для исследования активности пероксидазы получали супернатант, используя 0,1 М Na-фосфатный буфер, pH 7,0. Содержание малонового диальдегида (МДА) исследовали по реакции с тиобарбитуровой кислотой при 532 нм. К 0,5 см³ супернатанта последовательно добавляли 0,5 см³ 1 % раствора тритона X-100, 0,2 см³ 0,6 М HCl и 0,8 см³ 0,06 М ТБК. Смесь нагревали 10 мин на кипящей водяной бане. Охлаждение проводили при температуре 15 °C в течение 30 мин. Для стабилизации окраски добавляли 0,2 см³ 5 мМ трилона Б и 5–10 см³ 96 % этанола. Содержание МДА выражали в нмоль/г сухой массы.

Для определения *общей антиоксидантной активности* использовали кинетическую модель окисления β -каротина пероксидом водорода в присутствии диметилсульфоксида (ДМСО) [82]. Для приготовления реакционной смеси в пробирку с пробкой вносили 1 см³ исследуемого экстракта, 2 см³ ДМСО, 2 см³ раствора β -каротина концентрацией 0,2 % и 2 см³ 3 % раствора H₂O₂. Общий объем раствора до-

водили до 8 см³ бидистиллированной водой. Полученную смесь помещали в термостат при 50 °С на 120 мин. Оптическую плотность исследуемого раствора определяли при 460 нм, используя в качестве раствора сравнения бидистиллированную воду. Величину антиоксидантной активности рассчитывали по формуле

$$AOA = \left(1 - \frac{D_o - D_k}{D_k}\right) \cdot 100, \quad (3)$$

где D_o и D_k – оптическая плотность опытного и контрольного раствора после 120 мин инкубации.

Восстанавливающую силу определяли по методике, основанной на способности активных веществ исходного экстракта восстанавливать трехвалентное железо [174]. 1 см³ исследуемого раствора смешивали с 1 см³ 0,2 М калий-натриевого фосфатного буфера (рН 6,5) и 1 см³ 1 % феррицианида калия. Реакционную смесь инкубировали 20 мин при 50 °С, затем добавляли 1 см³ 10 % трихлоруксусной кислоты. Смесь центрифугировали при 750 об/мин в течение 10 мин при комнатной температуре. К 1 см³ супернатанта добавляли 1 см³ дистиллированной воды и 200 мкл 0,1 % FeCl₃. Абсорбцию реакционной смеси измеряли при 700 нм. Редуцирующую силу выражали как увеличение абсорбции при 700 нм относительно контроля.

Активность фермента супероксиддисмутазы определяли спектрофотометрическим методом, основанным на способности фермента тормозить реакцию аутоокисления адреналина в щелочной среде [38]. Скорость реакции оценивали по величине оптической плотности накапливающегося продукта аутоокисления адреналина при длине волны 347 нм и проводили расчет активности в процентах ингибирования по формуле

$$\left(1 - \frac{\Delta E \text{ опыта}}{\Delta E \text{ контроля}}\right) \cdot 100, \quad (4)$$

где ΔE опыта – экстинкция в опыте; ΔE контроля – экстинкция в контроле.

Оценку биосовместимости штаммов молочнокислых бактерий осуществляли методом прямого совместного культивирования микроорганизмов на плотной питательной среде (капельная методика) [20]. Культуру молочнокислых бактерий, выращенную в течение 24 ч на жидкой питательной среде MRS, наносили на поверхность плотной питательной среды MRS с помощью бактериологической петли. После полного впитывания первой капли, отступив 1–2 мм от ее края, наносили каплю второй исследуемой культуры, которая при растекании покрывала половину первой капли. Чашки Петри инкубировали в термостате при температуре 37 °С. Оценку результатов проводили через 24 и 48 ч.

Культуры считали биосовместимыми при наличии полного слияния капель, усилении роста штаммов в зоне совместного культивирования. В случае угнетения роста одного из исследуемых штаммов культуры считали бионесовместимыми вследствие возникшего антагонизма.

2.4.2 Методы оценки качества сырья, полуфабрикатов и готовых изделий

Анализ сырья. Зерно полбы анализировали по показателям: состояние, запах, цвет, влажность, кислотность, натура и наличие сорной и зерновой примеси.

Анализ муки полбяной цельнозерновой, применяемой в исследовании, осуществляли по органолептическим (ГОСТ 26574-2017 и ГОСТ 7054-2017) и физико-химическим показателям: влажность (ГОСТ 9404-88), титруемая кислотность (ГОСТ 27493-87).

Анализ дрожжей прессованных хлебопекарных проводили по органолептическим показателям – цвет, вкус, запах, консистенция (ГОСТ Р 54731-2011), физико-химическим показателям – подъемная сила (ускоренным способом), влажность (методом высушивания навески).

Анализ диспергированной зерновой массы осуществляли по следующим показателям: кислотность, количество жизнеспособных клеток молочнокислых бактерий. Кислотность определяли по ГОСТ 10844-74. Количество жизнеспособных клеток молочнокислых бактерий в 1 см³ суспензии определяли согласно ГОСТ 10444.11-2013 «Продукты пищевые. Методы определения молочнокислых бактерий» с использованием метода предельных разведений.

Анализ качества тестовых полуфабрикатов проводили по следующим показателям: титруемая кислотность и подъемная сила.

Титруемую кислотность определяли по ГОСТ 5670-96.

Подъемную силу тестового полуфабриката определяли методом «шарика». Навеску теста массой 20 г делили точно пополам, оба кусочка отдельно скатывали в шарики с гладкой поверхностью и без трещин. Шарик одновременно опускали в стаканы, наполненные 200–250 см³ воды, имеющей температуру 32 °С, и помещали в термостат с такой же температурой. Под подъемной силой тестового полуфабриката условно понимается промежуток времени с момента опускания шариков теста в воду до момента их всплытия на поверхность. Результат анализа выражали как среднее арифметическое из двух параллельных определений.

Микроструктуру образцов оценивали методом сканирующей электронной микроскопии на базе Междисциплинарного центра «Аналитическая микроскопия» ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» [78]. Фиксацию исследуемых образцов осуществляли с помощью 2 % раствора глутарового альдегида в течение 12 ч с последующим трехкратным промыванием 0,2 М Na-R фосфатным буфером (pH 7,0). Дегидратацию проводили в серии растворов этанола (30; 40; 50; 60; 70 и 80 %, время экспозиции 30 мин) и завершали трехкратной дегидратацией 95 % этанолом на 30 мин. Образцы закрепляли на металлических штифтах и покрывали золото-палладиевым сплавом (толщиной 10 нм) на установке Quorum Q150N ES. Наблюдение и анализ образцов проводили с помощью самоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа Merlin (Carl Zeiss, Германия) [187].

Анализ качества готовых хлебобулочных изделий проводили через 18–20 ч после выпечки по органолептическим, физико-химическим, реологическим и микробиологическим показателям.

Органолептическую оценку качества хлебобулочных изделий осуществляли в соответствии со шкалой, разработанной Н. Н. Алехиной [3], по показателям:

- внешний вид (объем формового изделия, состояние поверхности, правильность формы изделия);
- состояние мякиша (свежесть, пропеченность, характер пористости, промес);
- окраска корок и мякиша хлеба;
- вкус и аромат хлеба;
- разжевываемость.

Оценку физико-химических показателей качества хлебобулочных изделий проводили по следующим показателям: пористость – ГОСТ 5669-96, кислотность – ГОСТ 5670-96, влажность – ГОСТ 21094-75, удельный объем – ГОСТ 27669-88, упек, выход хлеба, усушка – расчетным способом.

Содержание летучих кислот в хлебе определяли согласно методу [161]. Навеску хлеба массой 50 г растирали в фарфоровой чашке с дистиллированной водой, переносили в мерную колбу на 250 см³, после этого заливали дистиллированной водой до метки и, закрыв пробкой, встряхивали. Полученную болтушку центрифугировали. Затем по 50 см³ вытяжки переносили в коническую колбу и фарфоровую чашу. Вытяжку в колбе титровали 0,1 моль/дм³ раствором гидроксида натрия в присутствии индикатора фенолфталеина. Экстракт в фарфоровой чашке выпаривали на кипящей водяной бане до густой сиропообразной консистенции, добавляли 50 см³ дистиллированной воды и титровали 0,1 моль/дм³ раствором гидроксида натрия в присутствии индикатора фенолфталеина.

Содержание летучих кислот определяли по формуле

$$X = V_1 - V_2, \quad (5)$$

где V_1 и V_2 – объем 1 моль/дм³ раствора гидроксида натрия, израсходованного на титрование вытяжки до и после выпаривания, см³.

Структурно-механические характеристики мякиша определяли с помощью анализа профиля текстуры на структурометре СТ-2 [216]. Для определения деформационных характеристик подготавливали пробы мякиша хлеба толщиной 25 мм и помещали их на структурометр СТ-2 под измерительной головкой с закрепленным индентором «Цилиндр Ø36» согласно инструкции к прибору.

Цветовые характеристики корки и мякиша хлебобулочных изделий измеряли с помощью колориметра Chroma Meter, который позволяет определять насыщенность цвета, интенсивность красного оттенка (a) и желтизны (b).

Расчет цветовой характеристики C осуществляли по формуле

$$C = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (6)$$

Интенсивность оттенка h рассчитывали по формуле

$$h = \arctan\left(\frac{b}{a}\right). \quad (7)$$

Микрофлору хлеба анализировали через 24 ч после выпечки по количеству мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (ГОСТ 10444.15-94), наличию плесени, дрожжей, картофельной болезни.

Химический состав зернового хлеба определяли по содержанию белка (ГОСТ ISO 5983-2-2016), жиров (ГОСТ 5668-68), водорастворимых углеводов (ГОСТ Р 51636-2000), пищевых волокон (ГОСТ Р 54014-2010).

Перевариваемость белков хлеба определяли ферментативным методом *in vitro* [4]. Метод заключается в воздействии трипсина на белковые вещества хлебобулочного изделия.

Исследование по определению *гликемического индекса* хлебобулочных изделий проводили в соответствии с методикой, приведенной в работе [3]. В эксперименте принимали участие 10 добровольцев из числа студентов и преподавателей университета, за исключением беременных и людей, имеющих эндокринные патологии и сахарный диабет. Уровень глюкозы в крови измеряли при помощи глюкометра Contour TS после употребления порции хлеба, содержащей 50 г углеводов.

Содержание фитиновой кислоты в хлебе определяли модифицированным методом Уэйда [136], основанным на способности связывать ионы железа. К образцу массой $(0,5 \pm 0,05)$ г добавляли 10 см^3 2,4 % раствора HCl, интенсивно встряхивали в течение 10 с. Пробирки помещали на мешалку при 300 об/мин при комнатной температуре на 16 ч. Полученный раствор центрифугировали при температуре 10°C при 3000 об/мин в течение 20 мин. Надосадочную жидкость фильтровали в пробирки с предварительно взвешенным NaCl $((1,0 \pm 0,05) \text{ г})$, смесь тщательно перемешивали при 300 об/мин в течение 20 мин. Образцу давали отстояться при 4°C в течение 60 мин, после чего центрифугировали при 3000 об/мин при температуре 10°C в течение 20 мин. 1 см^3 супернатанта разбавляли деионизированной водой в 25 раз. 3 см^3 разбавленного образца соединяли с 1 см^3 реактива Уэйда (300 мг сульфосалифиловой кислоты растворили в 100 см^3 деионизированной воды, добавили 30 мг гексагидрата хлорида железа и растворили). Смесь тщательно перемешивали и центрифугировали в течение 10 мин при 3000 об/мин при температуре 10°C . Оптическую плотность реакционной смеси измеряли при 500 нм.

Антиоксидантную активность зернового хлеба определяли в помощью следующих методов: антирадикальная активность [124], восстанавливающая сила [174] и гидроксилрадикальная активность [156].

Для определения антиоксидантной активности хлеба готовили экстракты [143]. Образцы хлеба массой 50 г высушивали при комнатной температуре в течение 48 ч, а затем измельчали в лабораторной мельнице. Измельченные образцы экстрагировали с использованием дистиллированной воды (1:5) и гомогенизировали 5 раз с помощью лабораторной мешалки. Затем экстракты центрифугировали при 7000 об/мин в течение 30 мин. Надосадочную жидкость хранили при температуре

минус 20 °С. Перед проведением исследования образцы размораживали и центрифугировали при 10 000 об/мин в течение 10 мин.

Гидроксилрадикальную активность образцов хлеба определяли с помощью салициловой кислоты [156]. 0,5 см³ исследуемого раствора смешивали с 0,5 см³ 9 ммоль/л раствора FeCl₃, 0,5 см³ 9 ммоль/л раствора салициловой кислоты в этаноле, а затем после тщательного встряхивания добавляли 0,5 см³ 9 ммоль/л раствора H₂O₂. Смесь инкубировали в течение 30 мин при температуре 37 °С. Абсорбцию реакционной смеси измеряли при 570 нм. Скорость поглощения гидроксильных радикалов измеряли по формуле

$$\left[1 - \left(\frac{A_1 - A_2}{A_0}\right)\right] \cdot 100, \quad (8)$$

где A_0 – оптическая плотность раствора, полученного при замене исследуемого образца на воду; A_1 – оптическая плотность опытного раствора; A_2 – оптическая плотность раствора, полученного при замене салициловой кислоты на этанол.

2.4.3 Математические методы обработки результатов

В исследовательской работе применяли методы математического планирования эксперимента и статистической обработки данных. Все экспериментальные исследования проводили в трех повторностях.

Статистическую обработку полученных данных и построение графиков осуществляли с использованием программных средств Microsoft Office Excel, Statistica 12 (Statsoft), GraphPad Prism8, программного обеспечения Origin. Достоверность различий между полученными результатами определяли с помощью t -критерия Стьюдента ($P \leq 0,05$).

3 Анализ биотехнологических свойств молочнокислых бактерий

Молочнокислые бактерии играют важную роль в процессах ферментации продуктов питания и являются неотъемлемой частью технологических операций в пищевом производстве [25; 112]. В связи с этим создаются закваски, состоящие из монокультур или консорциума штаммов [26]. Анализ биотехнологических свойств молочнокислых бактерий позволяет создать комплекс микроорганизмов, которые могут взаимодействовать друг с другом и максимально раскрывать биотехнологический потенциал отдельных штаммов в составе консорциума.

В настоящее время зерновой хлеб характеризуется низкими показателями качества, и предполагается, что применение заквасок лактобацилл позволит оптимизировать технологический процесс производства хлеба, а также улучшить показатели его качества [25; 112].

Целью настоящего этапа работы являлась оценка биотехнологического потенциала молочнокислых бактерий, перспективных для производства зерновых сортов хлеба.

3.1 Изучение культурально-морфологических свойств молочнокислых бактерий

Молочнокислые бактерии рода *Lactobacillus* являются промышленно ценными культурами и активно применяются в качестве заквасок при производстве разных продуктов питания [13; 25; 26; 112]. Внедрение конкретного штамма в промышленное производство сопровождается оценкой его биотехнологического потенциала и функционально-технологических свойств.

В работе применяли восемь штаммов молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* из коллекции микроорганизмов кафедры технологии пищевых производств ФГБОУ ВО «КНИТУ» и Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов, характеристика которых приведена в таблице 10.

Таблица 10 – Культурально-морфологические свойства молочнокислых бактерий

Штамм	Характеристика		Рост при температуре		Продукция CO ₂
	клеток	колоний	15 °С	45 °С	
<i>L. fermentum</i> 10	Палочки средней длины, расположенные преимущественно в цепочках	Мелкие, округлые, белые	+	—	—
<i>L. acidophilus</i> 9	Толстые палочки средней длины одиночные и в коротких цепочках	Мелкие, округлые, белые	—	+	+
<i>L. casei</i> 16	Палочки средней длины, одиночные и в коротких цепочках	Мелкие, выпуклые, беловатые	—	+	—
<i>L. casei</i> 32	Толстые палочки средней длины, одиночные и в коротких цепочках	Мелкие, куполообразные, белые	+	+	+
<i>L. casei</i> МДП-1	Палочки разной длины с закругленными концами, расположенные одиночно или попарно	Мелкие, выпуклые, гладкие, белые	+	—	—
<i>L. plantarum</i> 24	Палочки средней длины, расположенные преимущественно в коротких цепочках	Мелкие, округлые, белые	+	—	—
<i>L. plantarum</i> 71	Прямые палочки, расположенные единично или в коротких цепочках	Мелкие, блестящие, выпуклые, белые	+	—	—
<i>L. plantarum</i> 131	Палочки средней длины, расположенные преимущественно в цепочках	Мелкие, плоские, беловатые	+	—	—

Изучение морфологических свойств лактобацилл охарактеризовало их как микроорганизмы, клетки которых имеют форму палочек разной длины и толщины, расположенных одиночно или попарно, а также в виде коротких цепочек. Все штаммы формируют мелкие белые округлые колонии.

Оптимальной температурой, при которой наблюдался максимальный рост молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus*, является диапазон 30–40 °С. В ходе эксперимента выявлено, что при снижении температуры до 15 °С исследуемые

штаммы *L. fermentum* 10, *L. plantarum* 24, *L. casei* 32, *L. casei* МДП-1, *L. plantarum* 71, *L. plantarum* 131 демонстрируют активность и хороший рост. В свою очередь, *L. casei* 16 и *L. acidophilus* 9 хорошо размножаются при температуре 45 °С. Установлено, что культуры *L. casei* 32 и *L. acidophilus* 9 продуцируют углекислый газ.

Наличие активной ферментативной системы характеризуется сахаролитической способностью молочнокислых бактерий [57]. По результатам исследований установлено, что все объекты сбраживали следующие углеводы: фруктозу, галактозу, глюкозу, лактозу, мальтозу и сахарозу (таблица 11). В процессе брожения многоатомных спиртов (маннит и сорбит) участвовали штаммы *L. casei* 16, *L. casei* 32, *L. casei* МДП-1, *L. plantarum* 71, *L. plantarum* 131. Анализ данных свидетельствует о том, что наилучшей сахаролитической способностью характеризовался штамм *L. plantarum* 71, ферментирующий максимальное количество углеводов и многоатомных спиртов.

Таблица 11 – Способность молочнокислых бактерий ферментировать углеводы и многоатомные спирты

Штамм	Арабиноза	Целлобиоза	Фруктоза	Галактоза	Глюкоза	Лактоза	Мальтоза	Манноза	Мелибиоза	Рафиноза	Рибоза	Сахароза	Трегалоза	Ксилоза	Маннит	Сорбит
<i>L. fermentum</i> 10	–	–	+	+	+	+	+	–	+	+	+	+	+	–	–	–
<i>L. acidophilus</i> 9	–	+	+	+	+	+	+	+	–	+	–	+	–	–	–	–
<i>L. casei</i> 16	–	+	+	+	+	+	+	+	–	–	+	+	+	–	+	+
<i>L. casei</i> 32	–	+	+	+	+	+	+	+	–	–	+	+	+	–	+	+
<i>L. casei</i> МДП-1	–	+	+	+	+	+	+	+	–	–	+	+	+	–	+	+
<i>L. plantarum</i> 24	–	+	+	+	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+	–	–
<i>L. plantarum</i> 71	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+	+
<i>L. plantarum</i> 131	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+

Далее исследовали рост молочнокислых бактерий на различных питательных средах. Лактобациллы являются микроорганизмами, требовательными к источникам питания, вследствие чего для их культивирования используются среды сложного состава [112].

Динамику накопления биомассы молочнокислых бактерий оценивали на питательных средах: MRS, Бликфельда и капустной (таблица 12). Для этого бактерии культивировали на различных средах в течение 24 ч при температуре 37 °С.

Таблица 12 – Показатели роста при периодическом культивировании молочнокислых бактерий на различных питательных средах

Штамм	Конечная концентрация биомассы, г/100 см ³	Количество жизнеспособных клеток, lg КОЕ/см ³	Степень потребления глюкозы, %
Среда MRS			
<i>L. fermentum</i> 10	5,78 ± 0,11	9,46 ± 0,27	95,4 ± 0,5
<i>L. acidophilus</i> 9	5,66 ± 0,15	10,32 ± 0,27	97,8 ± 0,5
<i>L. casei</i> 16	5,46 ± 0,16	9,98 ± 0,22	93,8 ± 0,5
<i>L. casei</i> 32	5,92 ± 0,14	10,05 ± 0,30	96,5 ± 0,5
<i>L. casei</i> МДП-1	5,85 ± 0,12	10,21 ± 0,31	94,9 ± 0,6
<i>L. plantarum</i> 24	5,27 ± 0,12	9,77 ± 0,16	93,7 ± 0,5
<i>L. plantarum</i> 71	5,71 ± 0,13	9,39 ± 0,18	95,1 ± 0,5
<i>L. plantarum</i> 131	5,89 ± 0,18	9,67 ± 0,16	94,2 ± 0,6
Капустная среда			
<i>L. fermentum</i> 10	5,95 ± 0,12	9,68 ± 0,25	95,8 ± 0,5
<i>L. acidophilus</i> 9	5,92 ± 0,13	10,71 ± 0,21	98,1 ± 0,6
<i>L. casei</i> 16	6,02 ± 0,19	10,38 ± 0,23	94,1 ± 0,5
<i>L. casei</i> 32	6,21 ± 0,14	10,25 ± 0,20	96,5 ± 0,6
<i>L. casei</i> МДП-1	5,99 ± 0,14	9,84 ± 0,19	95,7 ± 0,5
<i>L. plantarum</i> 24	5,61 ± 0,15	9,96 ± 0,17	94,3 ± 0,5
<i>L. plantarum</i> 71	6,09 ± 0,14	10,12 ± 0,25	95,4 ± 0,6
<i>L. plantarum</i> 131	6,28 ± 0,17	9,78 ± 0,20	94,8 ± 0,6
Среда Бликфельда			
<i>L. fermentum</i> 10	5,51 ± 0,12	9,14 ± 0,25	94,8 ± 0,5
<i>L. acidophilus</i> 9	5,37 ± 0,14	10,09 ± 0,24	97,2 ± 0,6
<i>L. casei</i> 16	5,12 ± 0,15	9,59 ± 0,20	93,6 ± 0,5
<i>L. casei</i> 32	5,76 ± 0,12	9,82 ± 0,27	95,9 ± 0,5
<i>L. casei</i> МДП-1	5,66 ± 0,14	9,81 ± 0,22	94,3 ± 0,5
<i>L. plantarum</i> 24	5,03 ± 0,13	9,43 ± 0,18	93,0 ± 0,5
<i>L. plantarum</i> 71	5,57 ± 0,13	9,18 ± 0,14	94,6 ± 0,5
<i>L. plantarum</i> 131	5,73 ± 0,15	9,45 ± 0,17	93,2 ± 0,5

Изучение динамики роста молочнокислых бактерий на различных питательных средах показало, что наиболее активное накопление биомассы наблюдалось при культивировании на капустной питательной среде (5,61–6,28 г/100 см³). На питательной среде MRS конечная концентрация биомассы достигала значений 5,27–5,92 г/100 см³, а на питательной среде Бликфельдта – 5,03–5,76 г/100 см³. Выявлено, что на всех питательных средах наибольшую конечную концентрацию биомассы демонстрировали штаммы *L. casei* 32, *L. casei* МДП-1 и *L. plantarum* 131.

Наибольшее количество жизнеспособных клеток для всех исследуемых молочнокислых бактерий наблюдалось при культивировании на капустной питательной среде.

3.2 Изучение кислотообразующей активности молочнокислых бактерий

Одной из основных технологических характеристик лактобацилл является их кислотообразующая активность, так как кислая среда способствует гидролизу белков, снижению активности патогенной микрофлоры и активации ферментов [37]. В результате гетероферментативного молочнокислого брожения образуются молочная кислота, этанол, уксусная кислота, диоксид углерода и незначительная часть летучих кислот, которые участвуют в формировании вкуса и запаха хлебобулочных изделий [26].

Результаты исследования активности молочнокислых бактерий в молоке представлены в таблице 13. Установлено, что продолжительность процесса свертывания молока в присутствии исследуемых лактобацилл составила 4–7 ч. В результате действия штаммов *L. fermentum* 10, *L. casei* 16, *L. casei* 32, *L. casei* МДП-1 в молоке образовывались густые молочные сгустки, остальные штаммы образовывали пастообразные сгустки. Отмечается, что сгустки, сформировавшиеся под действием *L. acidophilus* 9 и *L. plantarum* 131, отличаются резко-кислым вкусом.

Таблица 13 – Активность штаммов молочнокислых бактерий в молоке

Штамм	Продолжительность ферментации, ч	Кислотность			Количество жизнеспособных клеток, КОЕ/см ³	Характеристика молочного сгустка
		активная, pH	титруемая, °T	предельная, °T		
<i>L. fermentum</i> 10	7	4,70 ± 0,05	104 ± 3	142 ± 2	5,4·10 ⁹	Вкус нежный, невыраженный; консистенция густая, мелкозернистая; запах невыраженный, слаботворожный
<i>L. acidophilus</i> 9	4	4,62 ± 0,05	119 ± 4	210 ± 4	2,1·10 ⁹	Вкус резко-кислый; консистенция пастообразная, гомогенная; цвет молочно-белый; запах резкий, кисломолочный
<i>L. casei</i> 16	7	4,70 ± 0,05	108 ± 3	154 ± 3	1,0·10 ¹⁰	Вкус нежный, невыраженный; консистенция густая, неоднородная; запах невыраженный, слаботворожный
<i>L. casei</i> 32	4	4,59 ± 0,04	120 ± 4	170 ± 3	3,0·10 ¹⁰	Вкус невыраженный, слабый; консистенция густая, мелкозернистая; запах приятный, кисломолочный
<i>L. casei</i> МДП-1	6	4,68 ± 0,05	110 ± 3	158 ± 4	5,6·10 ⁹	Вкус нежный, чуть кислый; консистенция густая, неоднородная; запах приятный, кисломолочный
<i>L. plantarum</i> 24	6	4,77 ± 0,06	112 ± 4	154 ± 3	2,4·10 ¹⁰	Вкус нежный, приятный; консистенция пастообразная, однородная; запах приятный, кисломолочный
<i>L. plantarum</i> 71	5	4,65 ± 0,05	106 ± 3	164 ± 3	3,7·10 ⁹	Вкус нежный, чуть кислый; консистенция пастообразная, однородная; запах приятный, кисломолочный
<i>L. plantarum</i> 131	6	4,41 ± 0,05	118 ± 3	186 ± 4	7,1·10 ⁹	Вкус кислый; консистенция пастообразная, гомогенная; цвет молочно-белый; запах резкий, кисломолочный

Активная кислотность исследуемых молочнокислых бактерий находилась в диапазоне pH 4,41–4,77, уровень титруемой кислотности через 24 ч культивирования достигал значений 104–120 °Т. Предельная кислотность всех исследуемых штаммов спустя 7 сут ферментации молока колебалась в интервале 142–210 °Т.

Установлено, что все исследуемые молочнокислые бактерии проявляли кислотообразующую способность. Выявлено, что наиболее активными кислотообразователями являлись штаммы *L. casei* 32, *L. plantarum* 131 и *L. acidophilus* 9, которые продемонстрировали высокие показатели титруемой и предельной кислотности – 118–120 и 170–210 °Т соответственно.

3.3 Изучение ферментативной активности молочнокислых бактерий

В научно-технической литературе активно обсуждается ферментативная активность различных штаммов молочнокислых бактерий, которая выступает основной характеристикой при выборе заквасочных микроорганизмов [15; 43; 161].

Способность лактобацилл продуцировать амилолитические и протеолитические ферменты является важным функционально-технологическим свойством, благодаря которому формируются физико-химические, органолептические и микробиологические показатели качества продуктов питания [109].

Амилолитические ферменты играют важную роль в технологии хлебобулочных изделий, так как катализируют процесс гидролиза крахмала и улучшают сбраживание сахаров микроорганизмами. Процесс расщепления крахмала до декстринов способствует увеличению содержания в тесте низкомолекулярных сахаров, которые в процессе меланоидинообразования усиливают окраску корочки хлеба [109].

Температура и pH среды являются основными параметрами, которые позволяют регулировать ферментативный процесс и влияют на активность амилолитических ферментов. Оптимальная температура активности ферментов бактериаль-

ного происхождения находится в диапазоне 20–37 °С в зависимости от вида бактерий. С повышением температуры скорость химических реакций увеличивается, однако при превышении определенного значения температуры начинается денатурация ферментов, и их активность резко падает.

В связи с этим исследовали влияние температуры на амилалитическую активность молочнокислых бактерий, результаты приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Влияние температуры на амилалитическую активность молочнокислых бактерий, ед. акт/см³

Штамм	Температура, °С				
	20	30	40	50	60
<i>L. fermentum</i> 10	13,43 ± 0,11	61,12 ± 0,49	110,38 ± 0,88	124,61 ± 0,89	94,28 ± 0,73
<i>L. acidophilus</i> 9	56,59 ± 0,45	60,34 ± 0,48	71,88 ± 0,58	46,29 ± 0,37	41,04 ± 0,33
<i>L. casei</i> 16	67,38 ± 0,54	86,55 ± 0,67	97,81 ± 0,78	72,78 ± 0,58	31,23 ± 0,25
<i>L. casei</i> 32	61,74 ± 0,49	98,95 ± 0,71	101,17 ± 0,81	54,20 ± 0,43	23,75 ± 0,19
<i>L. casei</i> МДП-1	46,83 ± 0,37	74,57 ± 0,60	79,18 ± 0,63	51,12 ± 0,41	36,72 ± 0,29
<i>L. plantarum</i> 24	20,72 ± 0,17	52,48 ± 0,42	96,72 ± 0,77	109,53 ± 0,88	87,85 ± 0,69
<i>L. plantarum</i> 71	49,15 ± 0,39	90,39 ± 0,72	98,91 ± 0,79	63,07 ± 0,51	40,33 ± 0,23
<i>L. plantarum</i> 131	58,42 ± 0,47	85,53 ± 0,68	89,41 ± 0,72	55,86 ± 0,45	38,17 ± 0,31

Установлено, что все исследуемые молочнокислые бактерии проявляли амилалитическую активность в широком диапазоне температур 20–60 °С. Оптимальная температура для большинства штаммов, при которой наблюдалась максимальная активность амилаз, составила 40 °С. Исключение составил штамм *L. fermentum* 10, который проявлял максимальную амилалитическую активность при температуре 50 °С. При дальнейшем увеличении температуры с 40 °С до 60 °С наблюдалось снижение активности амилаз.

В результате эксперимента выявлено, что наибольшую амилалитическую активность (101,17–124,61 ед. акт/см³) продемонстрировали штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24.

Как известно, активность ферментов также значительно зависит от уровня pH среды. В работе проведено исследование влияния pH среды на амилалитическую

активность молочнокислых бактерий. Установлено, что максимальная активность амилаз лактобацилл (81,51–110,38 ед. акт/см³) наблюдалась в слабокислой среде (таблица 15).

Таблица 15 – Влияние pH среды на амилалитическую активность молочнокислых бактерий, ед. акт/см³

Штамм	Значение pH					
	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
<i>L. fermentum</i> 10	64,39 ± 0,58	100,27 ± 0,90	108,69 ± 0,98	110,38 ± 0,99	90,71 ± 0,82	43,15 ± 0,39
<i>L. acidophilus</i> 9	45,12 ± 0,41	61,31 ± 0,55	68,17 ± 0,61	71,88 ± 0,65	64,65 ± 0,58	27,75 ± 0,25
<i>L. casei</i> 16	56,71 ± 0,51	90,12 ± 0,81	95,54 ± 0,86	97,81 ± 0,88	78,42 ± 0,71	32,13 ± 0,29
<i>L. casei</i> 32	60,92 ± 0,55	94,73 ± 0,85	100,11 ± 0,90	101,17 ± 0,91	81,46 ± 0,73	38,91 ± 0,35
<i>L. casei</i> МДП-1	54,47 ± 0,49	78,24 ± 0,70	81,51 ± 0,73	79,18 ± 0,71	68,12 ± 0,61	30,03 ± 0,27
<i>L. plantarum</i> 24	47,89 ± 0,43	85,57 ± 0,77	92,39 ± 0,83	96,72 ± 0,87	72,32 ± 0,65	30,12 ± 0,27
<i>L. plantarum</i> 71	51,26 ± 0,46	87,92 ± 0,79	96,74 ± 0,87	98,91 ± 0,89	82,35 ± 0,74	40,67 ± 0,37
<i>L. plantarum</i> 131	49,15 ± 0,44	80,92 ± 0,73	84,89 ± 0,76	89,41 ± 0,80	81,23 ± 0,73	44,39 ± 0,40

Следует отметить, что амилалитическая активность молочнокислых бактерий возрастала при увеличении pH среды до значения 6,0, а затем резко снижалась. Специалисты отмечают, что данное свойство позволяет молочнокислым бактериям максимально проявлять активность амилазы, так как созревание тестовых полуфабрикатов протекает преимущественно в кислой среде [95].

Результаты исследования свидетельствуют о том, что штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24 отличались высоким уровнем амилалитической активности.

Общеизвестно, что протеолитические ферменты участвуют в формировании органолептических показателей пищевых продуктов. Это связано с тем, что в результате гидролиза белков образуются соединения, способствующие формированию вкуса и запаха продуктов питания [86]. В таблице 16 приведены результаты оценки протеолитической активности исследуемых молочнокислых бактерий при разных значениях pH среды.

Таблица 16 – Протеолитическая активность молочнокислых бактерий

Штамм	Протеолитическая активность, мкг тирозина/см ³ ·мин		
	pH = 5,0	pH = 6,5	pH = 8,0
<i>L. fermentum</i> 10	10,19 ± 0,49	25,92 ± 1,30	21,90 ± 0,67
<i>L. acidophilus</i> 9	11,17 ± 0,53	17,24 ± 0,85	19,93 ± 0,99
<i>L. casei</i> 16	9,21 ± 0,42	20,18 ± 0,97	22,26 ± 1,11
<i>L. casei</i> 32	11,60 ± 0,55	30,04 ± 1,47	22,18 ± 1,02
<i>L. casei</i> МДП-1	6,19 ± 0,26	17,54 ± 0,81	12,71 ± 0,56
<i>L. plantarum</i> 24	6,07 ± 0,29	11,45 ± 0,58	10,24 ± 0,42
<i>L. plantarum</i> 71	8,54 ± 0,47	16,76 ± 0,73	17,89 ± 0,71
<i>L. plantarum</i> 131	4,42 ± 0,21	9,10 ± 0,42	11,56 ± 0,56

Установлено, что протеолитические ферменты лактобацилл проявляли активность как в слабокислой, так и в щелочной среде. Отмечается, что максимальная протеолитическая активность у всех изучаемых штаммов, кроме *L. plantarum* 71 и *L. plantarum* 131, наблюдалась при pH 6,5. В слабокислой и щелочной среде активность протеаз молочнокислых бактерий снижалась.

Выявлено, что при pH 5,0 и 6,5 самую высокую протеолитическую активность в сравнении с другими штаммами проявлял штамм *L. casei* 32 ((11,60 ± 0,55) и (30,04 ± 1,47) мкг тирозина/см³·мин соответственно), при pH 8 – штамм *L. casei* 16 ((22,26 ± 1,11) мкг тирозина/см³·мин). Высокой протеолитической активностью также отличались *L. fermentum* 10 и *L. acidophilus* 9, а самое низкое значение вне зависимости от pH среды продемонстрировали *L. plantarum* 24 и *L. plantarum* 131.

Таким образом, установлено, что штаммы *L. casei* 32, *L. casei* 16, *L. fermentum* 10 и *L. acidophilus* 9 отличились более высокими значениями протеолитической активности в исследуемом диапазоне pH среды.

Зерновые культуры наряду с питательными веществами являются источником фитиновой кислоты, которая содержит шестиатомный спирт инозитол, гидроксильные группы которого связаны с остатками фосфорной кислоты. Помимо этого, фитиновая кислота способна связывать остатки аминокислот, белков, углеводов, а также катионы металлов – железа, меди, кальция, марганца и цинка. В результате

образуются комплексные соединения, которые не расщепляются в желудочно-кишечном тракте человека и животных, как следствие, минеральные вещества, связанные фитатами, не являются биодоступными [86; 99; 200].

Фермент фитаза способен катализировать процесс гидролиза фитина до неорганических фосфатов, в результате чего образуются ионы магния, фосфора, кальция и железа, которые становятся биодоступными и лучше усваиваются в организме человека. Анализ литературных данных свидетельствует о способности микроорганизмов продуцировать фитазу [164; 205].

Так как молочнокислые бактерии активно применяются в процессах ферментации продуктов питания, они могут быть использованы в качестве источника фитазы. Лактобациллы, обладающие фитазной активностью, могут быть использованы в качестве заквасочных культур при производстве хлебобулочных изделий, в том числе из зерновой массы [164].

В работе определяли фитазную активность молочнокислых бактерий в культуральной жидкости. Результаты исследования приведены на рисунке 6.

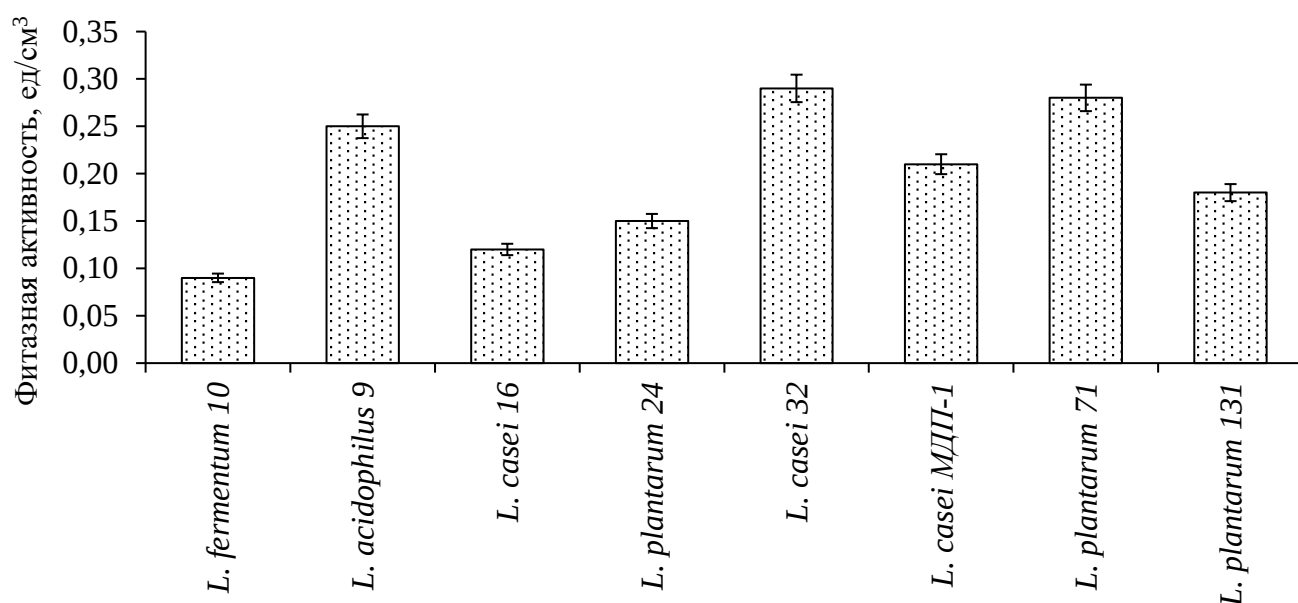


Рисунок 6 – Фитазная активность молочнокислых бактерий

Анализ полученных данных свидетельствует, что все исследуемые штаммы молочнокислых бактерий проявили способность синтезировать фитазу, которая ка-

тализует процесс гидролиза фитиновой кислоты до фосфатов. Выявлено, что наиболее высокой фитазной активностью характеризовались штаммы *L. casei* 32 (0,29 ед/г), *L. plantarum* 71 (0,28 ед/г), *L. acidophilus* 9 (0,2 ед/г), что соответствует наибольшему накоплению фосфатов в среде. Применение данных штаммов при производстве продуктов питания позволит снизить содержание фитиновой кислоты, увеличить биодоступность минеральных веществ и повысить пищевую ценность готовых изделий.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что по уровню ферментативной активности наиболее перспективными для применения в производстве зернового хлеба являются штаммы *L. fermentum* 10 и *L. casei* 32, которые отличались высоким уровнем амилолитической активности – 124,61 и 101,17 ед. акт/см³ соответственно. Активность амилазы сохранялась в широком диапазоне температур 20–60 °С, оптимальной для действия фермента оказалась слабокислая среда (рН 6). При рН 6,5 протеолитическая активность штаммов *L. casei* 32 и *L. fermentum* 10 была зафиксирована на уровне 30,04 и (25,92 ± 1,30) мкг тирозина/см³·мин соответственно.

Штаммы *L. casei* 32 и *L. plantarum* 71 характеризуются как наиболее активные продуценты фитазы, применение которых при производстве зернового хлеба позволит увеличить доступность минеральных веществ и повысить пищевую ценность готовых изделий.

Таким образом, установлено, что штаммы *L. casei* 32 и *L. fermentum* 10 отличаются высоким уровнем ферментативной активности и могут применяться в качестве заквасочных культур при производстве продуктов питания с целью повышения физико-химических и органолептических показателей качества готовых продуктов.

3.4 Исследование степени устойчивости молочнокислых бактерий к неблагоприятным факторам внешней среды

В настоящее время многие исследователи отмечают, что молочнокислые бактерии способны противостоять неблагоприятным условиям среды, а также выживать в пищеварительном тракте человека [63; 83; 96]. При изучении биотехнологического потенциала лактобацилл для использования в технологии хлебопечения определяют их способность к росту в присутствии хлорида натрия и при различных значениях pH среды. Результаты многочисленных исследований показывают, что в основном молочнокислые бактерии способны противостоять химически агрессивным факторам среды [96; 195].

Сравнительная оценка выживаемости лактобацилл в средах с различными уровнями pH свидетельствует, что этот показатель является индивидуальной характеристикой конкретного штамма (таблица 17).

Таблица 17 – Степень выживаемости молочнокислых бактерий при различных значениях pH, %

Штамм	Значение pH среды					
	3,0	4,0	5,0	7,0	8,0	9,0
<i>L. fermentum</i> 10	35,6 ± 0,1	70,9 ± 0,1	99,2 ± 0,1	96,7 ± 0,2	87,5 ± 0,2	76,8 ± 0,1
<i>L. acidophilus</i> 9	41,1 ± 0,2	86,3 ± 0,2	100,0 ± 0,1	96,4 ± 0,1	89,2 ± 0,1	76,9 ± 0,2
<i>L. casei</i> 16	28,2 ± 0,1	66,9 ± 0,2	100,0 ± 0,1	88,1 ± 0,2	78,3 ± 0,2	69,6 ± 0,2
<i>L. casei</i> 32	29,0 ± 0,1	58,4 ± 0,1	97,5 ± 0,2	98,2 ± 0,1	84,8 ± 0,1	73,1 ± 0,2
<i>L. casei</i> МДП-1	21,6 ± 0,1	48,1 ± 0,2	94,2 ± 0,1	94,4 ± 0,1	83,6 ± 0,2	67,5 ± 0,1
<i>L. plantarum</i> 24	19,4 ± 0,2	38,2 ± 0,1	89,7 ± 0,2	100,0 ± 0,2	99,1 ± 0,2	96,5 ± 0,2
<i>L. plantarum</i> 71	17,4 ± 0,1	49,4 ± 0,2	96,2 ± 0,2	98,8 ± 0,1	84,5 ± 0,1	75,8 ± 0,2
<i>L. plantarum</i> 131	22,6 ± 0,2	66,3 ± 0,1	97,8 ± 0,1	93,5 ± 0,2	77,9 ± 0,2	64,4 ± 0,1

Наиболее благоприятными условиями для роста молочнокислых бактерий отличалась слабокислая среда (pH 5,0). При снижении pH до значений 3,0–4,0 наблюдалось замедление роста всех исследуемых культур.

Выявлено, что в кислой среде при pH 3,0 степень выживаемости штаммов колебалась в диапазоне 17,4–41,1 %. Наибольшую кислотоустойчивость проявили *L. acidophilus* 9 и *L. fermentum* 10, выживаемость клеток которых составила 41,1 % и 35,6 % соответственно.

В свою очередь, все исследуемые молочнокислые бактерии продемонстрировали более высокую степень выживаемости в слабощелочной среде, которая достигала 64,4–96,5 %. Штамм *L. plantarum* 24 отличался большей устойчивостью к высоким значениям pH среды и имел высокую выживаемость – 96,5 %.

Одним из критериев отбора молочнокислых бактерий для применения в производстве пищевых продуктов является их устойчивость к действию NaCl. Солеустойчивость штаммов свидетельствует об их способности выживать в пищевых средах, содержащих высокие концентрации поваренной соли, а также в готовой продукции в течение продолжительного срока хранения [25]. На рисунке 7 приведены данные о выживаемости молочнокислых бактерий при разных концентрациях хлорида натрия.

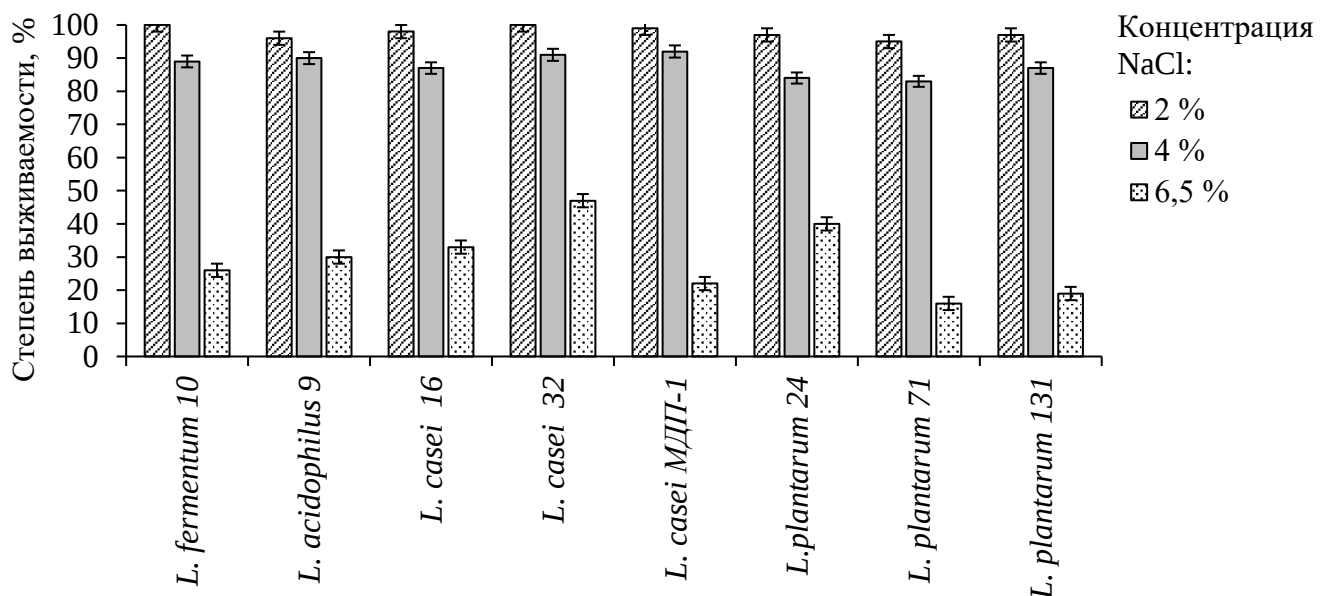


Рисунок 7 – Выживаемость молочнокислых бактерий в присутствии NaCl

Результаты исследований показали, что наибольшая степень выживаемости у всех штаммов наблюдалась при концентрации раствора соли 2 % и сохранялась

на уровне 95–100 %. С увеличением концентрации NaCl этот показатель снижался: так, при концентрации хлорида натрия 6,5 % выживаемость клеток составляла 16–47 %. Наибольшую устойчивость к высоким концентрациям хлорида натрия демонстрировали штаммы *L. casei* 32 и *L. plantarum* 24 – 47 % и 40 % соответственно, наименьшую *L. plantarum* 71 и *L. plantarum* 131 – 16 % и 19 % соответственно.

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено, что штаммы *L. casei* 32 и *L. plantarum* 24 характеризовались как наиболее устойчивые к низким значениям pH среды и высокой концентрации поваренной соли.

В научно-исследовательской литературе молочнокислые бактерии характеризуются как микроорганизмы, устойчивые к действию различных антибиотиков [92; 112]. В связи с этим изучали устойчивость лактобацилл к антибиотическим веществам широкого спектра действия. Результаты приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Антибиотикочувствительность молочнокислых бактерий

Антибиотик	Концентрация в диске, мкг	Диаметр зоны ингибирования роста, мм							
		<i>L. fermentum</i> 10	<i>L. acidophilus</i> 9	<i>L. casei</i> 16	<i>L. casei</i> 32	<i>L. casei</i> МДП-1	<i>L. plantarum</i> 24	<i>L. plantarum</i> 71	<i>L. plantarum</i> 131
Бензилпенициллин	10	21 ± 1	22 ± 2	19 ± 1	19 ± 1	18 ± 1	22 ± 1	19 ± 1	24 ± 2
Доксициклин	10	6 ± 1	2 ± 1	7 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	4 ± 1	5 ± 1	6 ± 1
Канамицин	30	2 ± 1	4 ± 1	2 ± 1	1 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	1 ± 1	1 ± 1
Карбенициллин	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Левомецетин	30	19 ± 1	18 ± 1	18 ± 1	22 ± 1	20 ± 1	22 ± 1	17 ± 1	16 ± 1
Линкомицин	2	0	2 ± 1	3 ± 1	2 ± 1	7 ± 1	0	9 ± 1	3 ± 1
Метициллин	10	0	4 ± 1	11 ± 1	2 ± 1	7 ± 1	8 ± 1	8 ± 1	6 ± 1
Неомицин	30	0	0	0	0	0	1 ± 1	1 ± 1	0
Ристомин	30	2 ± 1	0	0	0	0	7 ± 1	2 ± 1	1 ± 1
Рифампицин	10	15 ± 1	11 ± 1	19 ± 2	14 ± 1	15 ± 1	14 ± 1	14 ± 1	13 ± 1
Стрептомицин	10	8 ± 1	2 ± 1	14 ± 1	2 ± 1	10 ± 1	6 ± 1	7 ± 1	8 ± 1
Тетрациклин	30	30 ± 2	28 ± 2	20 ± 2	32 ± 2	23 ± 2	26 ± 2	15 ± 1	19 ± 1
Цефалексин	30	8 ± 1	12 ± 1	14 ± 1	9 ± 1	10 ± 1	13 ± 1	10 ± 1	11 ± 1
Цефалотин	30	15 ± 1	24 ± 1	30 ± 2	18 ± 1	24 ± 2	20 ± 1	18 ± 1	19 ± 1

Согласно литературным данным, зона диаметром до 9 мм служит показателем малой чувствительности микроорганизмов к исследуемому антибиотику; зона в диапазоне от 9 до 19 мм показывает, что микроорганизм проявляет чувствительность; зона более 19 мм указывает на высокую чувствительность к антибиотику.

Анализ полученных данных свидетельствует, что все изучаемые штаммы проявляли устойчивость или малую чувствительность к большей части антибиотиков.

Установлено, что все исследуемые штаммы характеризовались низкой чувствительностью к диоксициклину, канамицину, карбенициллину, линкомицину, неомицину, ристомицину и метициллину. Диаметр зоны ингибирования роста молочнокислых бактерий составлял от 0 до 11 мм. Результаты исследований указали на высокую чувствительность всех штаммов к таким антибиотикам, как бензилпенициллин (18–24 мм), тетрациклин (26–32 мм), левомицетин (16–22 мм), цефолатин (15–30 мм).

Наибольшая устойчивость к широкому ряду антибиотиков была выявлена у штаммов *L. casei* 32, *L. plantarum* 24 и *L. fermentum* 10; диаметр зоны ингибирования их роста составлял 15–32 мм.

По результатам проведенных исследований следует выделить молочнокислые бактерии *L. casei* 32, *L. plantarum* 24 и *L. fermentum* 10, отличающиеся более высокой степенью устойчивости к неблагоприятным условиям внешней среды.

3.5 Исследование антагонистической активности молочнокислых бактерий

Одним из важных критериев оценки молочнокислых бактерий при использовании их в производстве продуктов питания является их антагонистическая активность в отношении нежелательной, патогенной и условно-патогенной микрофлоры. В научной литературе есть данные, свидетельствующие об антимикробной активности лактобацилл [12; 17; 28; 42; 92].

В работе проводили исследование антагонистической активности молочно-кислых бактерий в отношении патогенных и условно-патогенных бактерий – *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus vulgaris*, *Bacillus subtilis*, а также патогенных грибов и дрожжей – *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum*, *Fusarium oxysporum*, *Candida guilliermondii*. Результаты исследования представлены в таблицах 19 и 20.

Таблица 19 – Антибактериальный спектр действия молочнокислых бактерий

Штамм	Диаметр зоны ингибирования роста, мм				
	<i>Escherichia coli</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Proteus vulgaris</i>	<i>Bacillus subtilis</i>
<i>L. fermentum</i> 10	28 ± 2	14 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	21 ± 1
<i>L. acidophilus</i> 9	16 ± 1	0	0	8 ± 1	18 ± 2
<i>L. casei</i> 16	20 ± 2	12 ± 1	0	9 ± 1	18 ± 2
<i>L. casei</i> 32	27 ± 2	12 ± 1	8 ± 1	10 ± 1	25 ± 2
<i>L. casei</i> МДП-1	19 ± 2	10 ± 1	2 ± 1	9 ± 1	22 ± 2
<i>L. plantarum</i> 24	22 ± 1	8 ± 1	3 ± 1	4 ± 1	24 ± 2
<i>L. plantarum</i> 71	14 ± 2	6 ± 2	0	3 ± 1	16 ± 1
<i>L. plantarum</i> 131	15 ± 2	2 ± 2	0	5 ± 1	19 ± 2

Установлено, что все молочнокислые бактерии продемонстрировали высокий уровень антагонистической активности в отношении *E. coli* и *B. subtilis*, величина зоны ингибирования роста тест-культуры составляла 14–28 и 16–25 мм соответственно. Наибольшую антагонистическую активность в отношении *E. coli* проявляли штаммы *L. fermentum* 10 и *L. casei* 32, а в отношении *B. subtilis* – *L. casei* 32, *L. plantarum* 24. Существенно, что штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 16 и *L. casei* 32 отличались антибактериальным действием в отношении *S. aureus*. Выявлено также, что *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. casei* МДП-1, *L. plantarum* 24 проявляли антагонистическую активность относительно *P. aeruginosa*, диаметр зоны ингибирования находился в диапазоне 2–8 мм.

Таблица 20 – Фунгицидное действие молочнокислых бактерий

Штамм	Диаметр зоны ингибирования роста, мм			
	<i>Aspergillus niger</i>	<i>Penicillium chrysogenum</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	<i>Candida guilliermondii</i>
<i>L. fermentum</i> 10	12 ± 1	15 ± 1	16 ± 1	10 ± 1
<i>L. acidophilus</i> 9	0	0	0	0
<i>L. casei</i> 16	6 ± 1	0	8 ± 1	0
<i>L. casei</i> 32	14 ± 1	12 ± 1	10 ± 1	17 ± 1
<i>L. casei</i> МДП-1	6 ± 1	6 ± 1	10 ± 1	7 ± 1
<i>L. plantarum</i> 24	8 ± 1	10 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
<i>L. plantarum</i> 71	2 ± 1	2 ± 1	0 ± 1	0 ± 1
<i>L. plantarum</i> 131	6 ± 1	6 ± 1	4 ± 1	2 ± 1

Установлено, что все исследуемые штаммы, за исключением *L. acidophilus* 9, оказывали фунгицидное действие на плесневые грибы и дрожжи. Выявлено, что максимальную антагонистическую активность продемонстрировали *L. fermentum* 10, *L. casei* 32 и *L. plantarum* 24. У данных штаммов величина зоны ингибирования роста *Aspergillus niger* составила 8–14 мм, *Penicillium chrysogenum* – 10–15 мм, *Fusarium oxysporum* – 8–16 мм, *Candida guilliermondii* – 10–17 мм.

Порча хлебобулочных изделий обусловлена активным ростом плесневых грибов и дрожжей, приводящим не только к ухудшению органолептических свойств, но и к образованию опасных микотоксинов, представляющих угрозу для здоровья потребителей. Молочнокислые бактерии могут выступать в качестве био-консервантов, замедляющих рост нежелательных микроорганизмов [150; 155; 177]. В связи с этим в работе проводили оценку антагонистической активности молочнокислых бактерий в отношении плесневых грибов и дрожжей (*Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum* и *Fusarium oxysporum*) при совместном культивировании в мучной болтушке из полбяной муки влажностью 60 %, с добавлением 2 % глюкозы при температуре 37 °С в течение 48 ч. На рисунке 8 приведены результаты исследования.

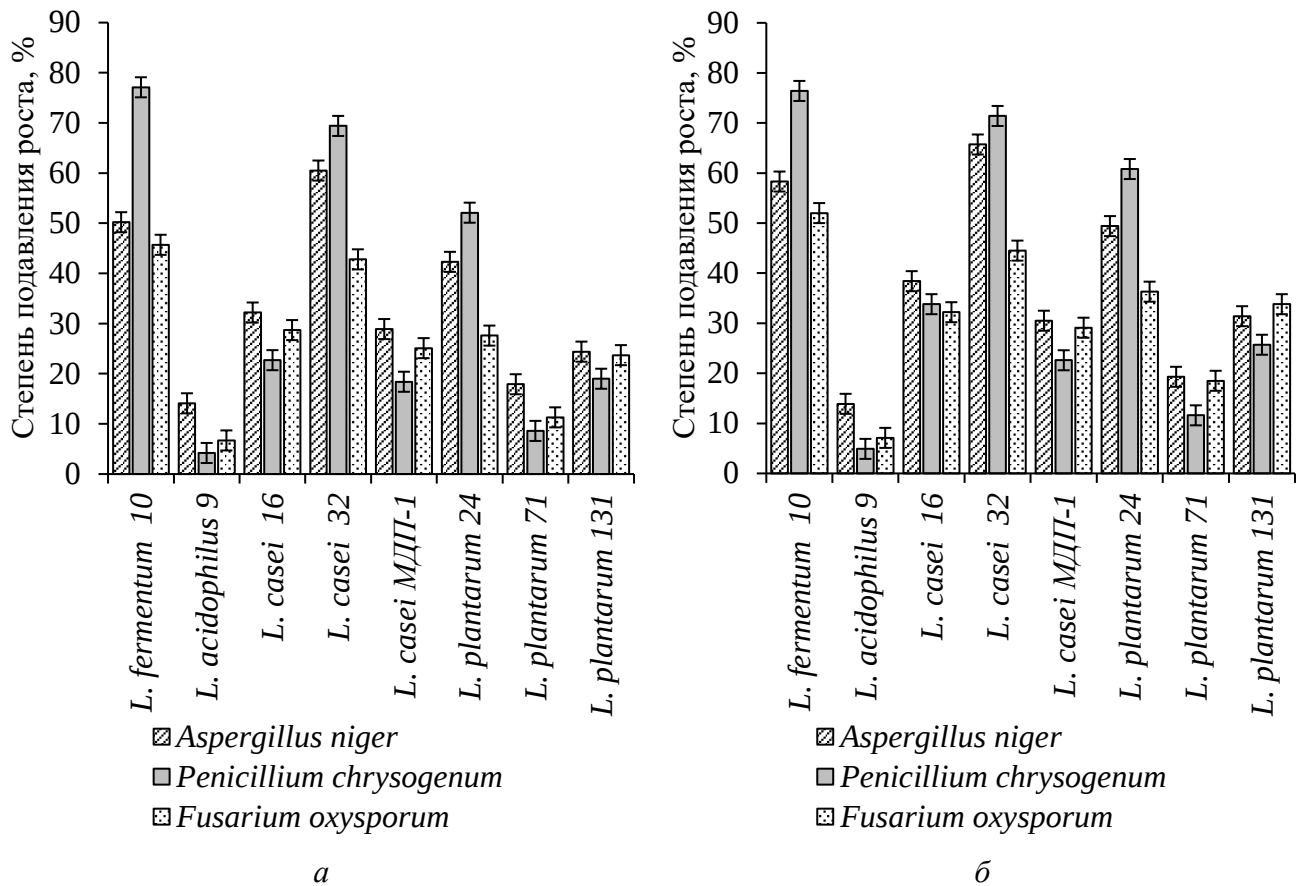


Рисунок 8 – Степень подавления роста микроскопических грибов при совместном культивировании с молочнокислыми бактериями в течение 24 ч (а) и 48 ч (б)

Установлено, что при совместном культивировании все молочнокислые бактерии продемонстрировали способность подавлять рост грибов. Максимальная антагонистическая активность через 48 ч культивирования в отношении *Penicillium chrysogenum* наблюдалась у штаммов *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24, степень подавления роста для которых составляла 76,4; 71,4; 60,8 % соответственно. Минимальной фунгицидной активностью отличался штамм *L. acidophilus* 9.

В результате проведенных исследований установлено, что наиболее широким спектром действия в отношении патогенных и условно-патогенных бактерий, а также грибов и дрожжей обладают штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24. Применение данных штаммов молочнокислых бактерий в технологии пищевых производств позволит снизить рост нежелательной микрофлоры, вызывающей порчу сырья и продуктов питания в условиях длительного хранения.

3.6 Оценка антиоксидантной активности молочнокислых бактерий

В настоящее время многие исследования направлены на разработку продуктов питания, обладающих антиоксидантными свойствами и способных поддерживать антиоксидантный статус организма человека. Особо важным направлением развития пищевых производств является повышение антиоксидантной активности пищевых продуктов за счет применения в технологии природных антиоксидантов [22; 23; 59].

Антиоксиданты ингибируют процессы окисления органических соединений, нейтрализуя свободные радикалы, которые являются фрагментами молекул с неспаренными электронами и способны инициировать окислительные реакции. Антиоксидант, взаимодействуя со свободным радикалом, стабилизирует его и предотвращает деструктивное воздействие на биологические молекулы [2].

Особый интерес представляет изучение антиоксидантной активности молочнокислых бактерий, используемых в качестве заквасок в пищевой промышленности.

Антиоксидантная активность является функцией многих параметров, таких как время, температура, природа вещества и его концентрация, поэтому измерить ее напрямую невозможно и обычно исследователи определяют влияние антиоксидантов на процессы окисления. В настоящее время не существует стандартного метода определения антиоксидантной активности микроорганизмов, известны различные методы оценки антиоксидантного потенциала молочнокислых бактерий [113]. В данной работе мы определяли антирадикальную активность [124], способность ингибировать процесс окисления липидов и деструкции β -каротина [82; 116], восстанавливающую силу [174] и активность супероксиддисмутазы внутриклеточных экстрактов (ВКЭ) и культуральной жидкости (КЖ) исследуемых лактобацилл [38].

В результате проведенных экспериментов выявлено, что у всех исследуемых культур молочнокислых бактерий наблюдалась антирадикальная активность (рисунк 9).

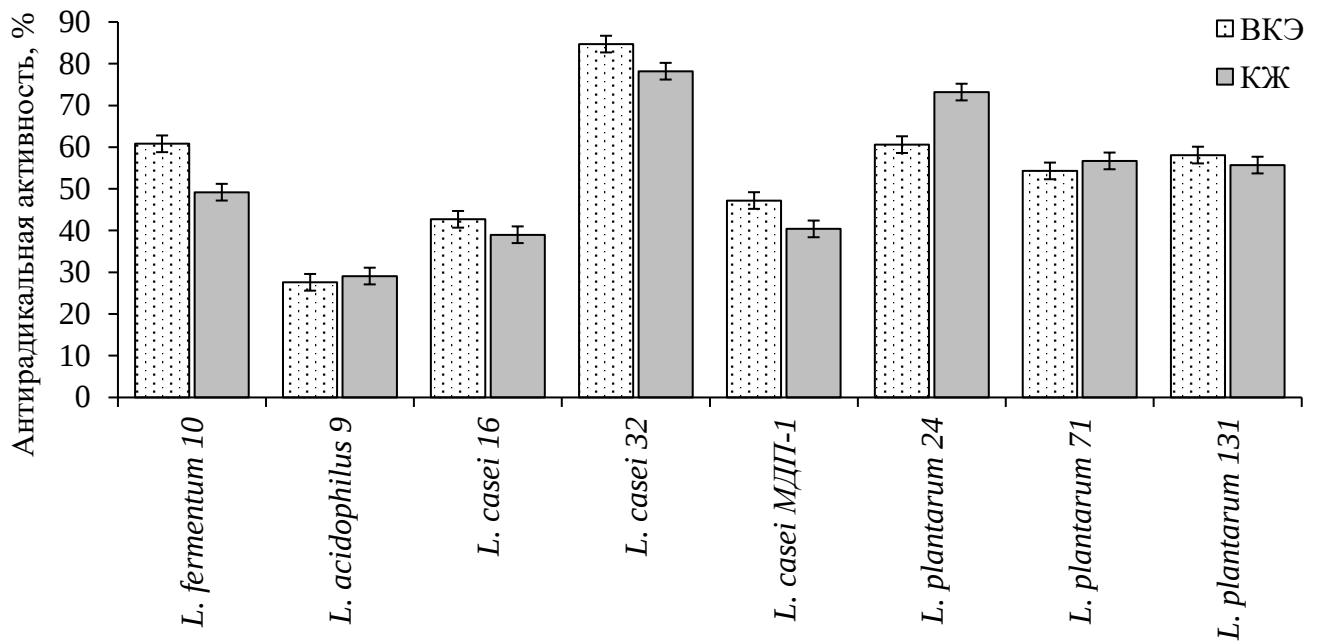


Рисунок 9 – Антирадикальная активность молочнокислых бактерий

Установлено, что антирадикальную активность проявляли как внутриклеточные экстракты, так и культуральная жидкость молочнокислых бактерий: максимальные значения антирадикальной активности продемонстрировали внутриклеточные экстракты штаммов *L. casei* 32 (84,7 %) и *L. fermentum* 10 (60,8 %), а также культуральные жидкости штаммов *L. casei* 32 (78,2 %) и *L. plantarum* 24 (73,2 %).

Далее оценивали влияние молочнокислых бактерий на процесс окисления липидов (рисунок 10). Способность антиоксидантов снижать скорость окисления липидов благоприятным образом влияет на химическую стабильность липидной фракции пищевых систем при хранении и, как следствие, увеличивает продолжительность хранения продуктов питания [209].

Полученные данные свидетельствуют, что все исследуемые штаммы молочнокислых бактерий оказывали ингибирующее действие на процесс окисления липидов. Установлено, что степень ингибирования окисления жиров у культуральных жидкостей выше, чем у внутриклеточных экстрактов. Максимальная антиокислительная активность наблюдалась у культуральных жидкостей штаммов *L. fermentum* 10 (78 %), *L. casei* 32 (75,1 %) и *L. plantarum* 24 (74,5 %). Штамм *L. casei* МДП-1 (34,7 %) продемонстрировал самые низкие значения антиоксидантной активности по способности ингибировать процесс окисления липидов.

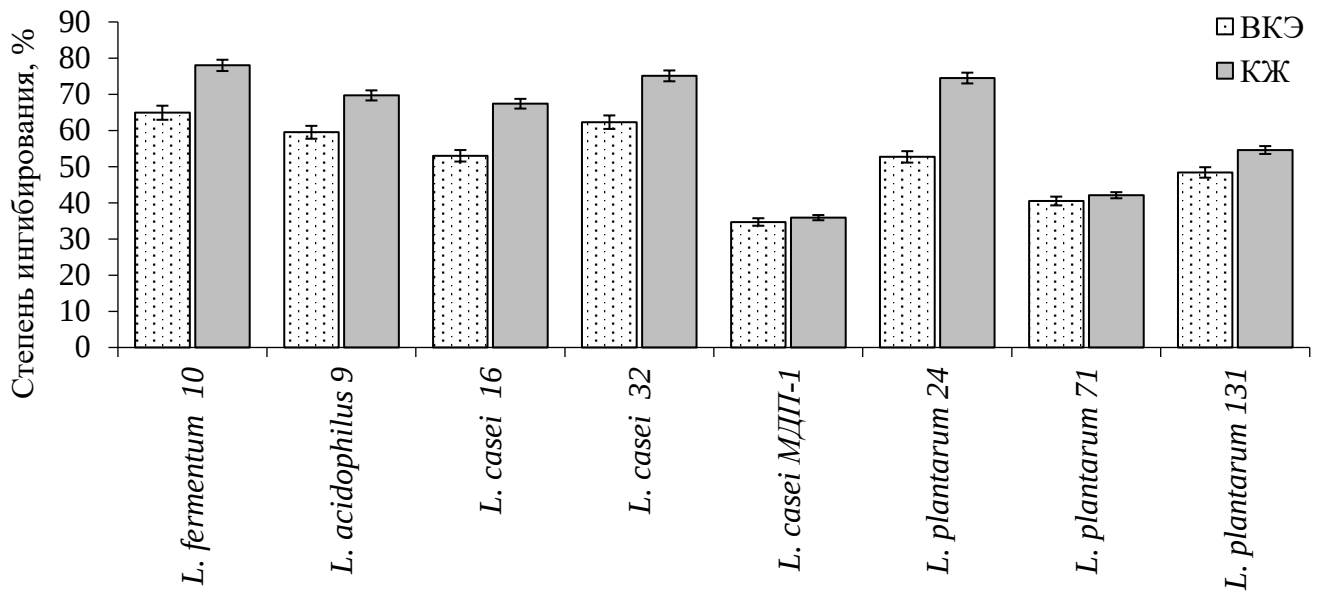


Рисунок 10 – Ингибирование окисления липидов молочнокислыми бактериями

Общую антиоксидантную активность определяли по модели окисления β -каротина в присутствии пероксида водорода. Механизм реакции заключается в том, что пероксид водорода в присутствии диметилсульфоксида способствует образованию перекисных соединений, которые вызывают деструкцию β -каротина. Вещества, обладающие антиоксидантными свойствами, тормозят процессы окисления β -каротина. Результаты исследования влияния исследуемых молочнокислых бактерий на деструкцию β -каротина представлены на рисунке 11.

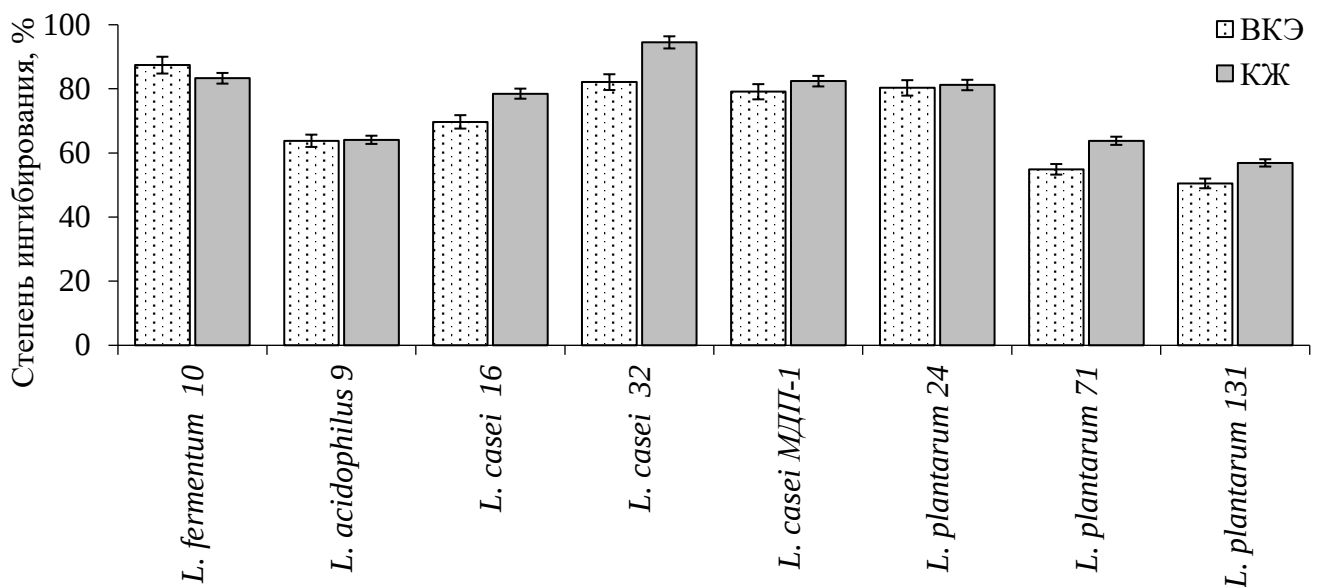


Рисунок 11 – Ингибирование деструкции β -каротина

Эксперименты показали, что все исследуемые молочнокислые бактерии характеризуются высоким уровнем антиоксидантной активности. Установлено, что у лактобацилл степень ингибирования деструкции β -каротина под действием пероксида водорода составляла 50,5–94,5 %; максимальный антиоксидантный потенциал наблюдался у штамма *L. casei* 32, минимальный – у штаммов *L. plantarum* 71 и *L. plantarum* 131.

Кроме того, об антиоксидантных свойствах исследуемых микроорганизмов судили по способности их внутриклеточных экстрактов и культуральной жидкости восстанавливать Fe^{3+} до Fe^{2+} (рисунок 12).

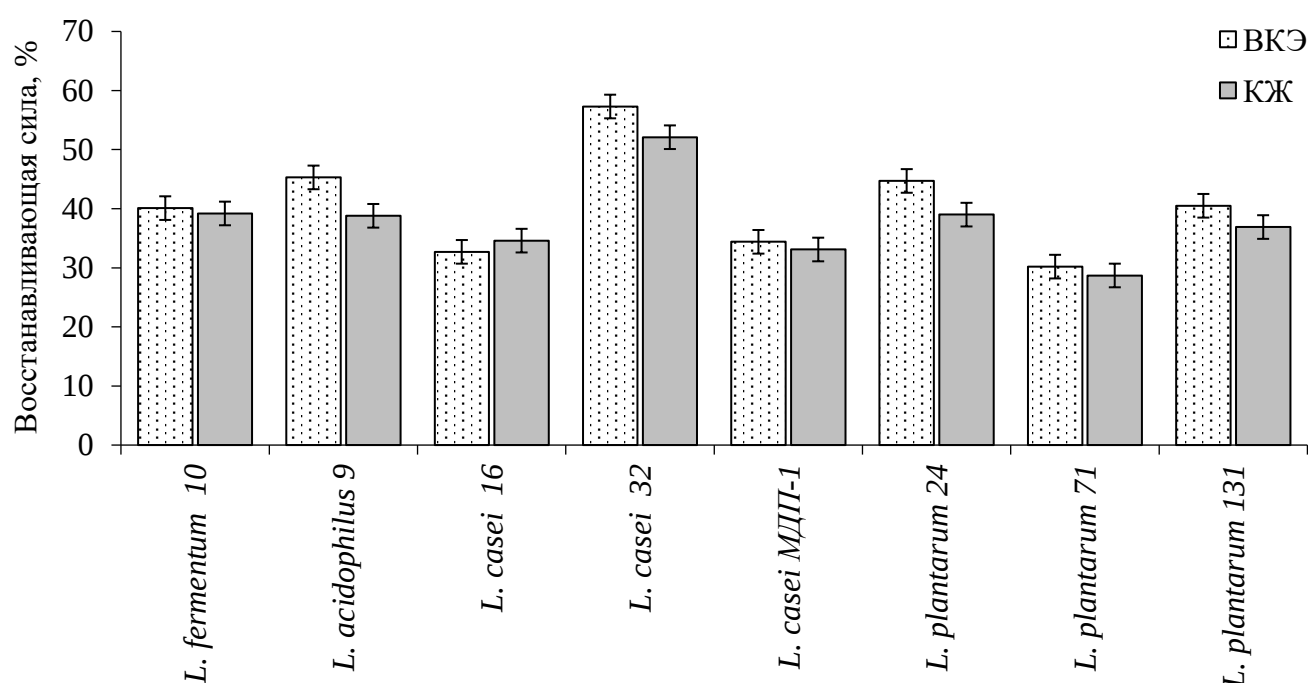


Рисунок 12 – Восстанавливающая сила внутриклеточного экстракта и культуральной жидкости молочнокислых бактерий

Установлено, что восстанавливающая сила молочнокислых бактерий варьирует в диапазоне 30,2–57,3 %. Выявлено, что внутриклеточные экстракты большинства исследуемых штаммов характеризовались более высоким уровнем восстанавливающей силы в сравнении с культуральной жидкостью. Наибольшей способностью восстанавливать трехвалентное железо отличались штаммы *L. casei* 32 (52,1–57,3 %) и *L. plantarum* 24 (39–44,7 %).

Молочнокислые бактерии обладают собственной антиоксидантной системой, включающей ряд ферментов, таких как супероксиддисмутаза, каталаза, глутатионпероксидаза, которые обеспечивают защиту от окислительного стресса, нейтрализуя активные формы кислорода и предотвращая повреждение клеточных структур [1]. СОД способна расщеплять супероксид на пероксид водорода и воду. В связи с этим важным этапом изучения антиоксидантной активности молочнокислых бактерий являлось определение уровня активности фермента СОД (таблица 21).

Таблица 21 – Активность супероксиддисмутазы молочнокислых бактерий

Штамм	Активность супероксиддисмутазы, ед/мг белка
<i>L. fermentum</i> 10	$2,16 \pm 0,35$
<i>L. acidophilus</i> 9	$1,22 \pm 0,32$
<i>L. casei</i> 16	$0,82 \pm 0,15$
<i>L. casei</i> 32	$2,07 \pm 0,31$
<i>L. casei</i> МДП-1	$0,61 \pm 0,18$
<i>L. plantarum</i> 241	$1,78 \pm 0,11$
<i>L. plantarum</i> 71	$0,58 \pm 0,15$
<i>L. plantarum</i> 131	$0,69 \pm 0,21$

Полученные данные свидетельствовали, что штаммы *L. fermentum* 10 и *L. casei* 32 характеризовались максимальным уровнем активности СОД. Следовательно, эти штаммы способны более эффективно ингибировать окислительные процессы.

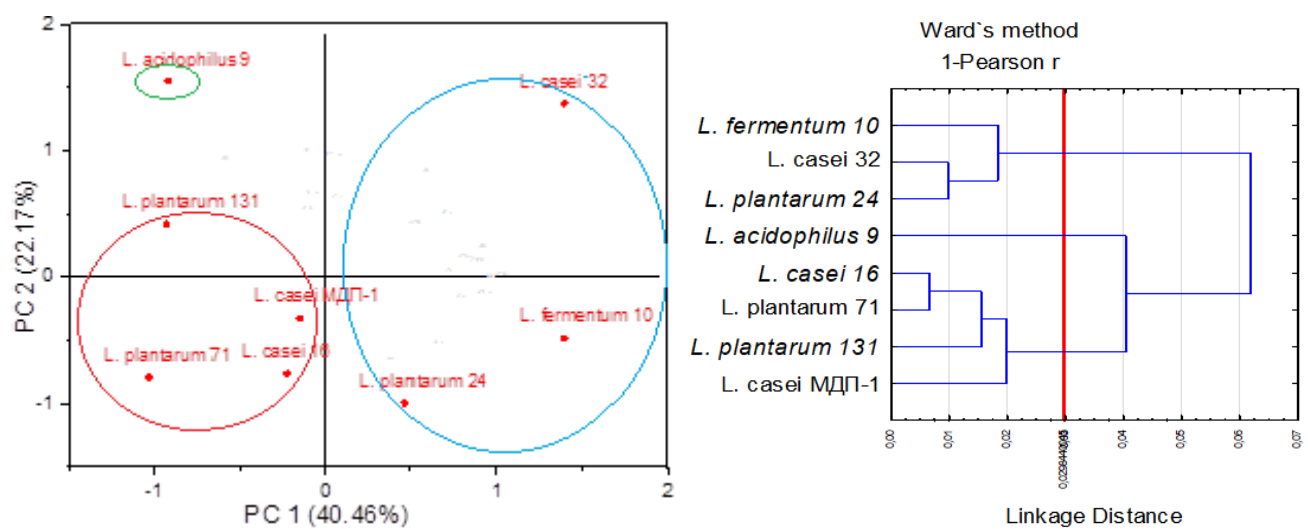
Таким образом, исследование антиоксидантной активности молочнокислых бактерий показало, что по способности наиболее активно предотвращать окисление органических соединений следует выделить штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 32 и *L. plantarum* 24, отличающиеся высоким уровнем активности фермента супероксиддисмутаза, проявляющие высокую антирадикальную активность, а также демонстрирующие способность ингибировать процессы окисления липидов и деградации β -каротина.

3.7 Анализ главных компонент биотехнологических показателей молочнокислых бактерий

В настоящее время для обработки данных, полученных в результате исследовательской работы, используются многочисленные математические методы. Выбор подходящего метода зависит от природы данных (например, количественные, категориальные, временные ряды), а также от поставленной исследовательской задачи.

Наиболее распространенным статистическим методом обработки большого массива данных является анализ главных компонент. Метод позволяет описывать изучаемые объекты, обладающие большим набором признаков, благодаря снижению их размерности на основе закономерностей корреляции между исходными переменными.

В работе проводили анализ главных компонент биотехнологических свойств молочнокислых бактерий, результаты исследования приведены на рисунке 13.



а – визуализация штаммов молочнокислых бактерий в плоскости главных компонент с выделенными кластерами

б – дендрограмма кластеризации штаммов молочнокислых бактерий

Рисунок 13 – Анализ главных компонент биотехнологических свойств штаммов молочнокислых бактерий

Математическая обработка данных позволила условно объединить исследуемые молочнокислые бактерии в три группы в зависимости от их сходства по биотехнологическим показателям. Установлено, что распределение по группам зависит от свойств конкретного штамма, а не от вида лактобацилл.

В первую группу вошли штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 32 и *L. plantarum* 24, которые имеют высокую степень корреляции по показателям ферментативной активности, устойчивости к неблагоприятным факторам внешней среды и антиоксидантной активности.

Во вторую группу с высокой степенью сходства по биотехнологическим свойствам объединены штаммы *L. casei* 16, *L. plantarum* 71, *L. plantarum* 131, *L. casei* МДП-1.

Штамм *L. acidophilus* 9 выделен в третью группу, так как по биотехнологическим характеристикам значительно отличается от других исследуемых штаммов.

В результате анализа биотехнологического потенциала штаммов молочнокислых бактерий и математической обработки полученных данных выявлено, что для применения при производстве зернового хлеба наиболее перспективны штаммы *L. fermentum* 10, *L. acidophilus* 9, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24, *L. plantarum* 131. Характеристика отобранных молочнокислых бактерий представлена в таблице 22.

Таблица 22 – Характеристика отобранных молочнокислых бактерий

Штамм	Характеристика
<i>L. fermentum</i> 10	Штамм характеризуется высоким уровнем амилалитической и протеолитической активности, проявляет устойчивость к неблагоприятным факторам внешней среды (рН, хлорид натрия, антибиотики)
<i>L. acidophilus</i> 9	Штамм является активным кислотообразователем, характеризуется высоким уровнем протеолитической активности и устойчивостью к высоким концентрациям хлорида натрия
<i>L. casei</i> 32	Штамм является активным кислотообразователем, характеризуется высоким уровнем амилалитической, протеолитической, фитазной и антагонистической активности
<i>L. plantarum</i> 24	Штамм характеризуется высоким уровнем амилалитической и фитазной активности, проявляет антагонистические свойства в отношении <i>B. subtilis</i>
<i>L. plantarum</i> 131	Штамм является активным кислотообразователем, характеризуется высокой сахаролитической способностью

Данные штаммы проявили устойчивость к неблагоприятным условиям окружающей среды (рН среды, присутствие NaCl и антибиотиков), продемонстрировали высокую ферментативную (амилолитическую, протеолитическую и фитазную) и антиоксидантную активность в отношении свободных радикалов в среде.

Полученные результаты явились основой для разработки высокоактивного консорциума, содержащего молочнокислые бактерии, перспективные для применения в технологии пищевых производств, в том числе при производстве зернового хлеба.

4 Обоснование видового состава и соотношения молочнокислых бактерий в составе консорциума

Применение молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* в пищевой промышленности позволяет совершенствовать технологические процессы производства пищевых продуктов, так как эти микроорганизмы проявляют высокую ферментативную активность, устойчивость к неблагоприятным условиям среды, а также способны синтезировать биологически активные соединения. Лактобациллы могут применяться в качестве монокультур, а также в составе консорциумов.

Предполагается, что комплексные закваски более эффективны по сравнению с заквасками, состоящими из монокультур микроорганизмов, так как способны проявлять синергизм, обладают более высокой активностью и более устойчивы к неблагоприятным факторам среды [44; 65].

Целью настоящего этапа работы являлось создание высокоактивного консорциума молочнокислых бактерий для применения в производстве зернового хлеба. Объектами исследования служили лактобациллы *L. fermentum* 10, *L. acidophilus* 9, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24, *L. plantarum* 131, отобранные по результатам оценки их биотехнологического потенциала.

4.1 Изучение роста молочнокислых бактерий на зерновой массе

Основным сырьем для производства зерновых сортов хлеба выступают зерно и мука цельнозерновая [69; 73; 74]. В связи с этим важнейшим этапом исследований при подборе заквасочных культур микроорганизмов является оценка их способности расти на мучных и зерновых средах.

В работе применяли муку пшеничную цельнозерновую, муку полбяную цельнозерновую и диспергированную зерновую массу из пшеницы и полбы. Муку цельнозерновую замешивали с водой для получения тестовой массы влажностью 50 %. Подготовку зерна пшеницы и полбы осуществляли способом, описанным в параграфе 2.3.

К тестовой массе и измельченной зерновой массе добавляли монокультуры молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* в количестве 10^8 КОЕ/см³ и проводили ферментацию при температуре 37 °С. О способности лактобацилл расти на тестовой и зерновой массе судили по накоплению кислотности и изменению их численности в процессе ферментации. Динамика кислотонакопления представлена на рисунке 14.

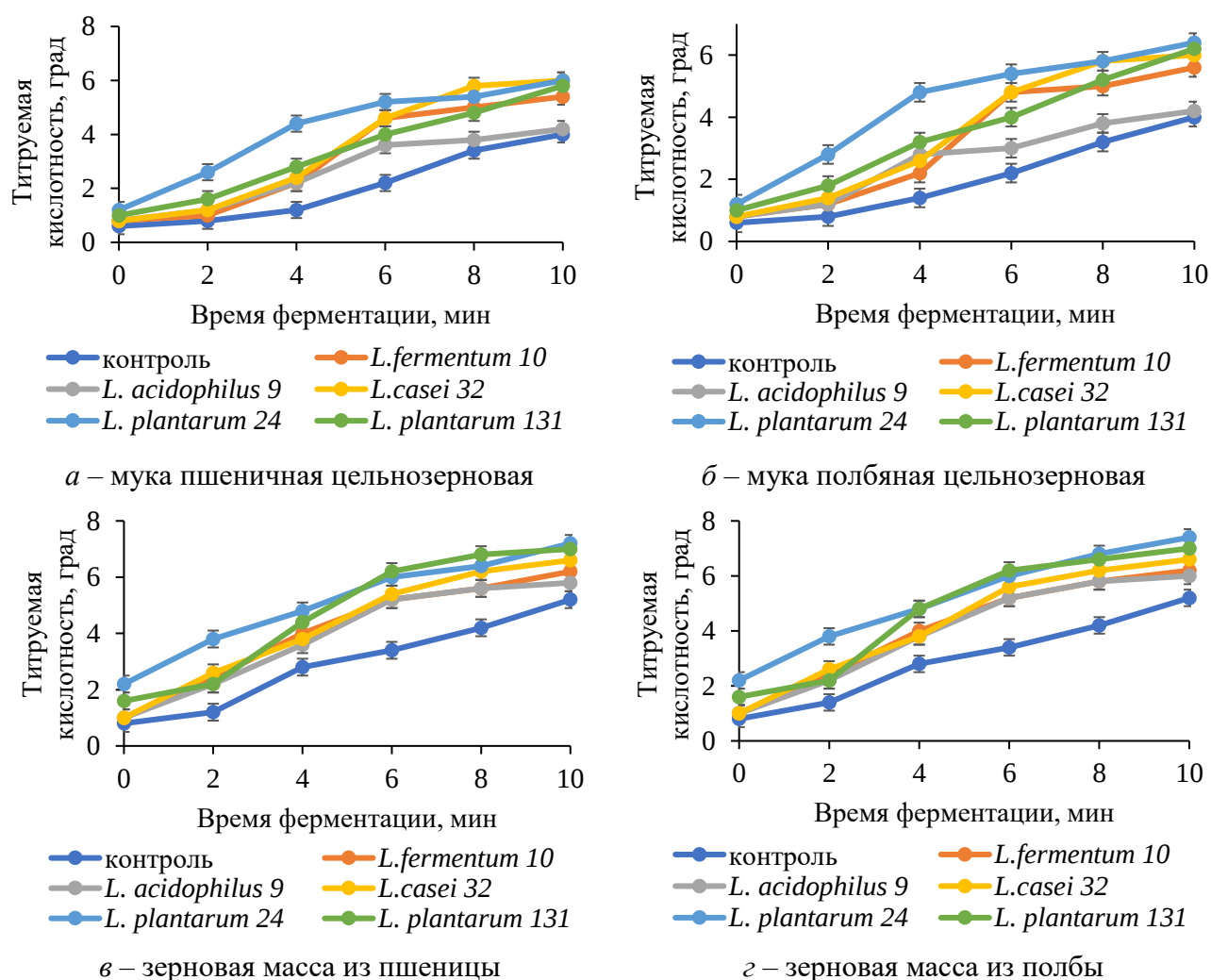


Рисунок 14 – Динамика накопления кислотности при ферментации тестовой и зерновой массы монокультурами молочнокислых бактерий

Результаты исследования показали, что характер изменения титруемой кислотности при ферментации определялся видом и штаммом молочнокислых бактерий. Во всех исследуемых объектах наблюдалось активное накопление кислотности. К окончанию процесса ферментации тестовой массы максимальная титруемая кислотность достигла значений 6,0–6,4 град, а зерновой массы – 7,2–7,4 град. Среди исследуемых штаммов молочнокислых бактерий были выделены *L. plantarum* 24 и *L. plantarum* 131 в качестве наиболее активных кислотообразователей, штамм *L. acidophilus* 9 проявлял меньшую кислотообразующую способность.

Важным показателем является прирост биомассы молочнокислых бактерий при ферментации исследуемых объектов. Изменение численности лактобацилл к окончанию процесса ферментации (через 10 ч) приведено в таблице 23.

Таблица 23 – Изменение численности молочнокислых бактерий при ферментации зерновой массы

Период ферментации	Численность МКБ, КОЕ/г					
	Контроль	<i>L. fermentum</i> 10	<i>L. acidophilus</i> 9	<i>L. casei</i> 32	<i>L. plantarum</i> 24	<i>L. plantarum</i> 131
Мука пшеничная цельнозерновая						
Начало	0	$1,2 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$
Конец	$2,9 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^8$	$1,11 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^8$
Мука полбяная цельнозерновая						
Начало	0	$1,3 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^5$
Конец	$3,2 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^8$	$2,11 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^8$
Зерновая масса из пшеницы						
Начало	0	$1,33 \cdot 10^{10}$	$4,2 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$6,0 \cdot 10^9$
Конец	$8,7 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^{14}$	$5,3 \cdot 10^{13}$	$7,0 \cdot 10^{14}$	$2,3 \cdot 10^{14}$	$4,0 \cdot 10^{14}$
Зерновая масса из полбы						
Начало	0	$4,0 \cdot 10^{10}$	$1,24 \cdot 10^{10}$	$3,3 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$6,0 \cdot 10^9$
Конец	$9,5 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^{13}$	$6,2 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^{14}$	$1,7 \cdot 10^{14}$	$3,8 \cdot 10^{14}$

Все исследуемые штаммы молочнокислых бактерий продемонстрировали хороший прирост биомассы в процессе ферментации как на цельнозерновой муке, так и на зерновой массе. Это свидетельствует о том, что данные объекты являются бла-

благоприятной средой для роста молочнокислых бактерий. Следует отметить, что штаммы лактобацилл наиболее активно развивались на диспергированной зерновой массе, прошедшей предварительную стадию замачивания и проращивания, в сравнении с тестовой массой из цельнозерновой муки.

По-видимому, это объясняется тем, что процесс проращивания активирует ферментативный комплекс зерна и повышает биодоступность минеральных веществ, что создает благоприятные условия для роста и развития молочнокислых бактерий [3].

Количество клеток лактобацилл к окончанию процесса ферментации зерновой массы и цельнозерновой муки увеличивалось и достигало значений 10^{10} и 10^8 КОЕ/г соответственно. Наиболее интенсивный прирост молочнокислых отмечался при использовании штаммов *L. casei* 32 и *L. fermentum* 10. Следует отметить, что в контрольных образцах также отмечался прирост лактобацилл, что, вероятнее всего, объясняется развитием микрофлоры самого зерна.

Таким образом, по результатам исследования установлено, что в результате процесса ферментации зерновой массы наблюдается увеличение количества жизнеспособных клеток молочнокислых бактерий. Повышение уровня титруемой кислотности свидетельствует о возможности в дальнейшем сократить продолжительность процесса брожения тестовых полуфабрикатов.

Стоит отметить, что в качестве сырья для зернового хлеба можно применять и пшеницу, и полбу, так как штаммы молочнокислых бактерий активно ферментируют данные виды зерновых культур.

4.2 Оценка биосовместимости штаммов молочнокислых бактерий

Создание консорциумов молочнокислых бактерий позволяет получить сбалансированные, обладающие ценными свойствами комплексы, которые в дальней-

шем можно применять при производстве различных продуктов питания с целью улучшения технологических параметров, а также пищевой и биологической ценности ферментированных пищевых продуктов [5; 20].

Основной задачей разработки консорциума молочнокислых бактерий является подбор штаммов, которые дополняют друг друга и усиливают общую эффективность на стадии применения. При отборе микроорганизмов для создания консорциума особое внимание уделяется биотехнологическим свойствам отдельных штаммов, а также учитывается возможность их совместного культивирования на питательных средах [19; 20].

Объектами исследования при оценке биосовместимости служили ранее отобранные штаммы рода *Lactobacillus*: *L. fermentum* 10, *L. acidophilus* 9, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24, *L. plantarum* 131, обладающие высоким биотехнологическим потенциалом. Оценку биосовместимости молочнокислых бактерий осуществляли общепринятыми методами в соответствии с методикой, описанной в пункте 2.4.1.

Результаты оценки биосовместимости молочнокислых бактерий, проводимой путем прямого совместного культивирования микроорганизмов на поверхности питательной среды MRS в течение 24 ч при температуре 37 °С, приведены на рисунке 15 и в таблице 24.

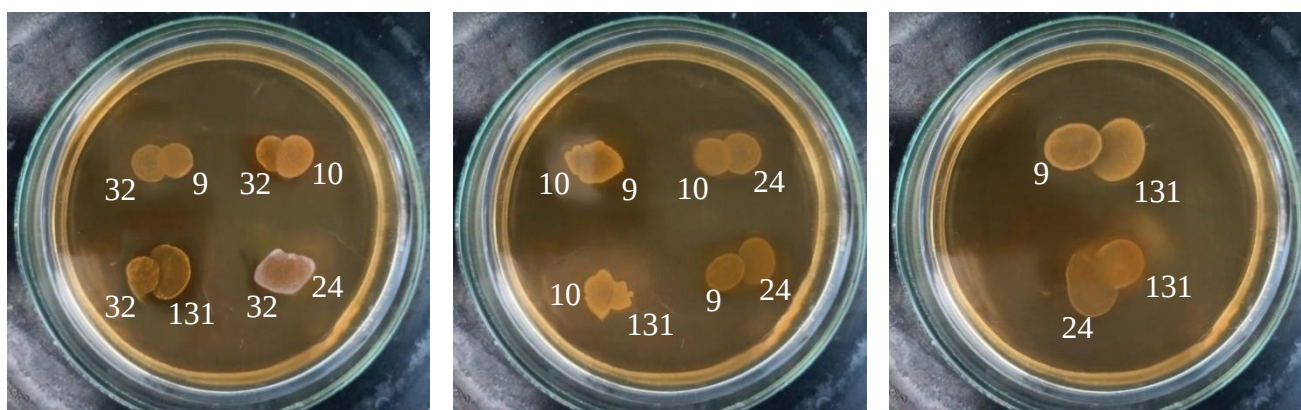


Рисунок 15 – Определение биосовместимости молочнокислых бактерий *L. fermentum* 10, *L. acidophilus* 9, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24, *L. plantarum* 131 в подобранных парах

Таблица 24 – Биосовместимость исследуемых штаммов молочнокислых бактерий

Объект исследования	<i>L. fermentum</i> 10	<i>L. acidophilus</i> 9	<i>L. casei</i> 32	<i>L. plantarum</i> 24	<i>L. plantarum</i> 131
<i>L. fermentum</i> 10		+	+	+	+
<i>L. acidophilus</i> 9	+		+	±	±
<i>L. casei</i> 32	+	+		+	+
<i>L. plantarum</i> 24	+	±	+		+
<i>L. plantarum</i> 131	+	±	+	+	
Примечание – Обозначения: «+» – биосовместимость, «±» – слабый антагонизм.					

Визуальная оценка биосовместимости отобранных лактобацилл указывает на возможность совместного культивирования отдельных штаммов молочнокислых бактерий в подобранных парах. Слияние пятен на границе свидетельствует о биосовместимости штаммов. Антагонистические взаимоотношения проявляются по признаку подавления роста одной культуры, наличия четко выраженной границы или замедления роста по краю капель.

По результатам прямого совместного культивирования микроорганизмов на поверхности питательной среды MRS штаммы *L. casei* 32, *L. fermentum* 10, *L. plantarum* 24 продемонстрировали хороший рост и слияние пятен, что свидетельствует об их биосовместимости.

Проявление слабого антагонизма у штаммов *L. acidophilus* 9 и *L. plantarum* 131 определили по наличию в зоне слияния признаков подавления роста культур микроорганизмов. Совместное культивирование исследуемых штаммов характеризовалось образованием четко выраженной границы, а также наложением *L. acidophilus* 9 на поверхность и *L. plantarum* 131, что свидетельствует о подавлении роста второй культуры. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что данные культуры не совместимы друг с другом.

Оценка биосовместимости штаммов свидетельствует о возможности составления многокомпонентных консорциумов с применением молочнокислых бактерий *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24.

Результаты проведенных исследований позволили составить комбинации штаммов, в которых будут отсутствовать явления антагонизма и конкуренции (таблица 25).

Таблица 25 – Состав и соотношение штаммов в разработанных консорциумах молочно-кислых бактерий

Номер консорциума	<i>L. casei</i> 32	<i>L. fermentum</i> 10	<i>L. plantarum</i> 24
Консорциум 1	1	1	1
Консорциум 2	2	1	1
Консорциум 3	1	2	1
Консорциум 4	1	1	2

Для изучения возможности применения разработанных консорциумов в технологии продуктов питания необходимо оценить их биотехнологические свойства.

Одним из основных параметров для отбора штаммов молочнокислых бактерий при производстве ферментированных продуктов питания является их кислотобразующая активность [37]. Экспериментальные исследования по изучению активности свертывания молока разработанными консорциумами молочнокислых бактерий показали, что консорциумы активно ферментируют молоко и образуют густые молочные сгустки, которые обладают однородной консистенцией, нежным вкусом и приятным кисломолочным запахом (таблица 26).

Таблица 26 – Оценка функционально-технологических свойств консорциумов

Характеристика	Консорциум 1	Консорциум 2	Консорциум 3	Консорциум 4
Активная кислотность, pH	4,1 ± 0,05	4,3 ± 0,05	4,6 ± 0,05	4,8 ± 0,05
Титруемая кислотность, °T	80 ± 3	79 ± 3	93 ± 3	99 ± 3
Предельная кислотность, °T	106 ± 3	102 ± 3	107 ± 3	110 ± 3
Количество жизнеспособных клеток, КОЕ/г	(8,3 ± 3)·10 ⁹	(9,2 ± 3)·10 ⁹	(6,7 ± 3)·10 ⁹	(10,2 ± 3)·10 ⁹
Характеристика молочного сгустка	Консистенция плотная, однородная, густая; вкус нежный, запах кисломолочный			

Через 7 сут инкубации образцы молока с добавлением консорциумов молочнокислых бактерий достигают предельной кислотности в диапазоне значений 102–110 °Т. Выявлено, что наиболее активным кислотообразователем является консорциум 4, содержащий штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24 в соотношении 1:1:2.

Для определения потенциального применения разработанных консорциумов в производстве продуктов питания были определены их биотехнологические свойства (таблица 27).

Таблица 27 – Биотехнологические свойства консорциумов

Характеристика	Консорциум 1	Консорциум 2	Консорциум 3	Консорциум 4
Амилолитическая активность, ед. акт/см ³	102,76 ± 0,98	102,36 ± 0,89	101,66 ± 0,95	104,25 ± 1,03
Протеолитическая активность, мкг тирозина/см ³ ·мин	9,09 ± 0,45	9,17 ± 0,45	9,21 ± 0,46	9,98 ± 0,49
Фитазная активность, ед/г	0,14 ± 0,03	0,14 ± 0,02	0,13 ± 0,03	0,18 ± 0,02
Антирадикальная активность, %	66,87 ± 0,03	69,70 ± 0,04	62,45 ± 0,04	68,45 ± 0,04
Восстанавливающая сила, %	43,43 ± 0,02	45,60 ± 0,03	42,38 ± 0,03	42,33 ± 0,02
Антагонистическая активность в отношении <i>Bacillus subtilis</i> , мм	21 ± 1	22 ± 1	19 ± 1	21 ± 1
Антагонистическая активность в отношении <i>Penicillium chrysogenum</i> , мм	12 ± 1	12 ± 1	13 ± 1	12 ± 1

В результате комплексного исследования биотехнологических свойств разработанных консорциумов молочнокислых бактерий установлено, что максимальную амилолитическую активность (104,25 ед. акт/см³) проявляет консорциум 4. Выявлено, что консорциум 4 характеризуется максимальным уровнем фитазной активности – 0,18 ед/г, что позволяет рекомендовать данный консорциум для ферментации диспергированной зерновой массы с целью снижения уровня фитатов в готовой хлебопекарной продукции, выработанной из цельного зерна.

Высокий уровень антиоксидантной активности консорциума 4 является важным преимуществом для его применения при производстве продуктов питания, так как может способствовать защите клеток и биологически активных молекул от

окислительного стресса, возникающего в процессе ферментации сырья и хранения готовой продукции.

Анализ антагонистической активности свидетельствует о том, что все разработанные консорциумы молочнокислых бактерий проявляют выраженную ингибирующую активность в отношении *Bacillus subtilis* и *Penicillium chrysogenum*, вызывающих картофельную болезнь и плесневение хлеба соответственно, что указывает на их перспективность в сохранении качества и увеличении срока хранения зернового хлеба.

Таким образом, результаты исследований показали, что штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24 продемонстрировали биосовместимость и синергетический рост при совместном культивировании. По результатам комплексной оценки биотехнологических свойств консорциумов установлено, что консорциум 4, содержащий штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24 в соотношении 1:1:2, проявил высокую кислотообразующую, ферментативную и антиоксидантную активность и может быть рекомендован для применения в производстве ферментированных продуктов питания как обладающий наибольшим практическим значением.

4.3 Изучение процесса ферментации диспергированной зерновой массы консорциумами молочнокислых бактерий

Продукты питания, выработанные из целого зерна, содержат большое количество полезных питательных веществ, однако часто их потенциал ограничен из-за низкой биодоступности некоторых соединений [73]. Одним из перспективных подходов к улучшению качества зерновых продуктов является применение контролируемой ферментации, в частности, с использованием консорциумов молочнокислых бактерий [3; 25; 49; 112]. Ферментация в хлебопечении влияет на структуру

теста, улучшая газообразующую способность, а также на органолептические показатели качества зернового хлеба. Лактобациллы, обладающие выраженной ферментативной активностью, способствуют протеканию биохимических изменений в белках, жирах и углеводах зерна, обеспечивая улучшение физико-химических и органолептических показателей качества зернового хлеба [52; 85; 87].

В работе изучали процесс ферментации диспергированной зерновой массы полбы консорциумами молочнокислых бактерий. Подготовку зерна осуществляли способом, описанным в параграфе 2.3. К измельченной зерновой массе добавляли разработанные консорциумы молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* и проводили ферментацию при температуре 37 °С, в процессе которой определяли динамику кислотонакопления и динамику количества жизнеспособных клеток (рисунок 16 и таблица 28).

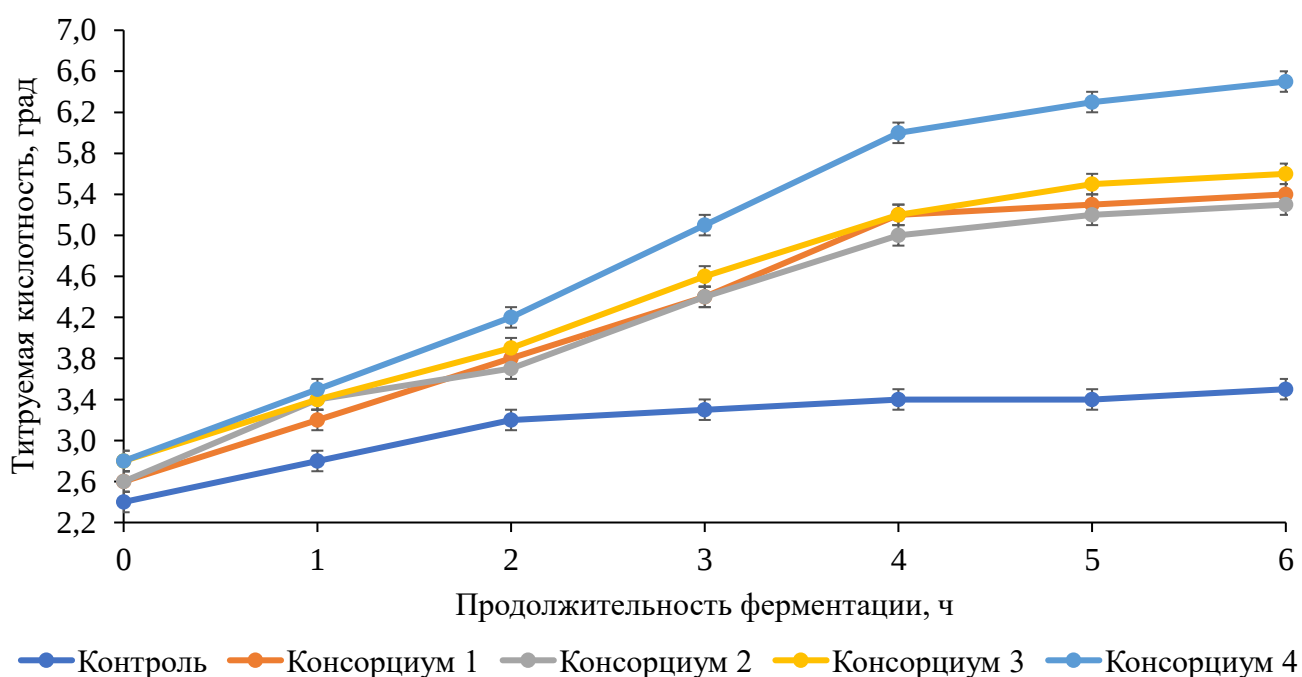


Рисунок 16 – Динамика кислотонакопления при ферментации диспергированной зерновой массы из полбы

Установлено, что активность кислотонакопления в диспергированной зерновой массе зависела от вида применяемого консорциума; к концу процесса ферментации титруемая кислотность достигала значений 5,3–6,5 град. Максимальная тит-

руемая кислотность (6,5 град) через 6 ч ферментации отмечалась у образцов с применением консорциума 4. Следует отметить, что при выдержке контрольных образцов (без добавления молочнокислых бактерий) при температуре 37 °С также наблюдалось накопление кислотности до значений 3,5 град, что, вероятно, объясняется развитием собственной микрофлоры зерна.

Таблица 28 – Изменение количества жизнеспособных клеток молочнокислых бактерий в процессе ферментации диспергированной зерновой массы, КОЕ/г

Образец	Продолжительность ферментации, ч			
	0	2	4	6
Контроль	$(9,28 \pm 5) \cdot 10^3$	$(7,28 \pm 4) \cdot 10^5$	$(11,20 \pm 4) \cdot 10^7$	$(1,58 \pm 4) \cdot 10^9$
Консорциум 1	$(12,44 \pm 3) \cdot 10^7$	$(12,48 \pm 3) \cdot 10^9$	$(11,28 \pm 5) \cdot 10^{10}$	$(4,24 \pm 5) \cdot 10^{13}$
Консорциум 2	$(21,21 \pm 6) \cdot 10^7$	$(9,15 \pm 4) \cdot 10^9$	$(2,26 \pm 3) \cdot 10^{10}$	$(3,32 \pm 3) \cdot 10^{13}$
Консорциум 3	$(13,12 \pm 3) \cdot 10^7$	$(6,04 \pm 5) \cdot 10^9$	$(15,84 \pm 6) \cdot 10^{10}$	$(15,6 \pm 5) \cdot 10^{13}$
Консорциум 4	$(14,48 \pm 3) \cdot 10^7$	$(15,61 \pm 6) \cdot 10^9$	$(17,84 \pm 6) \cdot 10^{10}$	$(32,8 \pm 6) \cdot 10^{13}$

Установлено, что все исследуемые консорциумы молочнокислых бактерий продемонстрировали хороший рост на диспергированной зерновой массе из полбы, и по истечении 6 ч ферментации количество жизнеспособных клеток достигало значений $(3,32-32,8) \cdot 10^{13}$ КОЕ/г. Наиболее активное накопление биомассы молочнокислых бактерий наблюдалось в течение 4 ч, затем скорость прироста биомассы замедлялась.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанные консорциумы молочнокислых бактерий могут применяться в качестве заквасок при производстве зернового хлеба. Выявлено, что наиболее высокую кислотообразующую активность и хороший рост на диспергированной зерновой массе проявляет консорциум 4, содержащий штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24 в соотношении 1:1:2.

4.4 Математическая оптимизация технологических параметров и рецептурного состава зернового хлеба из полбы на заквасках

На следующем этапе экспериментальной работы проводили математическую оптимизацию рецептурного состава хлеба, выработанного из ферментированной зерновой массы полбы.

Метод поверхностного отклика является инструментом оптимизации многофакторных процессов и позволяет эффективно моделировать зависимость выходного параметра от нескольких независимых переменных с использованием математических функций второго порядка. Визуализация поверхности отклика позволяет определить оптимальные значения факторов для достижения экстремума выходного показателя [60].

При планировании эксперимента исследовали взаимодействие следующих основных факторов, воздействующих на качество зернового хлеба из полбы: продолжительность процесса ферментации (X_1 , ч) и количество ферментированной зерновой массы (X_2 , %). Критериями оценки были выбраны пористость мякиша (Y_1 , %) и удельный объем хлеба (Y_2 , см³/100 г), которые являются наиболее значимыми показателями качества хлебобулочных изделий, влияющими на выбор потребителей.

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 29.

Таблица 29 – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Фактор в безразмерной системе координат			Фактор в натуральном выражении		Функция отклика	
	X_0	X_1	X_2	X_1 , ч	X_2 , %	Y_1 , %	Y_2 , см ³ /100 г
1	1	–1	–1	0	0	63,7	1,59
2	1	–1	–0,5	0	30	63,9	1,60
3	1	–0,5	–0,5	2	30	64,5	1,62
4	1	0	–0,5	4	30	64,9	1,66
5	1	0,5	–0,5	6	30	64,7	1,60
6	1	1	–0,5	8	30	64,2	1,57

Продолжение таблицы 29

Номер опыта	Фактор в безразмерной системе координат			Фактор в натуральном выражении		Функция отклика	
	X_0	X_1	X_2	$X_1, \text{ч}$	$X_2, \%$	$Y_1, \%$	$Y_2, \text{см}^3/100 \text{ г}$
7	1	-1	0	0	40	66,2	1,68
8	1	-0,5	0	2	40	68,5	1,80
9	1	0	0	4	40	68,9	1,91
10	1	0,5	0	6	40	68,2	1,88
11	1	1	0	8	40	67,4	1,80
12	1	-1	1	0	60	64,4	1,64
13	1	-0,5	1	2	60	65,7	1,69
14	1	0	1	4	60	66,1	1,78
15	1	0,5	1	6	60	65,9	1,72
16	1	1	1	8	60	65,3	1,67

Полученные экспериментальные данные были обработаны с помощью методов статистики.

При статистической обработке результатов эксперимента были получены уравнения регрессии для каждого параметра. Значения коэффициентов в регрессионной модели отражают влияние каждого фактора на изменение функции отклика. Полученные уравнения приведены в таблице 30.

Таблица 30 – Уравнения зависимостей параметров

Параметр	Уравнение регрессии
Пористость, %	$Y_1 = 41,98 - 7,21x_1 + 14,15x_2 + 15,64x_1x_2 + 23,60x_1^2 + 18,30x_2^2$
Удельный объем, $\text{см}^3/100 \text{ г}$	$Y_2 = 1,14 - 0,17x_1 + 0,40x_2 + 0,40x_1x_2 + 0,54x_1^2 + 0,44x_2^2$

Установлено, что показатели пористости и удельного объема зернового хлеба из полбы зависят от количества ферментированной зерновой массы и продолжительности процесса ферментации. Поверхности откликов, характеризующие зависимость прироста пористости и удельного объема хлеба от продолжительности процесса ферментации ($X_1, \text{ч}$) и количества ферментированной зерновой массы ($X_2, \%$) приведены на рисунке 17.

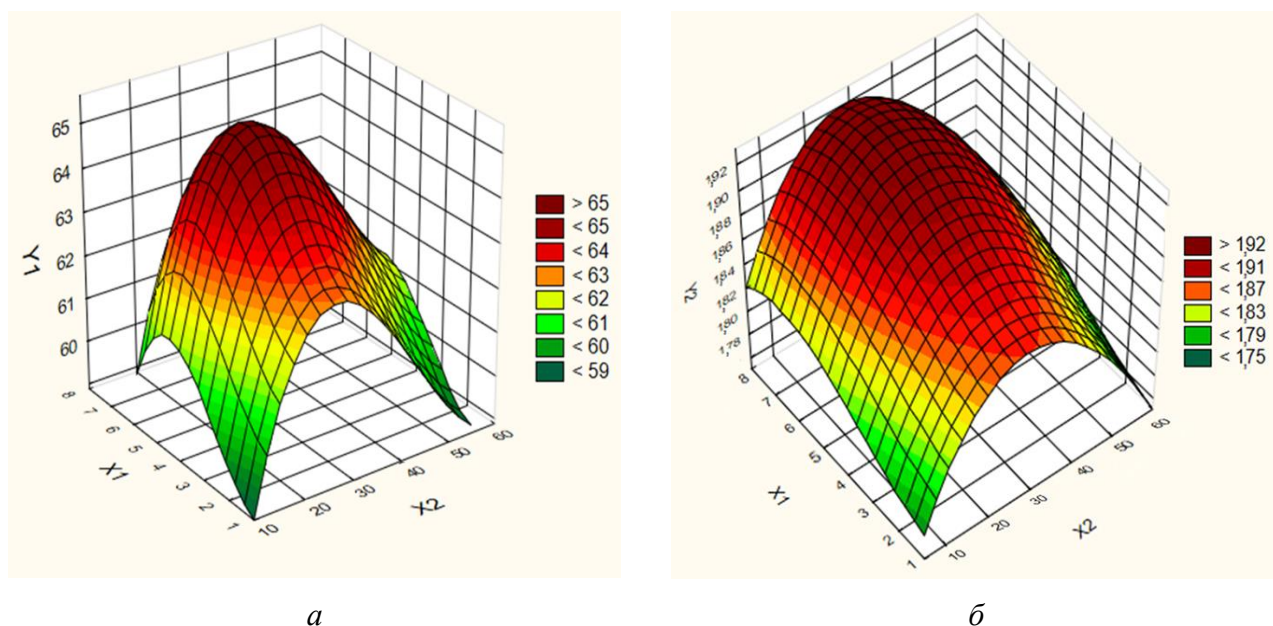


Рисунок 17 – Влияние параметров оптимизации на пористость мякиша (а) и удельный объем готовых изделий (б)

Оптимальные значения продолжительности процесса ферментации (X_1 , ч) и количества ферментированной зерновой массы (X_2 , %) для каждого параметра были определены с помощью программы Statistica и функции «Поиск решения» в MS Excel (таблица 31).

Таблица 31 – Оптимальные значения количества ферментированной зерновой массы и продолжительности процесса ферментации

Параметр	Оптимальное значение		Прогнозируемое значение параметра при $X_1 = 4$ ч, $X_2 = 40$ %
	X_1 , ч	X_2 , %	
Пористость, %	4,36	39,43	67,88
Удельный объем, см ³ /100 г	4,12	38,65	1,77

Математические модели позволили установить оптимальные технологические параметры тестоприготовления зернового хлеба из полбы с применением ферментированной зерновой массы: продолжительность процесса ферментации – 4 ч, количество ферментированной зерновой массы 40 %.

4.5 Исследование влияния ферментированной зерновой массы из полбы на качественные характеристики тестовых полуфабрикатов и зернового хлеба

Стадия приготовления теста является одним из важных этапов производства хлеба, так как свойства тестового полуфабриката оказывают влияние на его состояние при формовании, расстойке и выпечке и обуславливают конечные характеристики готовых изделий. Повышение качества тестовых полуфабрикатов играет особенно важную роль при производстве зернового хлеба, так как данные изделия характеризуются низкими показателями пористости, удельного объема, внешнего вида изделий [3; 8; 63].

В связи с этим для оптимизации показателей качества зернового хлеба необходимо учитывать эти особенности и совершенствовать технологию производства. Применение функционально-активных заквасок молочнокислых бактерий в рецептуре зернового хлеба из полбы является эффективным способом улучшения органолептических и физико-химических характеристики продукта. Активность лактобацилл при производстве хлеба обеспечивает разрыхление теста, ускоряет процесс брожения тестовых полуфабрикатов, а также способствует накоплению вкусовых и ароматических веществ в готовых изделиях [25; 29; 84; 112].

Целью данного этапа работы явилось исследование влияния ферментированной зерновой массы на качественные характеристики тестовых полуфабрикатов и готового зернового хлеба.

В технологии зернового хлеба из полбы разработанные консорциумы молочнокислых бактерий были использованы в качестве заквасок на этапе ферментации диспергированной зерновой массы.

Подготовку зерна, ферментацию зерновой массы, замес теста и выпечку изделий проводили в соответствии со способом и технологическими характеристиками, приведенными в параграфе 2.3. Процесс ферментации диспергированного

зерна осуществляли в течение 4 ч. В рецептуру вводили 40 % ферментированной зерновой массы.

В работе исследовали влияние ферментированной зерновой массы на качество тестовых полуфабрикатов. В процессе брожения оценивали динамику кислотонакопления и подъемную силу теста, результаты исследования представлены в таблице 32.

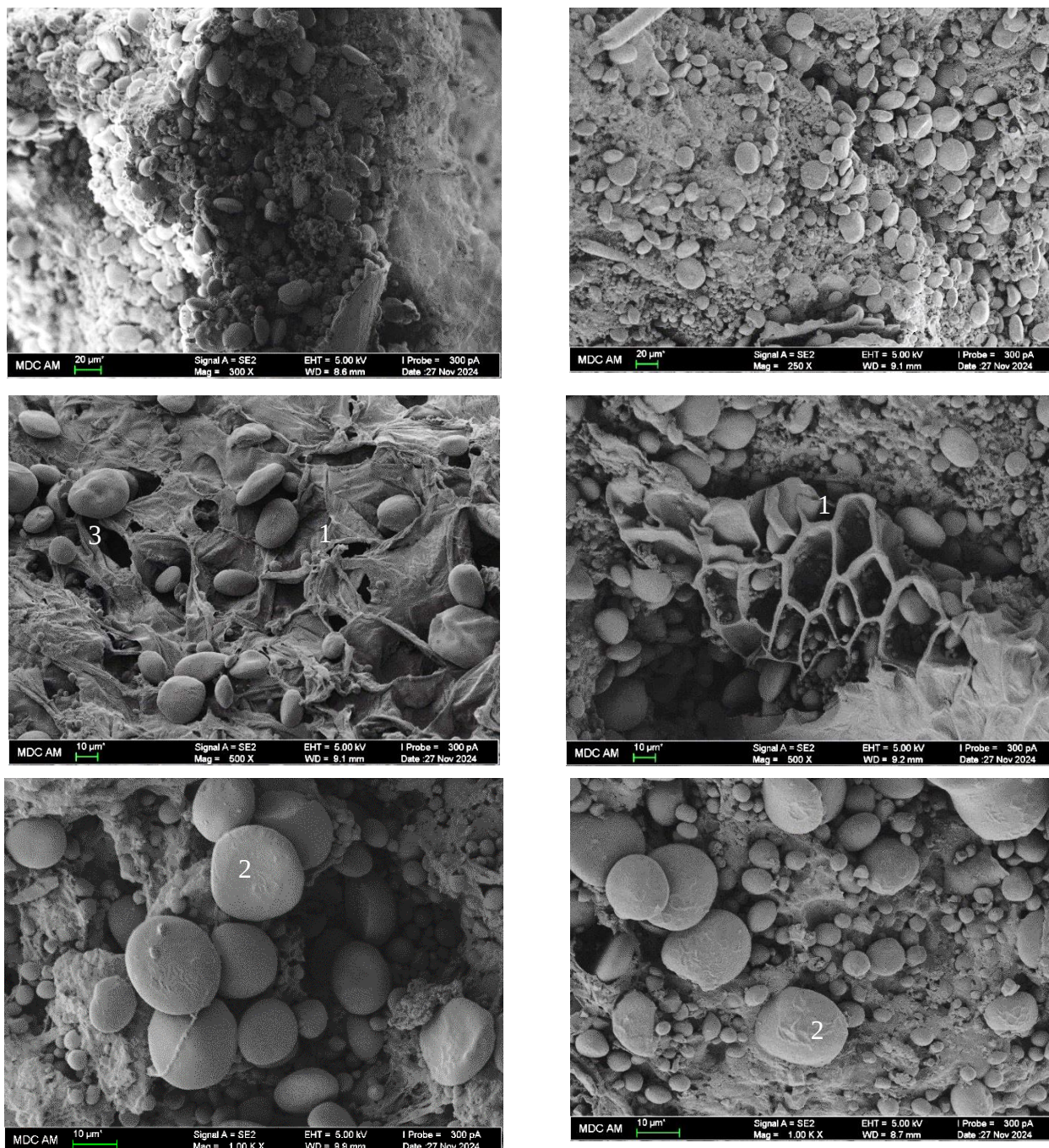
Таблица 32 – Показатели качества тестовых полуфабрикатов, изготовленных из ферментированного диспергированного зерна полбы

Показатель	Контроль	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Подъемная сила тестового полуфабриката, мин	$22 \pm 0,54$	$14 \pm 0,33$	$11 \pm 0,29$	$20 \pm 0,52$	$13 \pm 0,42$
Конечная кислотность тестового полуфабриката, град	$3,8 \pm 0,05$	$5,0 \pm 0,06$	$6,0 \pm 0,05$	$5,8 \pm 0,07$	$6,0 \pm 0,05$

Сравнение значений подъемной силы тестовых полуфабрикатов показало, что применение заквасок молочнокислых бактерий в технологии зернового хлеба стимулирует жизнедеятельность хлебопекарных дрожжей и, как следствие, увеличивает газообразование в тесте по сравнению с контрольным образцом. Скорость всплытия шариков тестовых полуфабрикатов, выработанных из ферментированной зерновой массы, в среднем 1,5–2 раза больше по сравнению с контролем.

Кислотность тестового полуфабриката является показателем его готовности к разделке. Специалисты считают, что процесс брожения теста целесообразно заканчивать по достижении его кислотности 5,5 град. Установлено, что в процессе брожения образцов теста с применением всех исследуемых заквасок кислотность полуфабрикатов достигала значений 5,0–6,0 град уже через 60 мин от начала брожения, благодаря чему продолжительность брожения в среднем сократилась на 30 мин по сравнению с контрольным образцом. Максимальный эффект наблюдался в образцах с применением закваски 2 и 4, кислотность которых составляет 6,0 град.

Проведена электронная микроскопия теста, позволяющая исследовать его внутреннюю структуру на наноуровне. Эксперимент проводился на двух образцах: контроль и образец, выработанный из ферментированной зерновой массы. Результаты приведены на рисунке 18.



a – контроль

б – опыт

Рисунок 18 – Микроструктура тестового полуфабриката:
1 – структура клейковины; 2 – крахмальное зерно; 3 – воздушная полость

Микроструктура теста представляет собой сложную систему, состоящую из белковых нитей клейковины, крахмальных зерен и воздушных полостей. Установлено, что применение заквасок молочнокислых бактерий в технологии зернового хлеба из полбы влияет на внутреннюю структуру теста. Тесто характеризуется развитой пористой структурой, а также отличается уменьшенными размерами крахмальных зерен. Набухание крахмальных зерен влияет на водопоглощение и эластичность теста, а также способствует формированию текстуры мякиша хлеба, определяет его влажность и плотность.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют, что внедрение стадии молочнокислой ферментации диспергированной зерновой массы из полбы интенсифицирует процесс брожения тестовых полуфабрикатов и улучшает их качество.

Далее проводили исследование влияния ферментированной зерновой массы полбы на качественные характеристики зернового хлеба.

Оценку органолептических показателей качества зернового хлеба из полбы, выработанного из ферментированной зерновой массы, проводили в соответствии со шкалой, представленной в диссертационной работе Н. Н. Алехиной [3]. Результаты представлены в таблицах 33 и 34.

Таблица 33 – Органолептическая оценка образцов зернового хлеба, балл

Образец	Внешний вид (форма, поверхность)	Цвет	Состояние мякиша	Запах	Вкус	Разжевываемость	Итого, балл
Коэффициент весомости	0,27	0,13	0,19	0,15	0,18	0,08	1
Контроль	3	5	3	4	4	4	3,67
Образец 1	3	5	4	5	5	5	4,27
Образец 2	5	5	5	5	4	5	4,82
Образец 3	3	5	4	5	4	5	4,09
Образец 4	4	5	5	5	5	5	4,73

Таблица 34 – Сравнительная оценка органолептических показателей качества зернового хлеба

Показатель	Контроль	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Внешний вид (форма, поверхность)	Форма немного расплывчатая, низкий объем изделия		Форма хлеба правильная, без трещин и подрывов, поверхность глянцевая	Форма немного расплывчатая, низкий объем изделия	Форма изделия правильная, поверхность практически глянцевая
Цвет	Окраска равномерная, светло-коричневая		Окраска равномерная, темно-коричневая	Окраска равномерная, коричневая	
Состояние мякиша (пористость, пропеченность, промес)	Пористость изделия неравномерная. Мякиш несколько уплотненный, влажный на ощупь.	Пористость изделия достаточно равномерная. Мякиш эластичный, слегка влажный на ощупь	Пористость изделия равномерная, хорошо развитая. Мякиш эластичный, слегка влажный на ощупь	Пористость изделия достаточно равномерная. Мякиш эластичный, слегка влажный на ощупь	Пористость равномерная, хорошо развитая. Мякиш эластичный, слегка влажный на ощупь
Запах	Приятный, свойственный данному виду изделия	Приятный, свойственный данному виду изделия, ясно выраженный			
Вкус	Свойственный изделию, выраженный	Свойственный изделию, ярко-выраженный	Свойственный изделию, выраженный		Свойственный изделию, ярко-выраженный
Разжевываемость	Хорошо разжевывается, слегка влажноватый на вкус, ощущаются легко разжевываемые частицы измельченного зерна	Хорошо разжевывается, ощущаются легко разжевываемые частицы измельченного зерна			

Результаты органолептической оценки показывают, что опытные образцы, выработанные из ферментированной зерновой массы, обладают лучшими характеристиками по сравнению с контрольным образцом. Наиболее высокую итоговую оценку по совокупности показателей получили образцы 2 и 4.

Зерновой хлеб, выработанный с применением заквасок, характеризуется улучшенными вкусовыми и ароматическими характеристиками, более равномерной и развитой пористостью изделий. Введение стадии молочнокислой ферментации зерновой массы оказывает влияние на состояние мякиша, делая его более эластичным, а цвет готовых изделий характеризуется как более темный и варьирует от коричневого до темно-коричневого в зависимости от применяемой закваски.

Физико-химические показатели качества зернового хлеба из полбы приведены в таблице 35.

Таблица 35 – Физико-химические показатели качества зернового хлеба из полбы

Показатель	Контроль	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Влажность, %	$46,5 \pm 0,3$	$47,6 \pm 0,3$	$48,1 \pm 0,5$	$47,6 \pm 0,3$	$48,0 \pm 0,3$
Кислотность, град	$4,0 \pm 0,1$	$4,4 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,1$	$4,2 \pm 0,1$	$4,4 \pm 0,2$
Пористость, %	$45,6 \pm 0,7$	$49,7 \pm 0,6$	$49,8 \pm 0,6$	$49,9 \pm 0,6$	$51,6 \pm 0,7$
Удельный объем, см ³ /г	$1,60 \pm 0,03$	$1,51 \pm 0,02$	$1,98 \pm 0,02$	$1,60 \pm 0,03$	$1,91 \pm 0,02$
Упек, %	$12,2 \pm 0,3$	$11,8 \pm 0,2$	$11,5 \pm 0,2$	$12,7 \pm 0,2$	$13,9 \pm 0,3$
Усушка, %	$5,6 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,1$	$3,6 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,3$

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что внесение заквасок молочнокислых бактерий в образцах 2 и 4 позволяет значительно увеличить удельный объем готового хлеба, который положительно влияет на внешний вид изделия и делает его более презентабельным для потребителей.

Установлено, что применение закваски 4 при производстве зернового хлеба из полбы позволяет увеличить пористость мякиша на 6 %, удельный объем хлеба – на 19 %.

Упек хлеба обуславливается тем, что в процессе выпекания под действием температуры удаляется влага и обезвоживается корка. Результаты, представленные

в таблице 34, демонстрируют, что данный показатель варьирует от 11,53 % до 13,91 %, что находится в пределах допустимого диапазона (6–14 %).

Величина усушки может быть косвенным параметром степени черствения мякиша, так как он является показателем уменьшения массы хлеба в процессе хранения за счет испарения влаги с поверхности корки. Анализ полученных данных свидетельствует о снижении уровня усушки у образцов, выработанных из ферментированной зерновой массы, по сравнению с контролем в среднем на 31,4 %.

Установлено, что кислотность опытных образцов незначительно выше по сравнению с контролем и находится в диапазоне 4,2–4,4 град. На рисунке 19 представлены данные о содержании летучих и нелетучих кислот в готовом хлебе. Выявлено, что применение ферментированной зерновой массы позволяет увеличить количество летучих кислот в хлебе по сравнению с контролем: в образцах 1 и 4 – в четыре раза, а в образцах 2 и 3 – в три раза. Наличие летучих кислот в хлебе характеризует формирование вкусовых и ароматических характеристик готовых изделий, следовательно, данный показатель подтверждает улучшенные органолептические показатели образцов хлеба, выработанных из ферментированной зерновой массы.

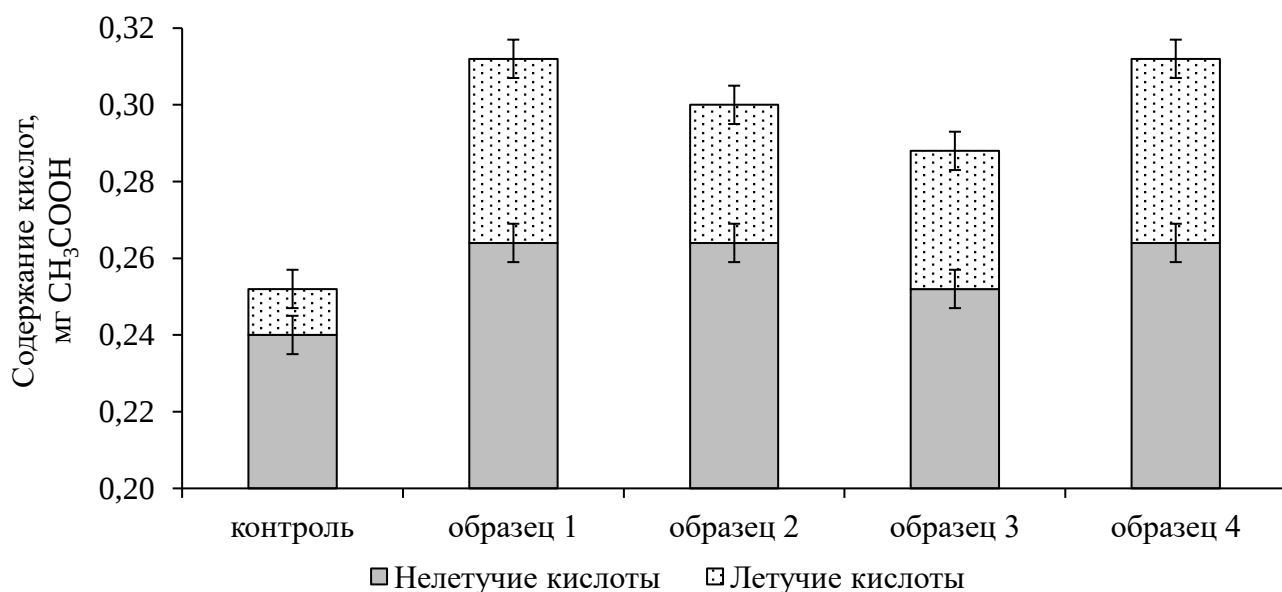
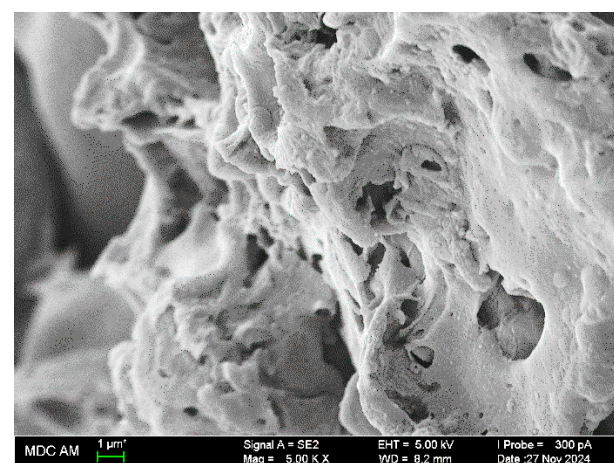
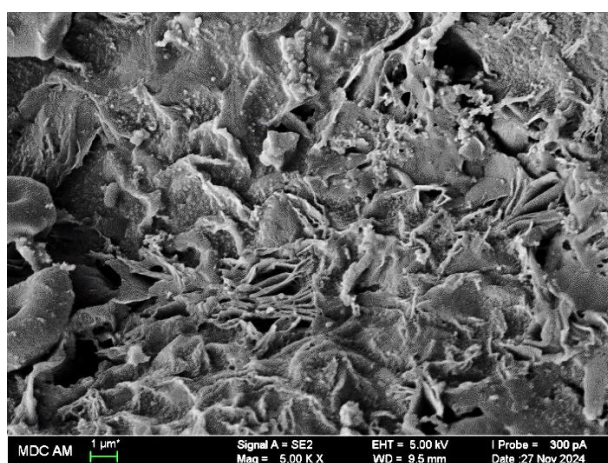
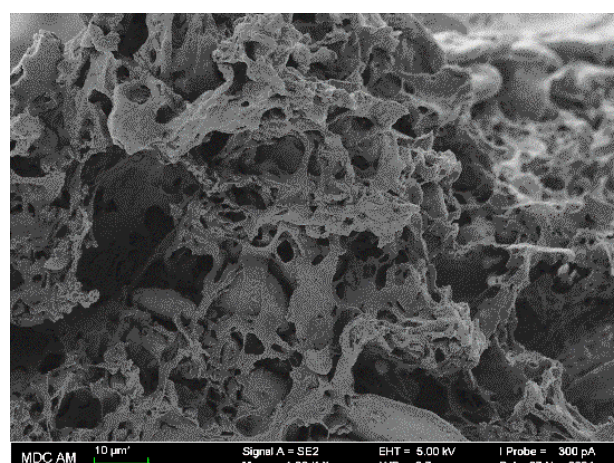
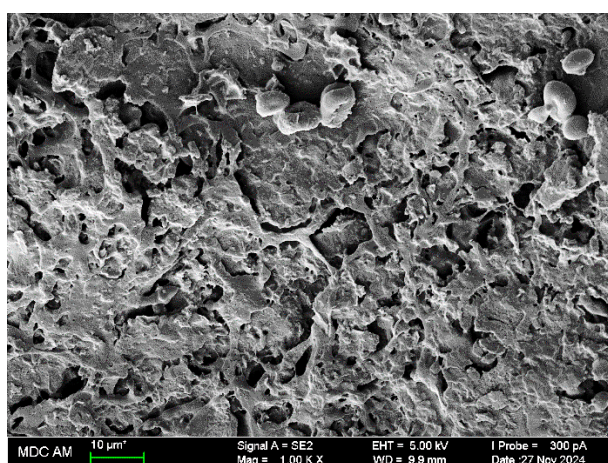


Рисунок 19 – Содержание летучих и нелетучих кислот в зерновом хлебе из полбы

Установлено, что готовые изделия, выработанные из ферментированной зерновой массы, обладают улучшенными показателями пористости мякиша: самым высоким значением пористости (51,6 %) отличается зерновой хлеб из полбы, приготовленный с применением закваски 4.

Результаты исследования структуры образцов хлеба (контроль и образец, выработанный из ферментированной зерновой массы) методом электронной сканирующей микроскопии приведены на рисунке 20. Данный метод позволяет детально изучить пористость мякиша хлеба, размер и форму пор, структуру белковой матрицы. Установлено, что мякиш образцов хлеба, выработанных из ферментированной зерновой массы полбы, характеризуется более губчатой структурой и имеет более крупные поры в сравнении с контролем.



a – контроль

б – опыт

Рисунок 20 – Микроструктура зернового хлеба

В работе проводили исследование структурно-механических свойств образцов зернового хлеба из полбы (контроль и образец, выработанный из ферментированной зерновой массы). Результаты исследований приведены в таблице 36.

Таблица 36 – Структурно-механические свойства зернового хлеба из полбы

Образец	Деформационные характеристики мякиша*, мм						Анализ профиля текстуры				
	Усиление 500 г			Усиление 5000 г			Твердость, г	Упругость, %	Когезия, %	Пережевываемость, г	Липкость, г
	$H_{\text{общ}}$	$H_{\text{пл}}$	$H_{\text{упр}}$	$H_{\text{общ}}$	$H_{\text{пл}}$	$H_{\text{упр}}$					
Контроль	4,570	1,954	2,616	16,836	7,031	9,805	629,2	80,16	84,41	425,74	531,11
Опыт	7,422	3,922	3,500	18,875	9,071	9,804	619,8	81,26	82,99	417,98	514,37
Примечание – Характеристики: $H_{\text{общ}}$ – общая деформация; $H_{\text{пл}}$ – пластическая деформация; $H_{\text{упр}}$ – упругая деформация.											

Деформационные характеристики мякиша хлеба описываются комплексом реологических параметров, отражающих его механическое поведение под воздействием внешних сил. Анализ данных о деформации образцов мякиша хлеба указывает на то, что хлеб, выработанный из ферментированной зерновой массы, продемонстрировал значительно бóльшую общую деформацию (7,422 мм) по сравнению с контрольным образцом (4,570 мм), что указывает на его более мягкую текстуру. Пластическая деформация опытного образца превышала значение контрольного образца более чем в два раза (3,922 и 1,954 мм соответственно), свидетельствуя о том, что мякиш обладает высокой пластичностью, благодаря чему хлеб не крошится и сохраняет форму. Упругая деформация мякиша хлеба у опыта была выше на 34 % по сравнению с контролем. Это указывает на то, что опытный образец обладает большей способностью восстанавливать свою форму после деформации, а следовательно, характеризуется более эластической и мягкой текстурой по сравнению с контрольным образцом. Реологическое исследование мякиша хлеба позволило установить, что применение ферментированной зерновой массы способствует улучшению деформационных характеристик образца.

Результаты анализа профиля текстуры образцов мякиша хлеба указывают на то, что образец, выработанный из ферментированной зерновой массы, обладал низким показателем твердости (619,8 г) в сравнении с контролем (629,2 г), что также подтверждает более мягкую текстуру мякиша. Отмечается, что опытный образец отличается улучшенными показателями упругости по сравнению с контролем, что указывает на лучшую способность образца восстанавливать форму после деформации. Значение показателя пережевываемости в опытном образце (417,98 г) несколько ниже, чем в контроле (425,74 г), что означает, что при его разжевывании необходимо прилагать меньшее усилие.

Полученные результаты свидетельствуют об улучшении структурно-механических свойств хлеба, выработанного из ферментированной зерновой массы, и подтверждают данные, полученные в результате оценки органолептических показателей качества зернового хлеба.

В ходе органолептической оценки готовых изделий отмечено, что применение ферментированной зерновой массы в технологии зернового хлеба влияет на цвет корки хлеба. Изучение цветовых характеристик экспериментальных образцов показало, что образцы, выработанные с применением ферментированной зерновой массы, обладают более высоким значением насыщенности цвета корки изделия. Наибольшее изменение насыщенности цвета корки хлеба наблюдается у образцов с применением заквасок 2 и 4 (таблица 37).

Таблица 37 – Цветовые характеристики готовых изделий

[illegible]

В процессе хранения зерновой хлеб может подвергаться микробиологической порче. Применение молочнокислых бактерий при производстве хлеба приводит к замедлению роста и развитию неблагоприятной микрофлоры. В связи с этим было проведено исследование влияния ферментированной зерновой массы на микробиологические показатели зернового хлеба в процессе хранения. Изделия хранили в полиэтиленовых пакетах при температуре $(18 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Результаты исследования представлены в таблице 38.

Таблица 38 – Изменение микробиологических показателей зернового хлеба в процессе хранения

Образец	Через 24 ч хранения			Через 72 ч хранения		
	КМАФАнМ, КОЕ/г	Плесневые грибы, КОЕ/г	Дрожжи, КОЕ/г	КМАФАнМ, КОЕ/г	Плесневые грибы, КОЕ/г	Дрожжи, КОЕ/г
Контроль	$4,9 \cdot 10^2$	Не обнаружены	Менее 10	$6,7 \cdot 10^2$	Менее 10	Менее 10
Образец 1	$2,8 \cdot 10^2$		Менее 10	$3,2 \cdot 10^2$	Не обнаружены	Менее 10
Образец 2	$2,3 \cdot 10^2$		Менее 10	$3,9 \cdot 10^2$		Менее 10
Образец 3	$3,2 \cdot 10^2$		Менее 10	$4,2 \cdot 10^2$		Менее 10
Образец 4	$1,6 \cdot 10^2$		Менее 10	$2,8 \cdot 10^2$		Менее 10

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что образцы, выработанные с применением ферментированной зерновой массы, характеризовались более низкой микробной обсемененностью по сравнению с контрольным вариантом. Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов в процессе хранения в опытных образцах изделий ниже по сравнению с контролем. Плесневые грибы не были обнаружены на протяжении всего срока хранения зернового хлеба. Это связано с тем, что применяемые молочнокислые бактерии обладают высокой антагонистической активностью по отношению к патогенным и условно-патогенным бактериям, а также грибам и дрожжам (см. таблицы 20 и 21).

Также в работе проведена оценка появления признаков плесневения при хранении зернового хлеба из полбы (таблица 39).

Таблица 39 – Признаки возникновения плесневения при хранении зернового хлеба из полбы

Образец	Продолжительность хранения, ч						
	0	24	48	72	98	120	144
Контроль	–	–	–	±	+	+	+
Образец 1	–	–	–	–	–	±	+
Образец 2	–	–	–	–	–	±	+
Образец 3	–	–	–	–	–	±	+
Образец 4	–	–	–	–	–	±	+
Примечание – Признаки плесневения: «–» – отсутствуют; «±» – присутствует запах плесневения, колонии отсутствуют; «+» – присутствуют ярко-выраженный запах плесневения и колонии.							

Установлено, что первые признаки плесневения при хранении зернового хлеба из полбы у контрольного образца появились спустя 72 ч, а в образцах с применением заквасок – спустя 120 ч. По истечении 144 ч на всех образцах были обнаружены признаки плесневения, характеризующиеся специфическим запахом и наличием колоний на поверхности корки изделия.

Выявлено, что образцы зернового хлеба, выработанные с применением ферментированной зерновой массы, характеризуются более низкой микробной обсемененностью, что позволяет увеличить сроки хранения готовых изделий в 1,5 раза.

Таким образом, установлено, что применение заквасок молочнокислых бактерий позволяет получать зерновой хлеб с улучшенными показателями качества. Характерно, что образцы, выработанные с применением ферментированной зерновой массы, обладают улучшенными вкусовыми и ароматическими характеристиками, имеют увеличенный удельный объем и обладают более развитой пористостью. Выявлено, что при использовании заквасок молочнокислых бактерий улучшается микробиологическая чистота зернового хлеба из полбы, что способствует увеличению продолжительности его хранения. Высокий уровень ферментативной активности молочнокислых бактерий оказывает комплексное воздействие на качество конечного продукта, обеспечивая улучшение структуры и текстуры мякиша за счет гидролиза крахмальных гранул и белков глютена, формирование уникального

аромата и вкуса, повышение пищевой ценности, а также способствует увеличению сроков годности готовых изделий.

Установлено, что по совокупности показателей наиболее перспективной закваской для применения в технологии зернового хлеба из полбы является закваска 4, которая содержит в своем составе штаммы *L. fermentum* 10, *L. casei* 32, *L. plantarum* 24 в соотношении 1:1:2.

5 Разработка технологии зернового хлеба из полбы на заквасках

Производство качественных и конкурентоспособных продуктов питания требует комплексного подхода, включающего разработку оптимальной рецептуры, оценку пищевой ценности, а также детальное изучение технологических аспектов и экономической эффективности производства.

Целью данного этапа работы является обоснование перспективности внедрения разработанной технологии зернового хлеба из полбы на заквасках, основанное на анализе ее потенциала для получения продукта с высокими потребительскими свойствами и экономической целесообразностью.

5.1 Разработка рецептуры и технологии зернового хлеба

На основе результатов проведенных исследований разработаны рецептура и технологический режим производства зернового из полбы с применением ферментированной зерновой массы (таблица 40).

Таблица 40 – Рецептура и технологический режим приготовления зернового хлеба из полбы на заквасках

Наименование сырья и полуфабрикатов	Расход, кг	Показатель процесса	Значение
Зерно полбы	100/154,00*	Влажность, %	Не более 50
Мука полбяная цельнозерновая	48,00	Продолжительность, мин: – брожения – расстойки – выпечки	60 30–40 40–50
Соль пищевая	3,20		
Дрожжи хлебопекарные прессованные	4,11		
Закваска молочнокислых бактерий	1,0	Температура, °С: – расстойки – выпечки	38 ± 1 220
Вода питьевая	По расчету		
Примечание – * Масса ферментированной зерновой массы.			

Разработана принципиальная схема производства зернового хлеба из полбы с применением ферментированной зерновой массы (рисунок 21). Представленная схема включает стадию ферментации диспергированной зерновой массы, которая проводится перед этапом замеса теста.



Рисунок 21 – Принципиальная схема производства зернового хлеба из полбы с применением стадии ферментации зерновой массы заквасками МКБ

На рисунке 22 представлена аппаратурно-технологическая схема производства зернового хлеба из полбы, включающая основное оборудование, применяемое в разработанной технологии.

Для производства зернового хлеба по разработанной технологии предусматриваются установка для замачивания, диспергирующая машина, а также дежа, в которой осуществляется ферментация диспергированной зерновой массы закваской молочнокислых бактерий.

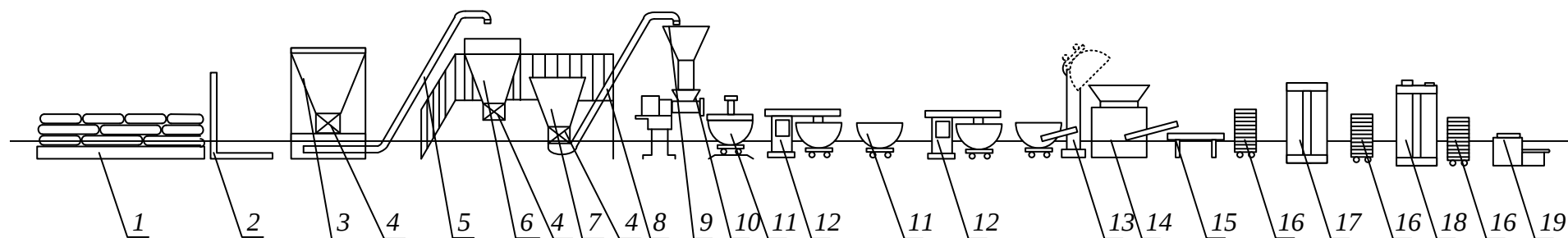


Рисунок 22 – Аппаратурно-технологическая схема производства зернового хлеба из полбы на заквасках:

1 – поддон для хранения зерна; 2 – напольные весы; 3 – загрузочная воронка; 4 – крыльчатый питатель; 5 – гибкий шнек; 6 – установка для замачивания зерна; 7 – загрузочная воронка; 8 – ковшовый элеватор; 9 – распределительная воронка; 10 – диспергирующая машина; 11 – дежа; 12 – тестомесильная машина; 13 – дежеподъемоопрокидыватель; 14 – тестоделительная машина; 15 – стол; 16 – вагонетка; 17 – расстоечный шкаф; 18 – хлебопекарная печь; 19 – упаковочная машина

При производстве зернового хлеба на первом этапе зерно полбы предварительно очищают от сорной и зерновой примеси, промывают и выдерживают в питьевой воде до набухания при температуре 18–20 °С в течение 20–24 ч, периодически меняя воду. Затем зерно снова промывают, сливают воду, зерно подвергают проращиванию в течение 10–12 ч до появления ростков размером не более 1,5 мм и пропускают через измельчитель с диаметром отверстий 2 мм. После измельчения к зерновой массе добавляют закваску, состоящую из молочнокислых бактерий *Lactobacillus casei* 32, *Lactobacillus fermentum* 10, *Lactobacillus plantarum* 24, взятых в массовом соотношении 1:1:2, в количестве 1 % к массе зерна и проводят ферментацию в течение 4 ч с получением ферментированной зерновой массы. Затем добавляют муку полбяную цельнозерновую, раствор пищевой соли, суспензию прессованных дрожжей и питьевую воду. В процессе приготовления последовательно реализуют следующие этапы: замес, брожение, формование, расстойка тестового полуфабриката и выпечка зернового хлеба.

По результатам исследований разработаны технические условия на закваску молочнокислых бактерий для зерновых сортов хлеба (приложение А), получен патент РФ на способ получения зернового хлеба № 2829513 (приложение Б), разработана нормативно-техническая документация: технические условия, технологическая инструкция и рецептура на зерновой хлеб «Борай» (приложение В).

Опытно-промышленная апробация способа приготовления зернового хлеба «Борай» проведена в условиях пекарни малой мощности (ИП Рамеев Р. Р.) в г. Набережные Челны (акт производственных испытаний от 1 февраля 2024 г., приложение Г).

Материалы диссертации используются в образовательном процессе кафедры технологии пищевых производств ФГБОУ ВО «КНИТУ» при подготовке студентов (приложение Д).

5.2 Изучение хранимospособности ферментированной зерновой массы из полбы

Применение ферментированной зерновой массы при производстве зернового хлеба позволяет улучшить вкус, аромат и структуру готовых изделий. Однако важно понимать, что для внедрения стадии ферментации диспергированной зерновой массы требуется дополнительное оборудование и время на данный технологический этап производства. В связи с этим для оптимизации производственного процесса предлагается предусмотреть применение ферментированной зерновой массы в виде охлажденного или замороженного полуфабриката.

Важным критерием для оптимизации процесса производства зернового хлеба является продолжительность хранения охлажденного или замороженного полуфабриката и сохранение функционально-технологических свойств ферментированной зерновой массы из полбы.

Прежде всего необходимо установить предельные сроки хранения охлажденного полуфабриката. К диспергированной зерновой массе добавляли закваску, содержащую штаммы *Lactobacillus casei* 32, *Lactobacillus fermentum* 10, *Lactobacillus plantarum* 24 в соотношении 1:1:2, проводили ферментацию в течение 4 ч, затем полуфабрикат хранили в условиях холодильной камеры при температуре $(2 \pm 2)^\circ\text{C}$. В процессе хранения исследовали функционально-технологические свойства и микробиологические показатели охлажденной ферментированной зерновой массы. Результаты представлены в таблице 41.

Установлено, что в процессе хранения охлажденного полуфабриката в течение первых 4 сут наблюдается увеличение титруемой кислотности ферментированной зерновой массы полбы с 5,8 до 6,1 град. На начальном этапе хранения отмечается рост числа клеток молочнокислых бактерий, достигающий $10,7 \cdot 10^9$ КОЕ/г на 5-е сутки, после чего происходит постепенное снижение численности до $7,9 \cdot 10^9$ КОЕ/г на 9-е сутки хранения.

Таблица 41 – Функционально-технологические свойства и микробиологические показатели охлажденного полуфабриката

Продолжительность хранения, сут	Титруемая кислотность, град	Количество МКБ, КОЕ/г	КМАФАнМ, КОЕ/г	Плесени, КОЕ/г	Дрожжи, КОЕ/г
1	$5,8 \pm 0,1$	$8,3 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{11}$	Не обнаружены	$15 \cdot 10^2$
2	$5,9 \pm 0,1$	$9,1 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^{11}$		$19 \cdot 10^2$
3	$6,0 \pm 0,1$	$9,5 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^{11}$		$23 \cdot 10^2$
4	$6,1 \pm 0,1$	$9,9 \cdot 10^9$	$13 \cdot 10^{11}$		$37 \cdot 10^2$
5	$6,1 \pm 0,1$	$10,7 \cdot 10^9$	$18 \cdot 10^{11}$		$56 \cdot 10^2$
6	$6,1 \pm 0,1$	$9,3 \cdot 10^9$	$22 \cdot 10^{11}$		$42 \cdot 10^2$
7	$6,1 \pm 0,1$	$8,5 \cdot 10^9$	$17 \cdot 10^{11}$		$10 \cdot 10^2$
8	$6,1 \pm 0,1$	$8,3 \cdot 10^9$	$15 \cdot 10^{11}$		$7 \cdot 10^2$
9	$6,1 \pm 0,1$	$7,9 \cdot 10^9$	$19 \cdot 10^{11}$		$2 \cdot 10^2$

Показано, что применение закваски молочнокислых бактерий для ферментации позволяет улучшить микробиологические показатели диспергированной зерновой массы: в процессе хранения количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов и дрожжей сохраняется на постоянном уровне, а плесени не обнаруживаются на протяжении всего срока хранения.

Представляло интерес оценить влияние продолжительности хранения ферментированной зерновой массы в охлажденном виде на показатели качества зернового хлеба из полбы. Результаты представлены в таблице 42.

Показано, что физико-химические показатели хлеба, выработанного из охлажденной ферментированной зерновой массы, сохраняются на первоначальном уровне в течение 5 сут хранения охлажденного полуфабриката. При увеличении сроков хранения ферментированной зерновой массы выработанный на ее основе зерновой хлеб характеризуется пониженными физико-химическими и органолептическими показателями качества. Установлено, что удельный объем уменьшается на 6,8 %, а пористость мякиша становится неравномерной и снижается на 3,9 %. Также отмечается, что вкус и запах изделий становится менее ярким и выраженным. В связи с этим рекомендуется хранить охлажденный полуфабрикат ферментированной зерновой массы в условиях холодильной камеры при $(2 \pm 2) ^\circ\text{C}$ не более 5 сут.

Таблица 42 – Показатели качества зернового хлеба, выработанного из охлажденного полуфабриката

Показатель	Продолжительность хранения, сут								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Влажность, %	48,6 ± 0,3	48,6 ± 0,3	48,5 ± 0,3	48,5 ± 0,3	48,5 ± 0,3	48,3 ± 0,3	48,8 ± 0,3	48,1 ± 0,3	48,1 ± 0,3
Кислотность, град	4,4 ± 0,1	4,4 ± 0,1	4,4 ± 0,1	4,4 ± 0,1	4,5 ± 0,1	4,5 ± 0,1	4,5 ± 0,1	4,6 ± 0,1	4,7 ± 0,1
Пористость, %	50,8 ± 0,3	50,5 ± 0,3	50,6 ± 0,3	50,4 ± 0,3	49,8 ± 0,3	49,8 ± 0,3	49,1 ± 0,3	48,8 ± 0,3	48,8 ± 0,3
Удельный объем, см³/г	1,89 ± 0,3	1,90 ± 0,2	1,88 ± 0,3	1,89 ± 0,3	1,88 ± 0,3	1,86 ± 0,3	1,87 ± 0,3	1,81 ± 0,3	1,76 ± 0,3
Внешний вид (форма, поверхность)	Форма хлеба правильная, поверхность гладкая ровная, без трещин и разрывов					Форма хлеба правильная, низкий объем изделия. На верхней корке трещины			
Цвет	Окраска изделия равномерная, коричневая								
Состояние мякиша	Пористость изделия равномерная, развитая. Мякиш эластичный					Пористость изделия неравномерная			
Вкус и запах	Приятный, ярко-выраженный, свойственный зерновому хлебу, без постороннего привкуса и запаха					Невыраженный, без постороннего привкуса и запаха			

В целях определения предельных сроков хранения замороженного полуфабриката к диспергированной зерновой массе добавляли закваску, содержащую штаммы *Lactobacillus casei* 32, *Lactobacillus fermentum* 10, *Lactobacillus plantarum* 24 в соотношении 1:1:2, проводили ферментацию в течение 4 ч, а затем замораживали полуфабрикат в холодильной камере шоковой заморозки при температуре $(-30 \pm 2) ^\circ\text{C}$ с последующим хранением в условиях морозильной камеры при температуре $(-18 \pm 2) ^\circ\text{C}$. В процессе хранения исследовали функционально-технологические свойства и микробиологические показатели замороженного полуфабриката ферментированной зерновой массы. Результаты представлены в таблице 43.

Таблица 43 – Функционально-технологические свойства и микробиологические показатели замороженного полуфабриката в процессе хранения

Показатель	Продолжительность хранения, нед.					
	1	2	3	4	5	6
Титруемая кислотность, град	$6,0 \pm 0,1$	$5,9 \pm 0,1$	$5,7 \pm 0,1$	$5,6 \pm 0,1$	$5,3 \pm 0,1$	$5,1 \pm 0,1$
Количество МКБ, КОЕ/г	$8,6 \cdot 10^9$	$9,3 \cdot 10^9$	$9,1 \cdot 10^9$	$8,6 \cdot 10^9$	$7,7 \cdot 10^9$	$7,2 \cdot 10^9$
КМАФАнМ, КОЕ/г	$1,5 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^7$	$0,8 \cdot 10^7$
Плесени, КОЕ/г	Не обнаружены					
Дрожжи, КОЕ/г	$10 \cdot 10^2$	$12 \cdot 10^2$	$11 \cdot 10^2$	$14 \cdot 10^2$	$17 \cdot 10^2$	$19 \cdot 10^2$

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что через 6 недель хранения титруемая кислотность замороженной ферментированной зерновой массы снижается на 8,5 %, а количество молочнокислых бактерий – на 12,5 %. Отмечается, что в процессе хранения количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов и дрожжей сохраняется на прежнем уровне. Плесени не обнаруживаются на протяжении всего срока хранения замороженного полуфабриката.

Далее исследовали влияние продолжительности хранения ферментированной зерновой массы в замороженном виде на показатели качества зернового хлеба из полбы. Результаты представлены в таблице 44.

Таблица 44 – Показатели качества зернового хлеба, выработанного из замороженного полуфабриката

Показатель	Продолжительность хранения, нед.					
	1	2	3	4	5	6
Влажность, %	48,6 ± 0,3	48,6 ± 0,3	48,5 ± 0,3	48,5 ± 0,3	48,5 ± 0,3	48,3 ± 0,3
Кислотность, град	4,5 ± 0,1	4,5 ± 0,1	4,5 ± 0,1	4,5 ± 0,1	4,6 ± 0,1	4,6 ± 0,1
Пористость, %	49,8 ± 0,3	49,6 ± 0,3	49,6 ± 0,3	48,8 ± 0,3	48,6 ± 0,3	48,5 ± 0,3
Удельный объем, см³/г	1,86 ± 0,3	1,83 ± 0,2	1,80 ± 0,3	1,74 ± 0,3	1,69 ± 0,3	1,66 ± 0,3
Внешний вид (форма, поверхность)	Форма хлеба правильная, поверхность гладкая ровна, без трещин и разрывов			Форма хлеба правильная, низкий объем изделия. На верхней корке трещины		
Цвет	Окраска изделия равномерная, коричневая					
Состояние мякиша	Пористость изделия равномерная, развитая. Мякиш эластичный			Пористость изделия неравномерная, мякиш плотный		
Вкус и запах	Приятный, ярко-выраженный, свойственный зерновому хлебу, без постороннего привкуса и запаха			Невыраженный, без постороннего привкуса и запаха		

Результаты исследований свидетельствуют о том, что влажность и кислотность хлеба, выработанного из замороженной ферментированной зерновой массы, существенно не изменяются в течение 4 недель хранения полуфабриката. Через 3 недели хранения зерновой массы в замороженном виде отмечается снижение показателя пористости на 2 %, удельного объема – на 6,4 %. Хлеб характеризуется низкими показателями объема, отмечается наличие трещин на поверхности верхней корки, неравномерная пористость и уплотнение мякиша. В связи с этим рекомендуется хранить замороженный полуфабрикат (ферментированную зерновую массу) в условиях морозильной камеры (-18 ± 2) °С не более 3 недель.

Таким образом, разработаны рекомендации по хранению ферментированной зерновой массы из полбы: сроки хранения составляют 5 и 21 сут при температуре (2 ± 2) °С и (-18 ± 2) °С соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение замороженных полуфабрикатов ферментированной зерновой массы является перспективным подходом к оптимизации технологического процесса производства зернового хлеба, позволяющим исключить стадию ферментации в технологическом цикле.

Разработана принципиальная схема производства полуфабриката ферментированной зерновой массы из полбы (рисунок 23).

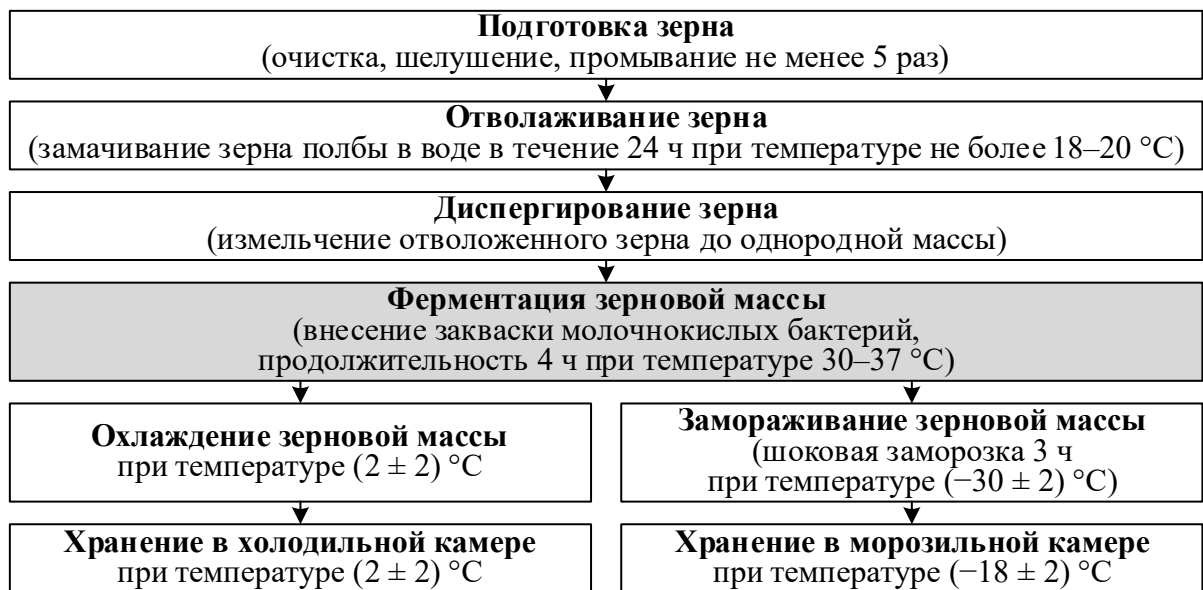


Рисунок 23 – Принципиальная схема производства охлажденного и замороженного полуфабрикатов

На рисунке 24 представлена аппаратурно-технологическая схема производства замороженного полуфабриката ферментированной зерновой массы из полбы.

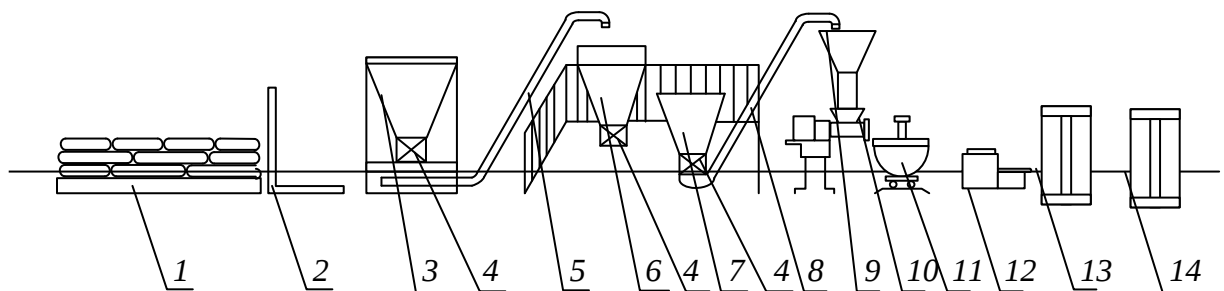


Рисунок 24 – Аппаратурно-технологическая схема производства замороженного полуфабриката:

1 – поддон для хранения зерна; 2 – напольные весы; 3 – загрузочная воронка; 4 – крыльчатый питатель; 5 – гибкий шнек; 6 – установка для замачивания зерна; 7 – загрузочная воронка; 8 – ковшовый элеватор; 9 – распределительная воронка; 10 – диспергирующая машина; 11 – дежа; 12 – упаковочная машина; 13 – камера шоковой заморозки; 14 – морозильная камера

Данная схема включает основное оборудование, применяемое в разработанной технологии. В предложенной схеме диспергированная зерновая масса после

стадии ферментации замораживается в холодильной камере шоковой заморозки при температуре $(-30 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и затем отправляется на хранение в условиях морозильной камеры при температуре $(-18 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Применение охлажденных и замороженных полуфабрикатов позволяет снизить затраты на производство зернового хлеба из полбы в условиях малых предприятий и пекарен, поскольку это упрощает производственный цикл, сокращая его до этапов хранения и дефростации полуфабрикатов, а также выпечки готовых изделий. Кроме того, это позволяет транспортировать продукцию на различные расстояния без потери качества, а также реагировать на спрос потребителей за счет наличия запасов длительного хранения [21].

Таким образом, установлено, что внедрение технологии охлаждения или замораживания полуфабрикатов (ферментированной зерновой массы) позволит повысить эффективность производства и обеспечить высокое качество зернового хлеба.

5.3 Исследование пищевой ценности зернового хлеба из полбы на заквасках

Пищевая ценность продуктов питания определяется содержанием в них необходимых нутриентов (белков, жиров, углеводов, минеральных веществ и витаминов), а также их энергетической ценностью. Макронутриенты выполняют широкий спектр функций, обеспечивая жизнедеятельность организма, участвуя в метаболизме, транспорте веществ, структурных процессах, энергообеспечении и терморегуляции. Пищевая ценность конкретного продукта зависит от его рецептуры. Химический состав зернового хлеба «Борай» приведен в таблице 45.

Установлено, что 100 г зернового хлеба «Борай» удовлетворяет 25,28 % суточной потребности в пищевых волокнах, 11,68 % – в белках, 1,76 % – в жирах и 11,13 % – в углеводах. Энергетическая ценность 100 г продукта обеспечивает 8,43 % от суточной нормы.

Таблица 45 – Пищевая ценность зернового хлеба «Борай»

Компонент	Содержание компонента в 100 г	Суточная потребность (ТР ТС 022/2011)	Степень удовлетворения суточной потребности, %, при употреблении	
			100 г	150 г
Белки, г	8,8	75	11,7	17,5
Жиры, г	1,5	83	1,8	2,6
Углеводы, г	40,6	365	11,1	16,7
Пищевые волокна, г	7,6	30	25,3	37,9
Энергетическая ценность, ккал	210,7	2500	8,4	12,6

Следует отметить, что в соответствии с ГОСТ Р 55577-2013 содержание пищевых волокон (7,6 г/100 г) позволяет отнести разработанный зерновой хлеб из полбы «Борай» к пищевой продукции с высоким содержанием пищевых волокон. Пищевые волокна оказывают комплексное воздействие на организм человека, способствуют нормализации пищеварения, улучшению метаболических показателей и профилактике различных алиментарных заболеваний, что делает их ценным компонентом здорового питания [4; 79; 80].

Пищевая ценность белка определяется его способностью обеспечивать организм аминокислотами. Перевариваемость белков хлеба зависит от его химического состава и определяет, какая часть потребленного белка действительно усваивается и используется организмом. В связи с этим в работе была изучена перевариваемость белков зернового хлеба из полбы «Борай» *in vitro*. Результаты исследования представлены на рисунке 25.

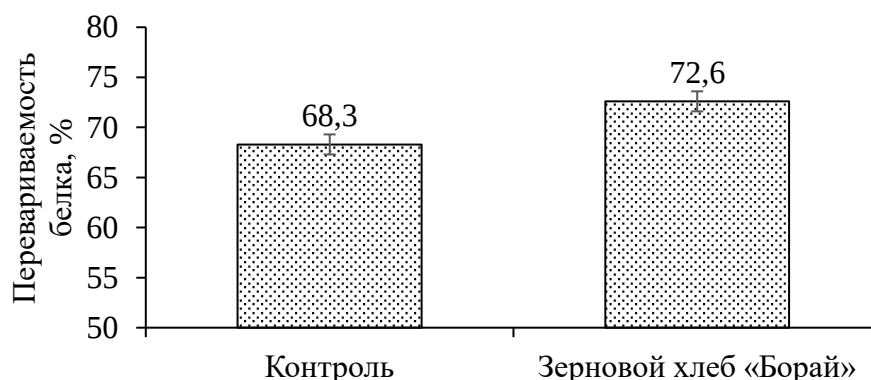


Рисунок 25 – Перевариваемость белковых веществ зернового хлеба из полбы

Установлено, что при использовании заквасок повышается уровень перевариваемости белковых веществ хлеба по сравнению с контрольным образцом. Перевариваемость белка в опытных образцах хлеба составляет 72,6 %, а в контрольном образце – лишь 68,3 %.

В настоящее время одной из важнейших характеристик продуктов питания является гликемический индекс, демонстрирующий скорость адсорбции углеводов продукта в организме человека. В работе проведено исследование по определению скорости расщепления углеводов по изменению уровня глюкозы в крови после употребления разработанного зернового хлеба из полбы на заквасках. Результаты исследования приведены на рисунке 26.

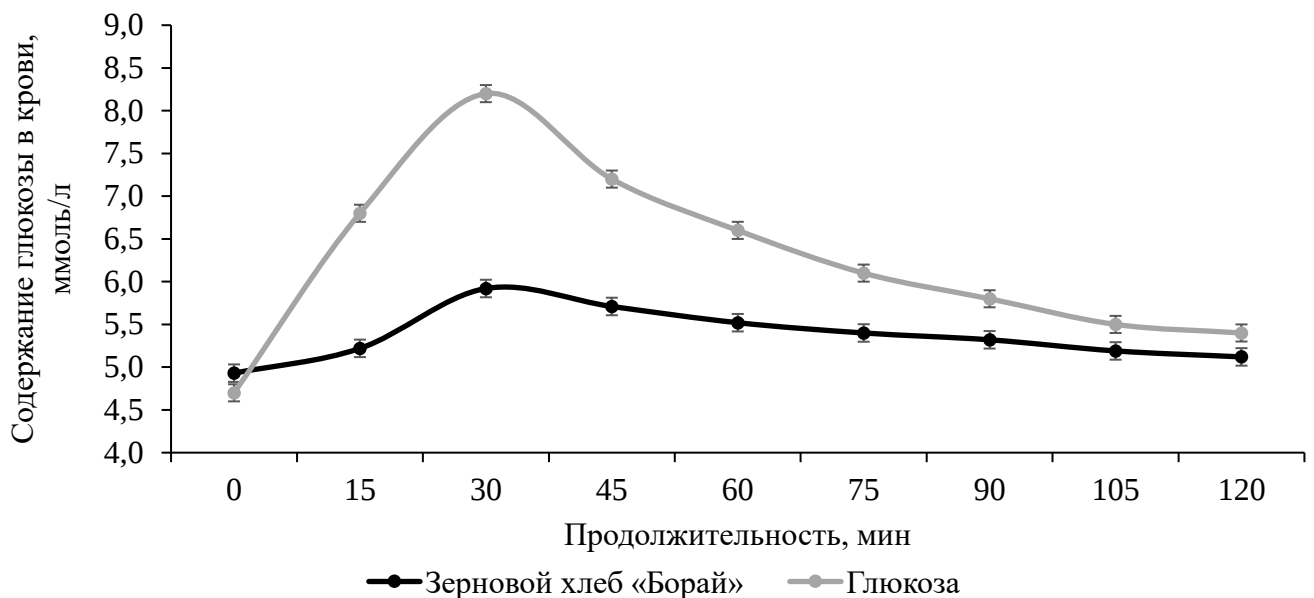


Рисунок 26 – Уровень глюкозы в крови после употребления зернового хлеба из полбы

Установлено, что наибольшее содержание глюкозы в крови отмечается через 30 мин после употребления зернового хлеба из полбы – 5,92 ммоль/л. Затем наблюдается снижение этого показателя, и через 120 мин эксперимента его значение составляет 5,12 ммоль/л.

В результате проведенного исследования, основанного на сравнении площадей под гликемическими кривыми (рисунок 27), было установлено, что гликемический индекс зернового хлеба «Борай» составляет 47,1 %. Данный показатель суще-

ственно ниже, чем у образцов хлеба из пшеничной и ржаной муки [3], что свидетельствует об относительно медленном повышении уровня глюкозы в крови после его употребления.

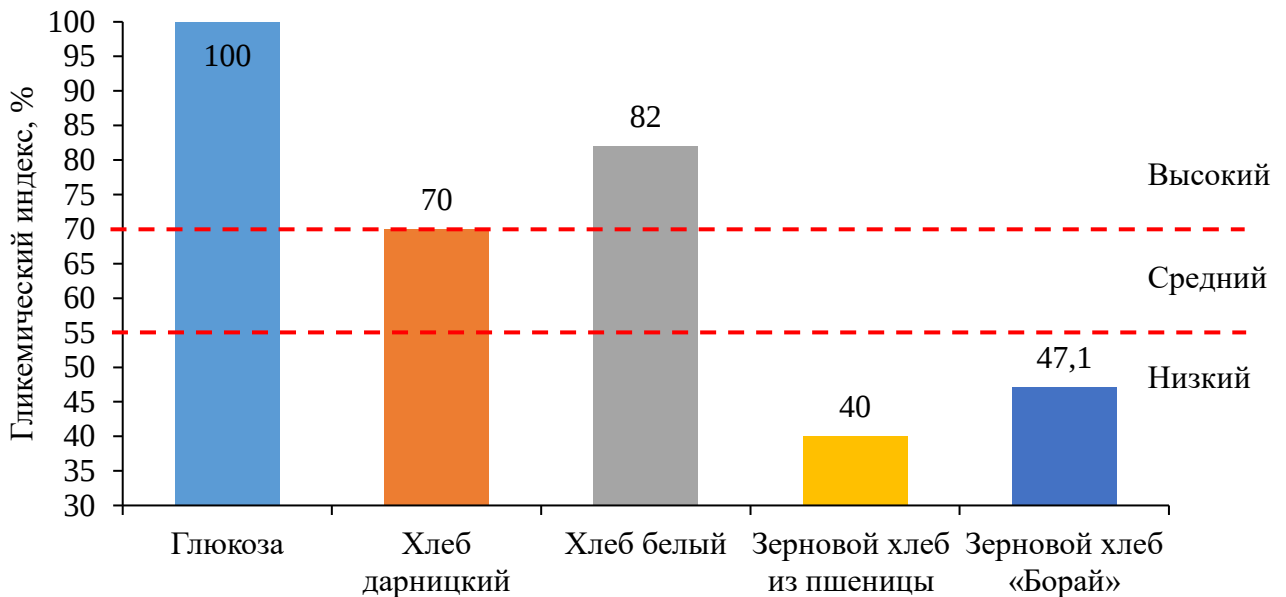


Рисунок 27 – Гликемический индекс хлебобулочных изделий

Результаты проведенного анализа позволяют отнести зерновой хлеб «Борай» к продуктам с низким гликемическим индексом в соответствии с классификацией ВОЗ. В связи с этим он может быть рекомендован как для широкого употребления, так и для включения в рацион питания людей с целью профилактики сахарного диабета.

Зерновые культуры, включая полбу, содержат фитиновую кислоту, которая способна связывать ионы фосфора, кальция, магния и железа, тем самым снижая их биодоступность [86]. В литературе отмечается, что применение заквасок молочнокислых бактерий при производстве хлеба способствует снижению содержания фитиновой кислоты [73]. В состав разработанного консорциума входит штамм *L. casei* 32, который отличается высоким уровнем фитазной активности (0,29 ед/г) по результатам оценки ферментативной активности молочнокислых бактерий (см. рисунок 6 в параграфе 3.3).

В связи с этим в работе проведено исследование содержания фитиновой кислоты в разработанном зерновом хлебе из полбы «Борай». Результаты приведены в таблице 46.

Таблица 46 – Содержание фитиновой кислоты в зерновом хлебе «Борай»

Образец	Содержание фитиновой кислоты, мг/г
Контроль	0,14
Зерновой хлеб «Борай»	0,09

Установлено, что применение разработанного консорциума молочнокислых бактерий при производстве зернового хлеба из полбы «Борай» позволяет снизить содержание фитиновой кислоты в готовом изделии на 35,7 % в сравнении с контролем. Фитиновая кислота в высоких концентрациях снижает усвоение питательных веществ, в том числе железа, цинка, кальция и магния, образуя нерастворимые комплексы с их ионами. Эти комплексы не могут быть эффективно расщеплены пищеварительными ферментами, вследствие чего минералы не усваиваются в достаточном количестве [73].

В настоящее время многочисленные исследования направлены на изучение антиоксидантной активности продуктов питания. В организме человека существует собственная система, которая борется с чрезмерным количеством свободных радикалов, но она ослабляется под воздействием загрязненной окружающей среды, прямых солнечных лучей и нуждается в поддержке. Поэтому важно дополнять пищевой рацион человека природными антиоксидантами, которые способствуют усилению защиты биологической системы организма человека от вредных эффектов или реакций, полученных в результате протекания процессов окисления.

В связи с этим в работе проводили исследование антиоксидантной активности разработанного зернового хлеба из полбы «Борай». Результаты приведены на рисунке 28.

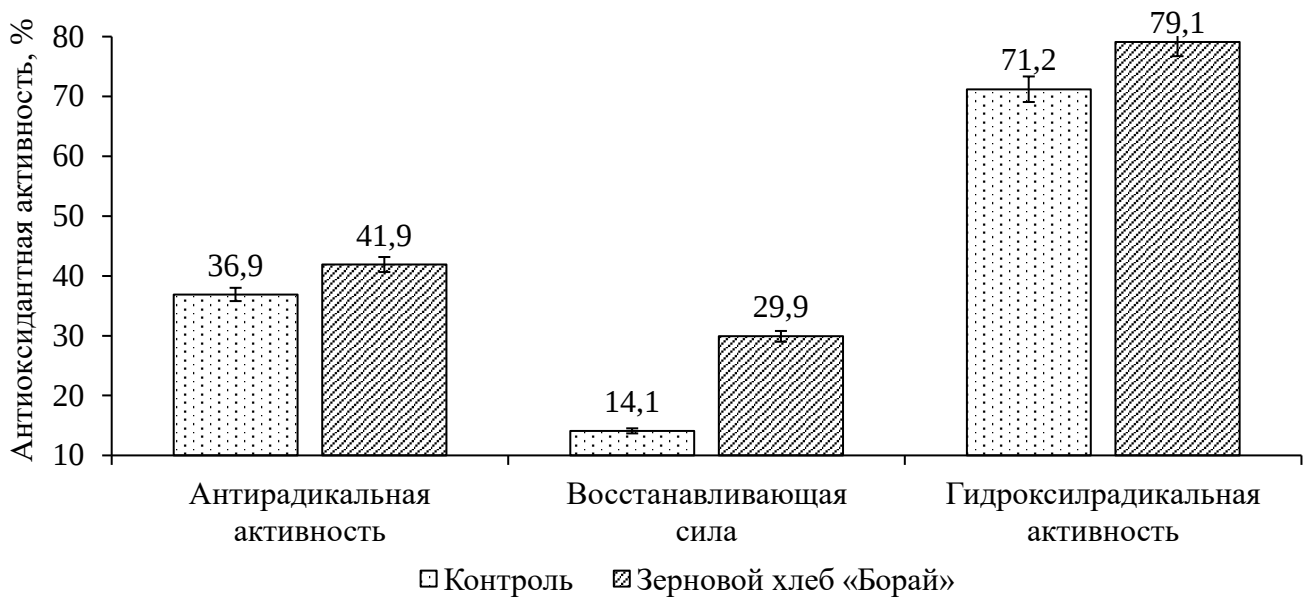


Рисунок 28 – Антиоксидантная активность зернового хлеба

Установлено, что применение заквасок позволяет повысить антиоксидантную активность зернового хлеба из полбы. Антирадикальную активность спиртовых экстрактов зернового хлеба из полбы оценивали *in vitro* методом, основанным на измерении способности связывать свободные радикалы соединением 2,2-дифенил-1-пикрилгидрозил (ДФПГ). Установлено, что антирадикальная активность зернового хлеба из полбы составляет 41,9 %, тогда как у контроля этот показатель равен 36,9 %.

Восстанавливающую силу спиртовых экстрактов определяли по способности активных веществ восстанавливать Fe^{3+} до Fe^{2+} . Установлено, что спиртовые экстракты хлеба, выработанного из ферментированной зерновой массы, характеризуются большей восстанавливающей силой (29,9 %) по сравнению с контролем (14,1 %).

Установлено, что зерновой хлеб «Борай» обладает более высоким значением гидроксилрадикальной активности (79,1 %) относительно контроля (71,2 %), что указывает на наличие антиоксидантных веществ, способных связывать или нейтрализовывать гидроксильные радикалы, одни из самых реакционноспособных активных форм кислорода.

Высокая антиоксидантная активность зернового хлеба обусловлена как содержанием в зерне полифенольных соединений, так и процессами ферментации, инициированными заквасками молочнокислых бактерий, проявляющих антиоксидантные свойства [113; 121; 149].

Разработанная технология хлеба из зерна полбы на основе ферментированной консорциумом молочнокислых бактерий зерновой массы позволяет повысить антиоксидантную активность зернового хлеба. Выявлено, что антирадикальная активность опытных образцов выше на 5 %, восстанавливающая сила на 15,8 %, гидроксилрадикальная активность на 7,9 % по сравнению с контролем.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что зерновой хлеб из полбы «Борай» характеризуется высоким содержанием пищевых волокон (7,6 г/100 г), высоким уровнем перевариваемости белка (72,6 %), низким гликемическим индексом (47 %), а также низким содержанием фитиновой кислоты (0,09 мг/г).

Совокупность данных свойств позволяет рекомендовать разработанный хлеб «Борай» для включения в рацион питания всех групп населения, в том числе для профилактики алиментарных заболеваний.

5.4 Расчет экономической эффективности и конкурентоспособности зернового хлеба из полбы на заквасках

Внедрение стадии ферментации диспергированной зерновой массы при производстве зернового хлеба из полбы требует приобретения дополнительных производственных площадей и оборудования. В связи с этим важно оценить экономический эффект производства зернового хлеба из полбы на заквасках.

Проведены расчеты экономической эффективности и оценка конкурентоспособности зернового хлеба из полбы «Борай» по состоянию на 1 декабря 2024 г.

Расчет себестоимости единицы продукции осуществляли в соответствии с расходами на производство и реализацию 1 т изделий.

Плановый выход продукции составляет 150 %, годовой выпуск продукции – 330 т. Перечень и стоимость сырья и вспомогательных материалов для производства 1 т хлеба представлены в таблице 47.

Таблица 47 – Перечень и стоимость сырья и вспомогательных материалов

Наименование сырья и вспомогательных материалов	Норма расхода на 100 кг муки, кг	Годовая потребность, т	Оптовая цена 1 т, р.	Стоимость, тыс. р.
Контрольный образец				
Зерно полбы	208,33	110,53	70 000	7 737,14
Мука полбяная цельнозерновая	100,00	53,05	90 000	4 774,92
Соль пищевая	66,67	35,37	7 500	265,27
Дрожжи хлебопекарные прессованные	8,54	4,53	200 000	906,35
Пакет полиэтиленовый	–	1 100,00	1 500	1 650,00
Этикетка	–	1 100,00	1 000	1 100,00
Итого	–	–	–	16 433,68
Опытный образец				
Зерно полбы	208,33	110,53	70 000	7 737,14
Мука полбяная цельнозерновая	100,00	53,05	90 000	4 774,92
Соль пищевая	66,67	35,37	7 500	265,27
Дрожжи хлебопекарные прессованные	8,54	4,53	200 000	906,35
Закваска молочнокислых бактерий	2,08	1,1	20 000	22,11
Пакет полиэтиленовый	–	1 100,00	1 500	1 650,00
Этикетка	–	1 100,00	1 000	1 100,00
Итого	–	–	–	16 455,79

Расчеты показали, что при производстве 1 т хлеба расходы на сырье и вспомогательные материалы для контрольного образца составляют 16 433,68 тыс. р., а для разработанного изделия с применением заквасок молочнокислых бактерий – 16 455,79 тыс. р. Таким образом, затраты на производство опытного образца не превышают 1 % в сравнении с контролем.

Себестоимость единицы продукции, рассчитанная исходя из затрат на производство 1 т, представлена в таблице 48.

Таблица 48 – Плановая калькуляция 1 т продукции

Статьи калькуляции	Затраты на 1 т продукции, тыс. р.	
	Контрольный образец	Опытный образец
Сырье	49,80	49,87
Транспортно-заготовительные расходы	12,45	12,47
Тепло	12,45	12,47
Электроэнергия	12,45	12,47
Основная и дополнительная заработная плата	24,90	24,93
Отчисления на социальное страхование	3,49	3,49
Расходы на содержание оборудования	4,98	4,99
Общехозяйственные расходы	4,98	4,99
Производственная себестоимость	132,96	133,14
Коммерческие расходы	1,00	1,00
Полная себестоимость	133,96	134,14
Рентабельность, %	20,00	20,00
Прибыль	26,79	26,83
Оптовая цена	160,75	160,97
Налог на НДС	16,08	16,10
Отпускная цена с НДС	176,83	177,06
Цена за единицу изделия массой 0,35 кг	53,05	53,12

Экономический эффект (Э) при производстве опытного образца рассчитывали по формуле

$$\text{Э} = (C_1 - C_2) \times q, \quad (9)$$

где C_1 – отпускная цена 1 т продукции контрольного образца, тыс. р.; C_2 – отпускная цена 1 т продукции опытного образца, тыс. р.; q – объем продукции, т.

Экономический эффект производства опытного образца составляет 0,24 тыс. р.

По результатам экономических расчетов себестоимость при производстве 1 т разработанного хлеба составляет 134,14 тыс. р. Таким образом цена за единицу товара массой 0,35 кг составляет 53,12 р.

В настоящее время ассортимент зернового хлеба на рынке в основном представлен изделиями из пшеницы и ржи. Зерно полбы в большей степени используется в качестве дополнительного рецептурного компонента. Перечень производителей зернового хлеба представлен в таблице 49.

Таблица 49 – Перечень производителей зернового хлеба

Производитель	Ассортимент	Масса, г	Цена единицы изделия, р.	Цена за 100 г, р.
ООО «Ярхлеб», г. Красноярск	Хлеб «Живое зерно» из зерна пшеницы	300	59,00	19,66
АО «Вкусвилл», г. Черноголовка, Московская область	Изделие из пророщенного зерна «Живые зерна»	300	75,00	25,00
Экопекарня «Хлеб для жизни», г. Казань	Хлеб пшеничный цельнозерновой	350	318,00	90,86

Средняя цена на рынке за единицу зернового хлеба массой 300 г составляет 135 р., что на 60,2 % выше цены разработанного изделия.

Конкурентоспособность разработанного зернового хлеба «Борай» в сравнении с контрольным образцом оценена с использованием дифференцированного метода относительных показателей и комплексного метода. Применение именно этих методов обосновано отсутствием на рынке аналогов разработанного хлеба, что исключает возможность попарного сравнения [188].

Расчет производился в соответствии с основными потребительскими свойствами хлебобулочных изделий. В качестве основных факторов были выбраны следующие характеристики: органолептические, физико-химические и микробиологические показатели качества, а также показатели функциональных свойств готовых изделий. Эти факторы сформировали комплексный показатель, равный единице. Внутриуровневые показатели значимости приведены в таблице 50.

Таблица 50 – Внутриуровневые коэффициенты значимости по группам

Показатели качества изделий	Значение коэффициента весомости
1-я группа – органолептические показатели	
Внешний вид	0,2
Состояние мякиша	0,3
Вкус	0,3
Запах	0,2
2-я группа – физико-химические показатели	
Пористость, %	0,3
Удельный объем, см ³ /100 г	0,4
Кислотность, град	0,3
3-я группа – микробиологические показатели	
КМАФАнМ, КОЕ/г	0,5
Визуальное наличие плесени, ч	0,5
4-я группа – функциональные свойства	
Перевариваемость белка, %	0,3
Антирадикальная активность, %	0,3
Содержание фитиновой кислоты, мг/г	0,4

Органолептическим показателям – внешний вид (состояние поверхности, цвет корки, правильность формы), состояние мякиша (пористость, цвет мякиша, эластичность), вкус и аромат – присвоен коэффициент весомости $T_1 = 0,3$.

Физико-химическим показателям качества (пористость и удельный объем) присвоен коэффициент весомости $T_2 = 0,2$.

Микробиологическим показателям качества присвоен коэффициент весомости $T_3 = 0,3$.

Показателям функциональных свойств (антирадикальная активность, перевариваемость белка, содержание фитиновой кислоты) присвоен коэффициент весомости $T_2 = 0,2$.

Единичные показатели конкурентоспособности (q) определяли как отношение величины i -го показателя разработанного образца (P) к величине i -го показателя контрольного образца (P_1) по формуле

$$q = \frac{P}{P_1}. \quad (10)$$

Далее рассчитывали групповые показатели конкурентоспособности (Q) как среднеарифметические взвешенные по формуле

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i q_i, \quad (11)$$

где a_i – коэффициент весомости i -го показателя, состоящего из n критериев; q_i – единичный показатель уровня качества.

На основании полученных данных рассчитывали комплексный показатель потребительских свойств (K):

$$K = T_0 \sum_{i=1}^n T_i Q_i, \quad (12)$$

где T_0 – коэффициент, характеризующий безопасность продукта, определяющий возможность его реализации ($T_0 = 1$); T_i – коэффициенты весомости по показателям изделий.

Расчет комплексных показателей потребительских свойств зернового хлеба приведен в таблице 51.

В результате расчета потребительских свойств зернового хлеба комплексный показатель разработанного изделия равен 1,86, что больше единицы. Это свидетельствует о том, что разработанное изделие является конкурентоспособным по сравнению с контрольным образцом.

Таблица 51 – Расчет комплексных показателей качества зернового хлеба

Группа показателей	Показатель качества изделий	Контроль	Опыт
1. Органолептические показатели	Внешний вид	3	4
	Состояние мякиша	3	5
	Вкус	4	5
	Запах	4	5
2. Физико-химические показатели	Пористость, %	45,59	51,63
	Удельный объем, см ³ /100 г	1,60	1,91
	Кислотность, град	4	4,4
3. Микробиологические показатели	КМАФАнМ, КОЕ/г	$4,9 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^2$
	Визуальное наличие плесени, ч	72	120
4. Функциональные свойства	Перевариваемость белка, %	68,3	72,6
	Антирадикальная активность, %	36,9	41,9
	Содержание фитиновой кислоты, мг/г	0,14	0,09
Комплексный показатель		1,00	1,86

Таким образом, расчет экономической эффективности и конкурентоспособности разработанных хлебобулочных изделий из зерна полбы показывает, что цена за единицу изделия массой 350 г составляет 53,12 р., комплексный показатель конкурентоспособности равен 1,86.

Заключение

По результатам исследований сделаны следующие выводы.

1. Проведена оценка биотехнологического потенциала молочнокислых бактерий, отобраны перспективные культуры для использования в качестве заквасок в технологии зернового хлеба. Установлено, что высокой кислотообразующей активностью обладают штаммы *L. casei* 32, *L. plantarum* 131 и *L. acidophilus* 9; наибольшей амилолитической активностью обладает *L. fermentum* 10 (110,38 ед. акт/см³), протеолитической активностью – *L. casei* 32 (30,04 мкг тирозина/см³·мин), фитазной активностью – *L. casei* 32 (0,29 ед/см³), *L. plantarum* 24 демонстрирует высокую степень устойчивости к неблагоприятным факторам внешней среды.

2. Разработан консорциум молочнокислых бактерий, содержащий штаммы *L. casei* 32, *L. fermentum* 10, *L. plantarum* 24 в соотношении 1:1:2, предлагаемый в качестве закваски для производства зернового хлеба. Данный консорциум отличается высоким уровнем кислотообразующей, фитазной и антиоксидантной активности.

3. Теоретически обоснована целесообразность и экспериментально подтверждена перспективность применения стадии молочнокислой ферментации при производстве зернового хлеба из полбы. Выявлено, что использование заквасок молочнокислых бактерий позволяет получать зерновой хлеб с улучшенными органолептическими, физико-химическими и структурно-механическими характеристиками. Применение разработанной закваски при производстве зернового хлеба из полбы позволяет увеличить пористость мякиша на 6 %, удельный объем хлеба на 19 %, упругую и пластическую деформацию на 34 % и 49 % соответственно по отношению к контролю. Выявлено, что образцы зернового хлеба, выработанные с применением ферментированной зерновой массы, характеризуются более низкой микробной обсемененностью, что позволяет увеличить сроки хранения готового продукта в 1,5 раза по сравнению с контролем.

4. Установлены оптимальные технологические параметры тестоприготовления зернового хлеба из полбы с применением методов математического моделирования: продолжительность процесса молочнокислой ферментации зерновой массы – 4 ч, количество ферментированной зерновой массы – 40 % к массе теста.

5. Разработаны рекомендации по хранению ферментированной зерновой массы из полбы в охлажденном и замороженном виде: сроки хранения составляют 5 сут и 21 сут при температуре $(2 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и минус 18–20 $^\circ\text{C}$ соответственно.

6. Разработана техническая документация: технические условия, технологическая инструкция и рецептура на новый вид зернового хлеба из полбы. Установлено, что хлеб «Борай» характеризуется высоким уровнем перевариваемости белка (72,6 %), высоким содержанием пищевых волокон (7,6 г/100 г), низким гликемическим индексом (47 %), пониженным содержанием фитиновой кислоты (0,09 мг/г). Выполнен расчет экономической эффективности и конкурентоспособности зернового хлеба из полбы «Борай». Цена за единицу изделия массой 0,35 кг составляет 53,12 р., комплексный показатель конкурентоспособности – 1,86.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в развитии научно-практических основ моделирования новых высокоэффективных заквасок молочнокислых бактерий для создания ассортимента пищевых продуктов диетического и лечебно-профилактического назначения.

Список сокращений и условных обозначений

АФК – активные формы кислорода.

ВКЭ – внутриклеточный экстракт.

ГИ – гликемический индекс.

ДМСО – диметилсульфоксид.

ДФПГ – 2,2-дифенил-1-пикрилгидрозила.

КЖ – культуральная жидкость.

КМАФАнМ – количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов.

КОЕ – колониеобразующая единица.

МДА – малоновый диальдегид.

МКБ – молочнокислые бактерии.

СОД – супероксиддисмутаза.

in vitro – экспериментальные исследования в искусственных условиях.

in vivo – экспериментальные исследования на живых организмах.

Список литературы

1. Абдулин, И. Ф. Органические антиоксиданты как объекты анализа / И. Ф. Абдулин, Е. Н. Турова, Г. К. Будников // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2001. – Т. 167, № 6. – С. 3–13.
2. Абдуллаева, Н. Ф. Микробиологические и биохимические характеристики молочнокислых бактерий и области их применения (обзор) / Н. Ф. Абдуллаева, З. А. Таги-заде, Р. С. Мустафаева // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 3-3. – С. 31–35.
3. Алехина, Н. Н. Зерновой хлеб для повышения пищевого статуса населения: биоактивация злаковых культур, ресурсосбережение сырья, разработка технологий и расширение ассортимента : дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.01 / Алехина Надежда Николаевна. – Воронеж, 2020. – 598 с.
4. Антипова, Л. В. Химия пищи / Л. В. Антипова, Н. И. Дунченко. – Санкт-Петербург : Лань, 2018. – 856 с. – ISBN 978-5-8114-2982-0.
5. Арифиллина, Л. Р. Консорциум бактерий как основа создания пробиотических добавок для животноводства / Л. Р. Арифиллина, Г. С. Волкова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2018. – № 1. – С. 41–45.
6. Астахов, И. Ю. Химический состав и технологические свойства полбяной муки / И. Ю. Астахов, П. П. Курочкин, Д. Д. Игнатов // Инновационная техника и технология. – 2015. – № 1. – С. 59–61.
7. Баженова, И. А. Исследование технологических свойств зерна полбы (*Triticum dicoccum* Schranc) и разработка кулинарной продукции с его использованием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.15 / Баженова Ирина Анатольевна. – Санкт-Петербург, 2004. – 24 с.
8. Бакаева, И. А. Разработка технологии хлеба повышенной пищевой ценности на густой закваске из биоактивированного зерна пшеницы : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.01 / Бакаева Ирина Александровна. – Воронеж, 2015. – 233 с.

9. Балыхин, М. Г. Статистическое исследование потребления хлеба и развития хлебопекарной отрасли России / М. Г. Балыхин, М. М. Шайлиева, А. П. Цыпин // Продовольственная политика и безопасность. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 97–106.
10. Баснакьян, И. А. Стресс у бактерий / И. А. Баснакьян. – Москва : Медицина, 2003. – 136 с. – ISBN 5-225-04368-2.
11. Бастриков, Д. Изменение биохимических свойств зерна при замачивании / Д. Бастриков, Г. Панкратов // Хлебопродукты. – 2006. – № 1. – С. 40–41.
12. Бегунова, А. В. Молочнокислые и пропионовокислые бактерии: формирование сообщества для получения функциональных продуктов с бифидогенными и гипотензивными свойствами / А. В. Бегунова, И. В. Рожкова, Е. А. Зверева [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. – 2019. – Т. 55, № 6. – С. 1–12.
13. Белявская, И. Г. Биотехнологические основы приготовления хлеба : монография / И. Г. Белявская, И. В. Матвеева. – Москва : ДеЛи принт, 2001. – 150 с. – ISBN 5-94343-011-3.
14. Богатырева, Т. Г. Использование полбяной муки в технологии хлебобулочных изделий / Т. Г. Богатырева, Е. В. Иунихина, А. В. Степанова // Хлебопродукты. – 2013. – № 2. – С. 40–42.
15. Бруслик, Н. Л. Сравнительная характеристика амилалитической активности грамположительных бактерий / Н. Л. Бруслик, А. Р. Каюмов, М. И. Богачев, Д. Р. Яруллина // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2014. – № 2. – С. 47–51.
16. Брюханов, А. Л. Антиоксидантные свойства молочнокислых бактерий / А. Л. Брюханов, А. И. Климко, А. И. Нетрусов // Микробиология – 2022. – Т. 91, № 5. – С. 519–536.
17. Бухарин, О. В. Характеристика антагонистической активности пробиотических бактерий при их взаимодействии / О. В. Бухарин, А. В. Семенов, С. В. Черкасов // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 347–352.
18. Бычкова, Т. С. Физиология питания / Т. С. Бычкова, Е.Н. Артемова. – Орел : Госуниверситет – УНПК, 2013. – 163 с. – ISBN 978-5-93932-626-1.

19. Веснина, А. Д. Разработка пробиотического консорциума для людей с онкологическими заболеваниями / А. Д. Веснина, А. Ю. Просеков, О. В. Козлова [и др.] // Вестник ВГУИТ. – 2021. – Т. 83, № 1. – С. 219–232.
20. Волкова, Г. С. Создание многоштаммового бактериального консорциума для технологии пробиотических препаратов кормового назначения / Г. С. Волкова, Е. М. Сербя // Техника и технология пищевых производств. – 2021. – Т. 51, № 2. – С. 260–269.
21. Герасимова, Э. О. Криогенные технологии в хлебопечении / Э. О. Герасимова, Н. В. Лабутина // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2019. – № 1. – С. 6–9.
22. Гудков, С. В. Биоантиоксиданты (часть 1) / С. В. Гудков, В. И. Брусков, А. В. Куликов [и др.] // Альманах клинической медицины. – 2014. – № 31. – С. 61–65.
23. Гудков, С. В. Биоантиоксиданты (часть 2) / С. В. Гудков, В. И. Брусков, А. В. Куликов [и др.] // Альманах клинической медицины. – 2014. – № 31. – С. 65–69.
24. Гунькова, П. И. Перспективность полбы как сырья для альтернативных напитков / П. И. Гунькова, А. А. Трофимов, А. С. Бучилина [и др.] // Аграрная наука. – 2024. – № 382 (5). – С. 108–116.
25. Дерунец, А. С. Биологические основы совершенствования культивирования молочнокислых бактерий для разработка высокоэффективной технологии получения молочной кислоты : дис. ... канд. биол. наук : 03.01.06 / Дерунец Алиса Сергеевна. – Москва, 2020. – 185 с.
26. Дорош, А. П. Исследование антагонистических свойств закваски с направленным культивированием и оценка микробиологических показателей хлеба на ее основе / А. П. Дорош, Н. Н. Грегирчак // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – Т. 37, № 2. – С. 10–15.
27. Драгомирецкий, Ю. Д. Живая сила проростков / Ю. Д. Драгомирецкий. – Санкт-Петербург : Невский проспект, 1999. – 117 с. – ISBN 5-8378-0080-8.

28. Дудикова, Г. Н. Консорциум молочнокислых бактерий и дрожжей для ржаной закваски с повышенными антагонистическими свойствами / Г. Н. Дудикова, А. В. Чижаева // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – Т. 41, № 2. – С. 34–39.

29. Еникеев, Р. Р. Применение заквасок в хлебопечении / Р. Р. Еникеев, А. Г. Кашаев, А. В. Зимичев // Известия вузов. Пищевая технология. – 2010. – № 2–3. – С. 7–9.

30. Ермоленко, Е. И. Иммуномодулирующее действие пробиотических бактерий при заболеваниях желудочно-кишечного тракта / Е. И. Ермоленко // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2014. – № 4. – С. 5–18.

31. Зверев, С. В. Функциональные зернопродукты / С. В. Зверев, Н. С. Зверева. – Москва : ДеЛи принт, 2006. – 116 с. – ISBN 5-94343-106-3.

32. Землянухина, О. А. Модификация метода Вэйда для количественного определения содержания фитина в эндосперме ореха / О. А. Землянухина, В. Н. Вепренцев, В. Н. Калаев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2018. – № 3. – С. 163–169.

33. Зиннатуллин, Д. Х. Совершенствование технологии возделывания яровой пшеницы полбы (*Triticum dicoccum* Schuebl) в северной части лесостепи среднего Поволжья : дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.01 / Зиннатуллин Дамир Халимуллович. – Казань, 2019. – 183 с.

34. Иркитова, А. Н. Практическое значение и желчеустойчивость коллекционных штаммов *Lactobacillus acidophilus* / А. Н. Иркитова // Известия Алтайского государственного университета. – 2014. – № 3-1 (83). – С. 29–33.

35. Иркитова, А. Н. Эколого-биологическая оценка штаммов *Lactobacillus acidophilus*, используемых в производстве пробиотических продуктов : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.03 / Иркитова Алена Николаевна. – Пермь, 2012. – 23 с.

36. Иунихина, Е. В. Совершенствование технологии хлебобулочных изделий для здорового питания на основе применения нетрадиционного сырья : автореф.

дис. ... канд. техн. наук : 05.18.01 / Иунихина Елена Владимировна. – Москва, 2015. – 26 с.

37. Каирова, М. Ж. Изучение способности молочнокислых бактерий утилизировать побочный продукт пивоваренного производства / М. Ж. Каирова // Вестник Карагандинского университета. – 2015. – № 1 (77). – С. 69–74.

38. Карнаухова, И. В. Исследование содержания меди и активности медь-зависимой супероксиддисмутазы в организме человека / И. В. Карнаухова, О. Ю. Ширяева // Научное обозрение. – 2018. – № 2. – С. 10–14.

39. Касихина, Е. И. Пробиотики в профилактике атопического дерматита и пищевой аллергии у детей / Е. И. Касихина // Российский вестник перинатологии и педиатрии. – 2015. – № 4. – С. 37–42.

40. Китаевская, С. В. Биотехнологический потенциал молочнокислых бактерий как биологически активных компонентов пищи / С. В. Китаевская // Пищевые технологии и биотехнологии : материалы XVI Всерос. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с междунар. участием, посвященной 150-летию Периодической таблицы химических элементов (Казань, 16–19 апреля 2019 г.) : в 3 ч. – Казань : КНИТУ, 2019. – Ч. 1. – С. 19–24.

41. Китаевская, С. В. Биотехнология криорезистентных молочнокислых бактерий и их применение в хлебопекарной промышленности : дис. ... д-ра техн. наук : 1.5.6 / Китаевская Светлана Владимировна. – Казань, 2023. – 419 с.

42. Китаевская, С. В. Оценка антиоксидантного потенциала новых штаммов молочнокислых бактерий / С. В. Китаевская, С. А. Китаевский, С. В. Ткаченко // Биомедицина, материалы и технологии XXI века : материалы I Междунар. школы-конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Казань, 25–28 ноября 2015 г.). – Казань : КФУ, 2015. – С. 19.

43. Коврижных, А. В. Определение протеолитической активности молочнокислых бактерий и выявление генов протеиназ / А. В. Коврижных, Д. А. Афанасьев, М. Ахангаран [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2022. – № 4. – С. 113–127.

44. Комарова, О. Н. Продукты на зерновой основе в питании взрослого и ребенка: что нового? / О. Н. Комарова, А. И. Хавкин // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2017. – № 6. – С. 133–140.
45. Королев, А. А. Гигиена питания: руководство для врачей / А. А. Королев. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2016. – 624 с. – ISBN 978-5-9704-3706-3.
46. Корячкина, С. Я. Методы исследования свойств сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Методы исследования свойств полуфабрикатов хлебопекарного производства / С. Я. Корячкина, Н. А. Березина, Е. В. Хмелева. – Орел : Госуниверситет – УНПК, 2011. – 49 с.
47. Корячкина, С. Я. Некоторые аспекты совершенствования технологии хлеба из целого зерна / С. Я. Корячкина // Успехи современного естествознания. – 2002. – № 3. – С. 56–62.
48. Корячкина, С. Я. Совершенствование технологии хлеба на основе целого зерна пшеницы и ржи / С. Я. Корячкина, Е. А. Кузнецова, О. М. Пригарина // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – № 9 (59). – С. 284–288.
49. Красникова, Л. В. Микробиология молока и молочных продуктов : лабораторный практикум / Л. В. Красникова, П. И. Гунькова, В. В. Маркелов. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО ; ИХБТ, 2013. – 85 с.
50. Крюкова, Е. В. Исследование химического состава полбяной муки / Е. В. Крюкова, Н. В. Лейберова, Е. И. Лихачева // Физиология питания. – 2014. – Т. 2, № 2. – С. 75–81.
51. Крюкова, Е. В. Формирование качества мучных кондитерских изделий с использованием полбяной муки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.15 / Крюкова Екатерина Владимировна. – Екатеринбург, 2014. – 16 с.
52. Кузнецова, Е. А. Изменение микроструктуры зернового сырья при подготовке к производству зернового хлеба в условиях ферментативного гидролиза / Е. А. Кузнецова // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 6-1. – С. 27–28.

53. Кулиев, А. А. Сравнение антимикробной активности различных штаммов бактерий рода *Lactobacillus* против ряда патогенных бактерий / А. А. Кулиев, К. Демнерова, У. Д. Абдуллаева // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 1-1. – С. 41–44.
54. Кунашева, Ж. М. Зерновой хлеб / Ж. М. Кунашева, М. Х. Кодзокова // Новые технологии. – 2019. – № 1. – С. 108–116.
55. Кунце, В. Технология солода и пива / В. Кунце, Г. Мит. – Санкт-Петербург : Профессия, 2003. – 912 с. – ISBN 5-93913-006-2.
56. Лесникова, Н. А. Совершенствование биотехнологии производства хлебобулочных изделий / Н. А. Лесникова, Т. В. Котова // Актуальная биотехнология. – 2020. – № 3 (34). – С. 214–217.
57. Литусов, Н. В. Физиология бактерий : иллюстрированное учебное пособие / Н. В. Литусов. – Екатеринбург : УГМУ, 2015. – 43 с.
58. Логунова, Л. В. Разработка технологии хлеба с зерном ржи для рационального использования ресурсов и повышения пищевой ценности изделий : дис. ... канд. техн. наук / Логунова Людмила Владимировна. – Воронеж, 2013. – 197 с.
59. Медицинская микробиология, вирусология и иммунология : в 2 т. / под ред. В. В. Зверева, М. Н. Бойченко. – Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2016. – Т. 1. – 448 с. – ISBN 978-5-9704-3641-7.
60. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н. А. Спирин, В. В. Лавров, Л. А. Зайнуллин [и др.] ; под ерд. Н. А. Спирина. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2003. – 260 с. – ISBN 5-321-00319-X.
61. Наумова, Н. Л. Антиоксидантная активность селенсодержащих булочных соединений / Л. Н. Наумова // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – № 2. – С. 29–33.
62. Никифорова, А. П. Изучение биотехнологического потенциала штамма *Lactobacillus sakei* LSK-103 / А. П. Никифорова, И. С. Хамагаева // Вестник МГТУ. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 277–286.

63. Новикова, А. Н. Современная технология хлеба из целого зерна пшеницы : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.18.01 / Новикова Алевтина Николаевна. – Москва, 2004. – 25 с.

64. Осипова, Г. А. Аспекты использования целого зерна полбы сорта Греммэ в производстве макаронных изделий / Г. А. Осипова, Е. В. Хмелева // Инновации в индустрии питания и сервисе : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. (Краснодар, 11 ноября 2022 г.). – Краснодар : КубГТУ, 2023. – С. 252–255.

65. Осипова, Г. А. Использование зерна полбы сорта Греммэ в макаронном производстве / Г. А. Осипова, Е. В. Хмелева // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2023. – № 1. – С. 190–199.

66. Патент № 2292722 Российская Федерация, МПК С1 А21D 8/02. Способ производства зернового хлеба : № 2005130139/13 : заявл. 27.09.2005 : опубл. 10.02.2007 / Т. В. Санина, Н. Н. Алехина.

67. Патент № 2409033 Российская Федерация, МПК С2 А21D 08/02. Способ производства хлеба из пшеничной муки : № 2009112274/13 : заявл. 03.04.2009 : опубл. 20.10.2011 / Л. И. Кузнецова, А. П. Косован, Р. Д. Поландова [и др.].

68. Патент № 2578486 Российская Федерация, МПК С2 А21D 08/02. Способ приготовления закваски для производства хлеба : № 2013155876/13 : заявл. 17.12.2013 : опубл. 27.03.2016 / А. П. Косован, М. Н. Костюченко, Т. В. Быковченко [и др.].

69. Патент № 2619277 Российская Федерация, МПК С1 А21D 13/02. Способ производства зернового хлеба : № 2015147510 : заявл. 05.11.2015 : опубл. 15.05.2017 / Е. И. Пономарева, Н. Н. Алехина, А. А. Напрасникова, И. С. Быковская.

70. Патент № 2702089 Российская Федерация, МПК С1 А21D 13/04. Хлеб повышенной пищевой ценности и способ его изготовления : № 2018147043 : заявл. 27.12.2018 : опубл. 03.10.2019 / В. В. Долгих.

71. Патент № 2707944 Российская Федерация, МПК С1 А21D 8/02. Способ обеззараживания зерна : № 2019124649 : заявл. 31.07.2019 : опубл. 02.12.2019 / И. Ю. Потороко, Н. В. Науменко, А. Я. Лейви, И. В. Калинина.

72. Патент № 2781215 Российская Федерация, МПК С1 А21D 8/02. Способ производства ржано-пшеничного хлеба на полбяной закваске : № 2022110252 : заявл. 15.04.2022 : опубл. 07.10.2022/ Т. Г. Богатырева, И. Г. Белявская, М. С. Околов.

73. Патент № 2783601 Российская Федерация, МПК С1 А21D 8/02. Способ производства зернового хлеба из полбы : № 2022108371 : заявл. 29.03.2022 : опубл. 15.11.2022 / Е. В. Хмелева.

74. Патент № 2785382 Российская Федерация, МПК С1 А21D 8/02. Способ производства хлеба : № 2022105275 : заявл. 25.02.2022 : опубл. 07.12.2022 / Е. В. Хмелева.

75. Патент № 2795815 Российская Федерация, МПК С1 А21D 08/02. Способ производства зернового хлеба «Кедровый стланик» : № 2021136469 : заявл. 09.12.2021 : опубл. 11.05.2023 / В. Н. Невзоров, И. В. Мацкевич, Ж. А. Кох, В. В. Мишин.

76. Пахомов, А. И. Экспериментальное определение параметров магнитного обеззараживания зерна / А. И. Пахомов, В. А. Максименко, К. Н. Буханцов, Н. П. Ватутина // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 3. – С. 84–89.

77. Пащенко, Л. П. Технология хлебопекарного производства / Л. П. Пащенко, И. М. Жаркова. – Санкт-Петербург : Лань, 2014. – 672 с. – ISBN 978-5-8114-1593-9.

78. Полонский, В. И. Селекция на содержание антиоксидантов в зерне как перспективное направление для получения продуктов здорового питания / В. И. Полонский, И. Г. Лоскутов, А. В. Сумина // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2018. – Т. 22, № 3. – С. 343–352.

79. Пономарева, Е. И. Разработка способа приготовления зернового хлеба повышенной безопасности / Е. И. Пономарева, Н. Н. Алехина, И. А. Бакаева // Хлебопродукты. – 2014. – № 12. – С. 52–53.

80. Пономарева, Е. И. Хлеб из биоактивированного зерна пшеницы повышенной пищевой ценности / Е. И. Пономарева, Н. Н. Алехина, И. А. Бакаева // Вопросы питания. – 2016. – Т. 85, № 2. – С. 116–121.

81. Пучкова, Л. И. Лабораторный практикум по технологии хлебопекарного производства / Д. И. Пучкова. – 4-е изд. – Санкт-Петербург : ГИОРД, 2004. – 264 с. – ISBN 5-901065-65-4.

82. Ранченко, М. А. Антиоксидантная активность плодов рода *Malus* в условиях Южного Предбайкалья / М. А. Ранченко, А. М. Шигарова, Е. И. Ранченко // Химия растительного сырья. – 2013. – № 4. – С. 97–101.

83. Ржевская, В. С. Изучение биологических свойств штаммов молочнокислых бактерий / В. С. Ржевская, И. П. Отурина, Л. М. Теплицкая // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. – 2014. – Т. 27 (66), № 1. – С. 145–160.

84. Рождественская, Л. Н. Обоснование перспективных направлений проектирования продуктов функционального питания / Л. Н. Рождественская, Е. С. Бычкова // Пищевая промышленность. – 2012. – № 11. – С. 14–16.

85. Саубенова, М. Г. Биологическая ценность ферментированных продуктов / М. Г. Саубенова, Е. А. Олейникова, А. А. Амангелды // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 8. – С. 124–129.

86. Сафронова, Т. Н. Разработка технологических параметров проращивания зерна / Т. Н. Сафронова, В. В. Казина, К. В. Сафронова // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – Т. 44, № 1. – С. 37–43.

87. Серба, Е. М. Универсальный метод определения протеолитической активности ферментных препаратов для пищевой промышленности / Е. М. Серба, М. Б. Оверченко, С. П. Агашичев, Л. В. Римарева // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 6. – С. 33–35.

88. Сидоренко, Г. А. Электроконтактная выпечка зернового хлеба с добавкой пшеничной муки / Г. А. Сидоренко, В. П. Попов, Г. Б. Зинюхин [и др.] // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 4 (179). – С. 205–209.

89. Скурихин, И. М. Химический состав российских пищевых продуктов / И. М. Скурихин, В. А. Тутельян. – Москва : ДеЛи принт, 2002. – 236 с. – ISBN 5-94343-028-8.

90. Соловьева, Ю. В. Клевера высокогорья РСО-Алания – природный ресурс систематического разнообразия молочнокислых бактерий : дис. ... канд. биол. наук : 03.01.06 / Соловьева Юлия Владимировна. – Владикавказ, 2018. – 198 с.

91. Солохина, И. Ю. Исследование антиоксидантных свойств молочнокислых бактерий и возможности их использования в технологии йогурта / И. Ю. Солохина, И. А. Гнеушева // Биология в сельском хозяйстве. – 2021. – № 3. – С. 24–31.

92. Стоянова, Л. Г. Антимикробные метаболиты молочнокислых бактерий: разнообразие и свойства (обзор) / Л. Г. Стоянова, Е. А. Устюгова, А. И. Нетрусова // Прикладная биохимия и микробиология. – 2012. – Т. 48, № 3. – С. 259–275.

93. Стоянова, Л. Г. Новые бактериоцины лактококков и их практическое использование : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.07 / Стоянова Лидия Григорьевна. – Москва, 2008. – 50 с.

94. Сульимова, Т. Д. Влияние pH-статирования на антибиотические свойства молочнокислых бактерий *Lactococcus lactis* / Т. Д. Сульимова, Л. Г. Стоянова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 3 (45). – С. 30–32.

95. Технология мучных кондитерских изделий. Технология различных видов теста / А. А. Кузнецова, Л. В. Кушнарченко, Н. Ю. Чеснокова, Л. В. Левочкина. – Владивосток : ДВФУ, 2022. – ISBN 978-5-7444-5286-5. – URL: https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/e74/imqszio13nx6q12hwi9pcngiprkyaghx/Технология_производства_мучных_кондитерских_изделий_Технология_производства_различных_видов_теста.pdf (дата обращения: 28.08.2024).

96. Урядова, Г. Т. Изучение бактерицидных и фунгицидных свойств молочнокислых бактерий / Г. Т. Урядова, Н. А. Фокина, Л. В. Карапунина // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 11. – С. 38–40.

97. Фазуллина, О. Ф. Макароны повышенной пищевой ценности с использованием полбы / О. Ф. Фазуллина, С. О. Смирнов // Ползуновский вестник. – 2019. – № 3. – С. 13–18.

98. Федеральная служба государственной статистики : [сайт]. – URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 08.02.2024).

99. Федоренко, Б. Н. Инженерия пивоваренного солода / Б. Н. Федоренко. – Санкт-Петербург : Профессия, 2004. – 248 с. – ISBN 5-93913-053-4.
100. Федорова, Р. А. Биохимические основы продуктов переработки зерна. Мука / Р. А. Федорова. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2017. – 98 с.
101. Хабибуллин, Р. Э. Антирадикальные свойства *Lactobacillus acidophilus* N.V. Ер. 317/402 *in vitro* / Р. Э. Хабибуллин, Н. С. Карамова // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 23. – С. 127–129.
102. Халгаева, К. Э. Биотехнология производства цельнозернового хлеба / К. Э. Халгаева, Н. А. Капарова, В. Е. Карманов // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : сб. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 30–31 марта 2023 г.). – Минск : БГАТУ, 2023. – С. 127–129.
103. Хлеб из биоактивированного зерна пшеницы : монография / Т. В. Санина, Г. О. Магомедов, Н. Н. Алехина [и др.]. – Воронеж : ВГТА, 2008. – 172 с. – ISBN 978-5-89448-606-2.
104. Хмелева, Е. В. Влияние способа подготовки зерна пшеницы на показатели качества и безопасности в технологии зернового хлеба / Е. В. Хмелева, А. Н. Бакаева // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2016. – № 4. – С. 3–8.
105. Хмелева, Е. В. Использование зерна полбы в технологии зернового хлеба повышенной пищевой ценности / Е. В. Хмелева // Индустрия питания. – 2023. – № 1. – С. 64–73.
106. Хмелева, Е. В. Полба в технологии зернового хлеба / Е. В. Хмелева, Н. А. Березина // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства : материалы междунар. науч.-практ. конф. (Йошкар-Ола, 23–24 марта 2023 г.), вып. XXV. – Йошкар-Ола : МарГУ, 2023. – С. 239–241.
107. Хмелева, Е. В. Разработка способов повышения безопасности хлеба из целого зерна пшеницы : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.15, 05.18.01 / Хмелева Евгения Викторовна. – Орел, 2004. – 32 с.

108. Челомбиткин, М. А. Эффективность применения фитаз и ударно-дезинтеграторно-активаторной обработки сои для снижения фитиновой кислоты в гидролизатах соевого белка / М. А. Челомбиткин, Н. В. Баракова, Н. Ю. Шарова, А. С. Басковцева, Е. А. Самоделкин // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2023. – № 3. – С. 3–10.

109. Чугунова, О. В. Агрономические свойства полбы, как нетрадиционного сырья для производства мучных кондитерских изделий / О. В. Чугунова, Е. В. Крюкова // Научный вестник. – 2015. – № 3 (5). – С. 90–100.

110. Шаскольская, Н. Д. Использование пророщенных семян и изделий из них в качестве оздоровительных продуктов / Н. Д. Шаскольская. – URL: <https://hrikatha.org/svetik/articles/solod.htm> (дата обращения: 29.02.2024).

111. Шаскольская, Н. Д. Самая полезная еда: проростки / Н. Д. Шаскольская, В. В. Шаскольский. – Санкт-Петербург : Веды ; Азбука-Аттикус, 2011. – 189 с. – ISBN 978-5-389-01317-9.

112. Яруллина, Д. Р. Бактерии рода *Lactobacillus*: общая характеристика и методы работы с ними / Д. Р. Яруллина, Р. Ф. Фахруллин. – Казань : КФУ, 2014. – 51 с.

113. Яшин, А. Я. Определение природных антиоксидантов в пищевых злаках и бобовых культурах / А. Я. Яшин, Я. Н. Яшин, П. А. Федина, Н. И. Черноусова // Аналитика. – 2012. – № 1 (2). – С. 32–36.

114. Abdel-Aal, E. S. M. Compositional and nutritional characteristics of spring einkorn and spelt wheats / E. S. M. Abdel-Aal, P. Hucl, F. W. Solsulski // Cereal chemistry. – 1995. – Vol. 72, № 6. – P. 621–624.

115. Abdel-Aal, E. S. M. Spelt: a specialty wheat for emerging food uses / E. S. M. Abdel-Aal, P. Hucl // Specialty grains for food and feed / ed. P. Wood. – St. Paul : American Association of Cereal Chemists, 2005. – P. 109–142.

116. Agafonova, A. N. Study of the influence of lactic acid bacteria on hydrolytic and oxidation processes in stuffed meat / A. N. Agafonova, T. V. Bagaeva, S. V. Kitaevskaya [et al.] // Helix. – 2019. – Vol. 9, № 5. – P. 5318–5322.

117. Allocati, N. Distribution of glutathione transferases in Gram-positive bacteria and Archaea / N. Allocati, L. Federici, M. Masulli, C. Di Ilio // *Biochimie*. – 2012. – Vol. 94. – P. 588–596.

118. Al-Madboly, L. A. Stress-based production, and characterization of glutathione peroxidase and glutathione s-transferase enzymes from *Lactobacillus plantarum* / L. A. Al-Madboly, S. M. Ali, E. M. E. Fakharany [et al.] // *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. – 2020. – Vol. 8. – Art. 78.

119. Amaretti, A. Antioxidant properties of potentially probiotic bacteria: in vitro and in vivo activities / A. Amaretti, M. Nunzio, A. Pompei [et al.] // *Applied microbiology and biotechnology*. – 2013. – Vol. 97, № 2. – P. 809–817.

120. Arcanjo, N. O. Resveratrol protects *Lactobacillus reuteri* against H₂O₂-induced oxidative stress and stimulates antioxidant defenses through upregulation of the dhaT gene / N. O. Arcanjo, M. J. Andrade, P. Padilla [et al.] // *Free radical biology and medicine*. – 2019. – Vol. 135. – P. 38–45.

121. Bautista-Expósito, S. Enzyme selection and hydrolysis under optimal conditions improved phenolic acid solubility, and antioxidant and anti-inflammatory activities of wheat bran / S. Bautista-Expósito, I. Tomé-Sánchez, A. B. Martín-Diana [et al.] // *Antioxidants*. – 2020. – Vol. 9, № 10. – Art. 984.

122. Bojanska, T. The use of spelt wheat (*Triticum spelta* L.) for baking applications / T. Bojanska, H. Frančakova // *Rostlinná výroba*. – 2002. – Vol. 48, № 4. – P. 141–147.

123. Bonafaccia, G. Characteristics of spelt wheat products and nutritional value of spelt wheatbased bread / G. Bonafaccia, V. Galli, R. Francisci [et al.] // *Food chemistry*. – 2000. – № 68. – P. 437–441.

124. Brand-Williams, W. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity / W. Brand-Williams, M. Cuvelier, C. Berset // *Food science and technology*. – 1995. – Vol. 28. – P. 25–30.

125. Brioukhanov, A. L. Aerotolerance of strictly anaerobic microorganisms and factors of defense against oxidative stress (a review) / A. L. Brioukhanov, A. I. Netrusov // *Applied biochemistry and microbiology*. – 2007. – Vol. 43, № 6. – P. 567–582.

126. Brooijmans, R. Heme and menaquinone induced electron transport in lactic acid bacteria / R. Brooijmans, B. Smit, F. Santos [et al.] // Journal microbial cell factories. – 2009. – Vol. 8. – Art. 28.

127. Brooijmans, R. J. W. *Lactobacillus plantarum* WCFS1 electron transport chains / R. J. W. Brooijmans, W. M. de Vos, J. Hugenholtz // Applied and environmental microbiology. – 2009. – Vol. 75, № 11. – P. 3580–3585.

128. Bruno-Barcena, J. M. Expression of a heterologous manganese superoxide dismutase gene in intestinal lactobacilli provides protection against hydrogen peroxide toxicity / J. M. Bruno-Barcena, J. M. Andrus, S. L. Libby [et al.] // Applied and environmental microbiology. – 2004. – Vol. 70. – P. 4702–4710.

129. Buijnsters, M. Evaluation of antioxidative activity of some antioxidants by means of a combined optothermal window and a DPPH free radical colorimetry / M. Buijnsters, D. Bicanic, M. Mihai Chirtoc [et al.] // Analytical sciences (Japan). – 2001. – Vol. 17, special issue. – P. 544–546.

130. Carbohydrates in human nutrition : report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation. – Rome : FAO, 2022. – 456 p.

131. Chaoui, A. Making bread with sourdough improves iron bioavailability from reconstituted fortified wheat flour in mice / A. Chaoui, M. Faïd, R. Belahsen // Journal of trace elements in medicine and biology. – 2006. – Vol. 20. – P. 217–220.

132. Choi, S. S. Effects of *Lactobacillus* strains on cancer cell proliferation and oxidative stress in vitro / S. S. Choi, Y. Kim, K. S. Han [et al.] // Letters in applied microbiology. – 2006. – Vol. 42. – P. 452–458.

133. Chooruk, A. Antioxidant activity of various oral *Lactobacillus* strains / A. Chooruk, S. Piwat, R. Teanpaisan // Applied microbiology. – 2017. – Vol. 123, № 1. – P. 271–279.

134. Corsetti, A. Lactobacilli in sourdough fermentation / A. Corsetti, L. Settanni // Food research international. – 2007. – Vol. 40. – P. 539–558.

135. Dachang, W. Antioxidant properties of *Lactobacillus* and its protecting effects to oxidative stress Caco-2 cells / W. Dachang, S. Ming-Zhong, Z. Cuili, X. Yi // Journal of animal and plant sciences. – 2014. – Vol. 24, № 6. – P. 1766–1771.

136. Darambazar, E. Method of phytic acid determination in food, feed, and plant materials : assay protocol / E. Darambazar. – Saskatchewan : University of Saskatchewan, 2018. – 4 p.
137. De Angelis, M. Environmental stress responses in *Lactobacillus*: a review / M. De Angelis, M. Gobbetti // Proteomics. – 2004. – Vol. 4, № 1. – P. 106–122.
138. Dhanavath, S. Nutritional and nutraceutical properties of *Triticum dicoccum* wheat and its health benefits: an overview / S. Dhanavath, U. J. S. Prasada Rao // Journal of food science. – 2017. – Vol. 82, № 10. – P. 2243–2250.
139. Droge, W. Free radicals in the physiological control of cell function / W. Droge // Physiological reviews. – 2002. – Vol. 82, № 1. – P. 47–95.
140. Duwat, P. Respiration capacity of the fermenting bacterium *Lactococcus lactis* and its positive effects on growth and survival / P. Duwat, S. Sourice, B. Cesselin [et al.] // Journal of bacteriology. – 2001. – Vol. 183, № 15. – P. 4509–4516.
141. Escarnot, E. Comparative study of the content and profiles of macronutrients in spelt and wheat: a review / E. Escarnot, R. Agnessens, J. M. Jacquemin, M. Paquor // Biotechnology, agronomy, society and environment. – 2012. – № 2. – P. 243–256.
142. Escarnot, E. Quantitative and qualitative study of spelt and wheat fibres in varying milling fractions / E. Escarnot, R. Agnessens, B. Wathelet, M. Paquor // Food chemistry. – 2010. – Vol. 122. – P. 857–863.
143. Falcinelli, B. Phenolic content and antioxidant activity of wholegrain breads from modern and old wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars and ancestors enriched with wheat sprout powder / B. Falcinelli, I. Calzuola, L. Gigliarelli [et al.] // Italian journal of agronomy. – 2018. – Vol. 13. – P. 297–302.
144. Fisher, M. M. Phytic acid degrading lactic acid bacteria in tef-injera fermentation / M. M. Fisher, I. M. Egli, I. Aeberli [et al.] // International journal of food microbiology. – 2014. – Vol. 190. – P. 54–60.
145. Frankenberg, L. *Enterococcus faecalis* heme-dependent catalase / L. Frankenberg, M. Brugna, L. Hederstedt // Journal of bacteriology. – 2002. – Vol. 184, № 22. – P. 6351–6356.

146. Fridovich, I. Oxygen toxicity: a radical explanation / I. Fridovich // Journal of experimental biology. – 1998. – Vol. 201. – P. 1203–1209.
147. Gao, D. Antioxidant effects of *Lactobacillus plantarum* via activation of transcription factor Nrf2 / D. Gao, Z. Gao, G. Zhu // Food and function. – 2013. – Vol. 4. – P. 982–989.
148. Garcia-Burgos, M. New perspectives in fermented dairy products and their health relevance / M. García-Burgos, J. Moreno-Fernández, M. J. M. Alférez [et al.] // Journal of functional foods. – 2020. – Vol. 72. – Art. 104059.
149. Gawlik-Dziki, U. Comparison of phenolic acids profile and antioxidant potential of six varieties of spelt (*Triticum spelta* L.) / U. Gawlik-Dziki, M. Swieca, D. Dziki // Journal of agricultural and food chemistry. – 2012. – Vol. 60, № 18. – P. 4603–4612.
150. Gerez, C. L. Prevention of bread mould spoilage by using lactic acid bacteria with antifungal properties / C. L. Gerez, M. I. Torino, G. Rollan, G. F. de Valdez // Food control. – 2009. – Vol. 20. – P. 144–148.
151. Glorieux, C. Catalase, a remarkable enzyme: targeting the oldest antioxidant enzyme to find a new cancer treatment approach / C. Glorieux, P. B. Calderon // Biological chemistry. – 2017. – Vol. 398. – P. 1095–1108.
152. Gobbetti, M. Biochemistry and physiology of sourdough lactic acid bacteria / M. Gobbetti, M. D. Angelis, A. Corsetti, R. D. Cango // Trends in food science and technology. – 2005. – Vol. 16. – P. 57–69.
153. Guidone, A. Aerobic metabolism and oxidative stress tolerance in the *Lactobacillus plantarum* group / A. Guidone, R. G. Ianniello, A. Ricciardi [et al.] // World journal of microbiology and biotechnology. – 2013. – Vol. 29, № 9. – P. 1713–1722.
154. Guo, Y. Antioxidant and immunomodulatory activity of selenium exopolysaccharide produced by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* / Y. Guo, D. Pan, H. Li [et al.] // Food chemistry. – 2013. – Vol. 138. – P. 84–89.
155. Hassan, Y. I. Antifungal activity of *Lactobacillus paracasei* ssp. *tolerans* isolated from a sourdough bread culture / Y. I. Hassan, L. B. Bullerman // International journal of food microbiology. – 2008. – Vol. 121. – P. 112–115.

156. Hu, S. Purification, characterization and biological activities of exopolysaccharides from *Lactobacillus rhamnosus* ZFM231 isolated from milk / S. Hu, J. Zhou, Q. Zhou [et al.] // Food science and technology. – 2021. – Vol. 147. – Art. 111561.
157. Ianniello, R. G. Investigation of factors affecting aerobic and respiratory growth in the oxygen-tolerant strain *Lactobacillus casei* N87 / R. G. Ianniello, T. Zotta, A. Matera [et al.] // PLoS One. – 2016. – Vol. 11, № 11. – Art. e0164065.
158. Jansch, A. Contribution of the NADH-oxidase (Nox) to the aerobic life of *Lactobacillus sanfranciscensis* DSM20451T / A. Jansch, S. Freiding, J. Behr, R. F. Vogel // Food microbiology. – 2011. – Vol. 28. – P. 29–37.
159. Jansch, A. Glutathione reductase from *Lactobacillus sanfranciscensis* DSM20451T: contribution to oxygen tolerance and thiol exchange reactions in wheat sourdoughs / A. Jansch, M. Korakli, R. F. Vogel, M. G. Ganzle // Applied and environmental microbiology. – 2007. – Vol. 73. – P. 4469–4476.
160. Jastrząb, A. Thioredoxin-dependent system. Application of inhibitors / A. Jastrząb, E. Skrzydlewska // Journal of enzyme inhibition and medicinal chemistry. – 2021. – Vol. 36. – P. 362–371.
161. Kalpana, B. J. Antibiofilm activity of α -amylase from *Bacillus subtilis* S8-18 against biofilm forming human bacterial pathogens / B. J. Kalpana, S. Aarthy, S. K. Pandian // Applied biochemistry and biotechnology. – 2012. – Vol. 167, № 6. – P. 1778–1794.
162. Kang, T. S. Influence of oxygen on NADH recycling and oxidative stress resistance systems in *Lactobacillus panis* PM1 / T. S. Kang, D. R. Korber, T. Tanaka // AMB Express. – 2013. – Vol. 3. – Art. 10.
163. Katina, K. Potential of lactic acid bacteria to inhibit rope spoilage in wheat sourdough bread / K. Katina, M. Sauri, H. L. Alakomi, T. Matila-Sandhome // LWT – Food science and technology. – 2002. – Vol. 35, № 1. – P. 38–45.
164. Khodaii, Z. Phytase activity of lactic acid bacteria isolated from dairy and pharmaceutical probiotic products / Z. Khodaii, M. M. Natanzi, M. Hassan [et al.] // Enteric pathogens. – 2013. – Vol. 1, № 1. – P. 12–16.

165. Kim, J. E. Enhancing acid tolerance of *Leuconostoc mesenteroides* with glutathione / J. E. Kim, H. J. Eom, Y. Kim [et al.] // *Biotechnology letters*. – 2012. – Vol. 34. – P. 683–687.
166. Klimko, A. I. *In vitro* evaluation of probiotic potential of selected lactic acid bacteria strains / A. I. Klimko, T. A. Cherdyntseva, A. L. Brioukhanov, A. I. Netrusov // *Probiotics and antimicrobial proteins*. – 2020. – Vol. 12, № 3. – P. 1139–1148.
167. Kohajdova, Z. Effect of incorporation of spelt flour on the dough properties and wheat bread quality / Z. Kohajdova, J. Karovicova // *Nauka. Technologia. Jakosc*. – 2007. – № 4 (53). – P. 36–45.
168. Kullisaar, T. Complete glutathione system in probiotic *Lactobacillus fermentum* ME-3 / T. Kullisaar, E. Songisepp, M. Aunapuu [et al.] // *Applied biochemistry and microbiology*. – 2010. – Vol. 46. – P. 481–486.
169. Kuznetsova, E. Composition, quality characteristics and microstructure of the grain *Triticum dicoccum* / E. Kuznetsova, L. Shayapova, E. Klimova [et al.] // *Potravinarstvo*. – 2019. – Vol. 13, № 1. – P. 933–940.
170. Lacko-Bartošová, M. The significance of spelt wheat cultivated in ecological farming in the Slovak Republic / M. Lacko-Bartošová, M. Rédlová // *Proceedings of Organic Farming*. – Prague, 2007. – P. 79–81.
171. LeBlanc, J. G. Use of superoxide dismutase and catalase producing lactic acid bacteria in TNBS induced Crohn's disease in mice / J. G. LeBlanc, S. del Carmen, A. Miyoshi [et al.] // *Journal of biotechnology*. – 2011. – Vol. 151. – P. 287–293.
172. Lechardeur, D. The 2-cys peroxiredoxin alkyl hydroperoxide reductase C binds heme and participates in its intracellular availability in *Streptococcus agalactiae* / D. Lechardeur, A. Fernandez, B. Robert [et al.] // *Journal of biological chemistry*. – 2010. – Vol. 285, № 21. – P. 16032–16041.
173. Lee, H. K. Screening and characterization of lactic acid bacteria strains with anti-inflammatory activities through in vitro and *Caenorhabditis elegans* model testing / H. K. Lee, S.-H. Choi, C. R. Lee [et al.] // *Korean journal for food science of animal resources*. – 2015. – Vol. 35, № 1. – P. 91–100.

174. Lertittikul, W. Characteristics and antioxidative activity of Maillard reaction products from a porcine plasma protein-glucose model system as influence by pH / W. Lertittikul, W. Benjakul, M. Tanaka // Food chemistry. – 2007. – Vol.100. – P. 669–677.
175. Li, S. Antioxidant and antibacterial activities of exopolysaccharides from *Bifidobacterium bifidum* WBIN03 and *Lactobacillus plantarum* R315 / S. Li, R. Huang, N. P. Shah [et al.] // Journal of dairy science. – 2014. – Vol. 97. – P. 7334–7343.
176. Lin, J. The impact of heterologous catalase expression and superoxide dismutase overexpression on enhancing the oxidative resistance in *Lactobacillus casei* / J. Lin, Y. Zou, K. Cao [et al.] // Journal of industrial microbiology and biotechnology. – 2016. – Vol. 43, № 5. – P. 703–711.
177. Liu, A. Antifungal mechanisms and application of lactic acid bacteria in bakery products: a review / A. Liu, R. Xu, S. Zhang [et al.] // Food microbiology. – 2022. – Vol. 13. – Art. 924398.
178. Liu, X. Research progress of functional lactic acid bacteria / X. Liu, M. Wang, C. Zhu [et al.] // Advances in engineering research. – 2017. – Vol. 129. – P. 643–646.
179. Lu, J. The thioredoxin antioxidant system / J. Lu, A. Holmgren // Free radical biology and medicine. – 2014. – Vol. 66. – P. 75–87.
180. Marconi, E. Spelt (*Triticum spelta* L.) pasta quality: combined effect of flour properties and drying conditions / E. Marconi, M. Carcea, M. Schiavone, R. Cubadda // Cereal chemistry. – 2002. – Vol. 76, № 1. – P. 634–639.
181. Marques Da Silva, W. Quantitative proteomic analysis of the response of probiotic putative *Lactococcus lactis* NCDO 2118 strain to different oxygen availability under temperature variation / W. Marques Da Silva, L. Castro Oliveira, S. Castro Soares [et al.] // Frontiers in microbiology. – 2019. – Vol. 10. – Art. 759.
182. Marsova, M. Protective effects of *Lactobacillus fermentum* U-21 against paraquat-induced oxidative stress in *Caenorhabditis elegans* and mouse models / M. Marsova, E. Poluektova, M. Odorskaya [et al.] // World journal of microbiology and biotechnology. – 2020. – Vol. 36. – Art. 104.

183. McCord, J. M. Superoxide dismutase: an enzymatic function for erythrocyte hemocuprein (hemocuprein) / J. M. McCord, I. Fridovich // *Journal of biological chemistry*. – 1969. – Vol. 244. – P. 6049–6055.

184. Mencin, M. Abiotic stress combinations improve the phenolics profiles and activities of extractable and bound antioxidants from germinated spelt (*Triticum spelta* L.) seeds / M. Mencin, H. Abramovic, P. Jamnik [et al.] // *Food chemistry*. – 2021. – Vol. 344. – Art. 128704.

185. Mencin, M. Enzymatic treatments of raw, germinated and fermented spelt (*Triticum spelta* L.) seeds improve the accessibility and antioxidant activity of their phenolics food science technology / M. Mencin, P. Jamnik, M. Mikulič Petkovšek [et al.] // *Food science and technology*. – 2022. – Vol. 169. – Art. 114046.

186. Naraki, S. NADH peroxidase plays a crucial role in consuming H₂O₂ in *Lactobacillus casei* IGM394 / S. Naraki, S. Igimi, Y. Sasaki // *Bioscience of microbiota food and health*. – 2020. – Vol. 39. – P. 45–56.

187. Nikitina, E. Textural and functional properties of skimmed and whole milk fermented by novel *Lactiplantibacillus plantarum* AG10 strain isolated from silage / E. Nikitina, T. Petrova, A. Vafina [et al.] // *Fermentation*. – 2022. – Vol. 8, № 6. – Art. 290.

188. Noonpakdee, W. Expression of the catalase gene katA in starter culture *Lactobacillus plantarum* TISTR850 tolerates oxidative stress and reduces lipid oxidation in fermented meat product / W. Noonpakdee, S. Sitthimonchai, S. Panyim, S. Lertsiri // *International journal of food microbiology*. – 2004. – Vol. 95. – P. 127–135.

189. Noureen, S. *In vitro* selection and in vivo confirmation of the antioxidant ability of *Lactobacillus brevis* MG000874 / S. Noureen, A. Riaz, M. Arshad, N. Arshad // *Journal of applied microbiology*. – 2019. – Vol. 126, № 4. – P. 1221–1232.

190. Pedersen, M. B. Aerobic respiration metabolism in lactic acid bacteria and uses in biotechnology / M. B. Pedersen, P. Gaudu, D. Lechardeur [et al.] // *Annual review of food science technology*. – 2012. – Vol. 3. – P. 37–58.

191. Petrof, E. O. Probiotics inhibit nuclear factor kappaB and induce heat shock proteins in colonic epithelial cells through proteasome inhibition / E. O. Petrof, K. Kojima, M. J. Ropeleski [et al.] // *Gastroenterology*. – 2004. – Vol. 127. – P. 1474–1487.
192. Pittman, M. S. A bacterial glutathione transporter (*Escherichia coli* CydDC) exports reductant to the periplasm / M. S. Pittman, H. C. Robinson, R. K. Poole // *Journal of biological chemistry*. – 2005. – Vol. 280, № 37. – P. 32254–32261.
193. Pridmore, R. D. Hydrogen peroxide production by *Lactobacillus johnsonii* NCC 533 and its role in anti-*Salmonella* activity / R. D. Pridmore, A. C. Pittet, F. Praplan, C. Cavadini // *FEMS Microbiology letters*. – 2008. – Vol. 283, № 2. – P. 210–215.
194. Pruska-Kedzior, A. Comparison of viscoelastic properties of gluten from spelt and common wheat / A. Pruska-Kedzior, Z. Kedzior, E. Klockiewicz-Kaminska // *European food research technology*. – 2008. – Vol. 227. – P. 199–207.
195. Reddy, K. B. Screening of probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from Kanjika, an ayurvedic lactic acid fermented product: an *in-vitro* evaluation / K. B. Reddy, P. Raghavendra, B. G. Kumar [et al.] // *The Journal of general and applied microbiology*. – 2007. – Vol. 53, № 3. – P. 207–213.
196. Rezaïki, L. *Lactococcus lactis* produces short-chain quinones that cross-feed Group B *Streptococcus* to activate respiration growth / L. Rezaïki, G. Lamberet, A. Derré [et al.] // *Molecular microbiology*. – 2008. – Vol. 67, № 5. – P. 947–957.
197. Rizzello, C. G. Use of fungal proteases and selected sourdough lactic acid bacteria for making wheat bread with an intermediate content of gluten / C. G. Rizzello, J. A. Curiel, L. Nionelli [et al.] // *Food microbiology*. – 2014. – Vol. 37. – P. 59–68.
198. Ruibal-Mendieta, N. L. A comparative of analysis of free, bound and total lipid content on spelt and winter wheat whole meal / N. L. Ruibal-Mendieta, D. L. Delacroix, M. Meurens // *Journal of cereal science*. – 2002. – Vol. 35. – P. 337–342.
199. Saide, J. A. Antioxidative activity of lactobacilli measured by oxygen radical absorbance capacity / J. A. Saide, S. E. Gilliland // *Journal of dairy science*. – 2005. – Vol. 88, № 4. – P. 1352–1357.
200. Schlemmer, U. Phytate in foods and significance for humans: Food sources intake processing bioavailability protective role and analysis / U. Schlemmer, W. Frølich,

R. M. Prieto, F. Grases // Molecular nutrition and food research. – 2009. – Vol. 53. – P. 330–375.

201. Schober, T. J. Characterization of functional properties of gluten proteins in spelt cultivars using rheological and quality factor measurements / T. J. Schober, C. I. Clarke, M. Kuhn // Cereal chemistry. – 2002. – Vol. 79. – P. 408–417.

202. Schober, T. J. Gluten proteins from spelt (*Triticum aestivum* ssp. *spelta*) cultivars: a rheological and size-exclusion high-performance liquid chromatography study / T. J. Schober, S. R. Bean, M. Kuhn // Journal of cereal science. – 2006. – Vol. 44. – P. 161–173.

203. Serata, M. Effect of superoxide dismutase and manganese on superoxide tolerance in *Lactobacillus casei* strain Shirota and analysis of multiple manganese transporters / M. Serata, E. Yasuda, T. Sako // Bioscience of microbiota, food and health. – 2018. – Vol. 37. – P. 31–38.

204. Serrano, L. M. Thioredoxin reductase is a key factor in the oxidative stress response of *Lactobacillus plantarum* WCFSI / L. M. Serrano, D. Molenaar, M. Wels [et al.] // Microbial cell factories. – 2007. – Vol. 6. – Art. 29.

205. Sharma, S. B. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils / S. B. Sharma, R. Z. Sayyed, M. H. Trivedi, T. A. Gobi // SpringerPlus. – 2013. – Vol. 2. – Art. 587.

206. Shi, W. Improvement of the respiration efficiency of *Lactococcus lactis* by decreasing the culture pH / W. Shi, Y. Li, X. Gao, R. Fu // Biotechnology letters. – 2016. – Vol. 38, № 3. – P. 495–501.

207. Siciliano, R. A. Impact of aerobic and respirative life-style on *Lactobacillus casei* N87 proteome / R.A. Siciliano, G. Pannella, R. Lippolis [et al.] // International journal of food microbiology. – 2019. – Vol. 298. – P. 51–62.

208. Silva, E. O. O. Lactic acid bacteria with antimicrobial, proteolytic and lipolytic activities isolated from ovine dairy products / E. O. O. Silva, C. R. Nespoloc, C. P. Sehn [et al.] // Food science and technology. – 2020. – Vol. 40, suppl. 1. – P. 293–299.

209. Sohiab, M. Oxidative stability and lipid oxidation flavoring volatiles in antioxidants treated chicken meat patties during storage / M. Sohiab, F. M. Anjum, M. S. Arshad [et al.] // *Lipids in health and disease*. – 2017. – Vol. 16, № 1. – Art. 27.

210. Strechlow, W. The dietary properties of spelt in the treatment of chronic diseases / W. Strechlow, G. Hertzka, W. Wueffen // *Proceedings*, vol. 2. – Stuttgart : Hohenheimer Dinkelkolloquium Verlag, 1991. – P. 243–259.

211. Sun, L. A novel lactic acid bacterium for improving the quality and shelf life of whole wheat bread / L. Sun, X. Li, Y. Zhang [et al.] // *Food control*. – 2020. – Vol. 109. – Art. 106914.

212. Tachon, S. Identification of a conserved sequence in flavoproteins essential for the correct conformation and activity of the NADH oxidase NoxE of *Lactococcus lactis* / S. Tachon, E. Chambellon, M. Yvon // *Journal of bacteriology*. – 2011. – Vol. 193. – P. 3000–3008.

213. Tachon, S. NoxE NADH oxidase and the electron transport chain are responsible for the ability of *Lactococcus lactis* to decrease the redox potential of milk / S. Tachon, J. B. Brandsma, M. Yvon // *Applied and environmental microbiology*. – 2010. – Vol. 76, № 5. – P. 1311–1319.

214. Tao, Y. Soluble factors from *Lactobacillus* GG activate MAPKs and induce cytoprotective heat shock proteins in intestinal epithelial cells / Y. Tao, K. A. Drabik, T. S. Waypa [et al.] // *American journal of physiology. Cell physiology*. – 2006. – Vol. 290, № 1. – P. 1018–1030.

215. Tieking, M. Exopolysaccharides from cereal associated lactobacilli / M. Tieking, M.G. Ganzle // *Trends in food science and technology*. – 2005. – Vol. 16. – P. 1679–1684.

216. Tuoc, T. K. On the texture profile analysis test / T. K. Tuoc, S. Glasgow // *Proceedings of Chemeca 2012: Quality of life through chemical engineering* (23–26 September 2012, Wellington, New Zealand). – Adelaide : Engineers Australia, 2012. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/316093466> (дата обращения: 30.05.2024).

217. van Niel, E. W. J. Formation and conversion of oxygen metabolites by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* ATCC 19435 under different growth conditions / E. W. J. van

Niel, K. Hofvendahl, B. Hahn-Hägerdal // Applied and environmental microbiology. – 2002. – Vol. 68. – P. 4350–4356.

218. Wagner, S. Änderungen in der Zusammensetzung von keimendem Getreide und Amaranth; Studien zum Abbau von fällbarem Phytät in Weizenmehlteigen / S. Wagner, M. Kuhn // Getreide Mehl und Brot. – 1994. – Vol. 4. – S. 6–10.

219. Watanabe, M. Effect of respiration and manganese on oxidative stress resistance of *Lactobacillus plantarum* WCFS1 / M. Watanabe, S. Veen, H. Nakajima, T. Abee // Microbiology. – 2012. – Vol. 158, № 1. – P. 293–300.

220. Wilson, J. D. Bread quality of spelt wheat and its starch / J. D. Wilson, D. B. Bechtel, G. W. T. Wilson, P. A. Seib // Cereal chemistry. – 2008. – Vol. 85, № 5. – P. 629–638.

221. Yamamoto, N. Antioxidant capacity of soymilk yogurt and exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria / N. Yamamoto, M. Shoji, H. Hoshigami [et al.] // Bioscience of microbiota, food and health. – 2019. – Vol. 38. – P. 97–104.

222. Yan, F. Probiotic bacterium prevents cytokine-induced apoptosis in intestinal epithelial cells / F. Yan, D. B. Polk // Journal of biological chemistry. – 2002. – Vol. 277. – P. 50959–50965.

223. Zhang, S. Antioxidative activity of lactic acid bacteria in yogurt / S. Zhang, L. Liu, Y. Su [et al.] // African journal microbiology research – 2011. – Vol. 5. – P. 5194–5201.

224. Zhang, Y. Engineering the antioxidative properties of lactic acid bacteria for improving its robustness / Y. Zhang, Y. Li // Current opinion in biotechnology. – 2013. – Vol. 24, № 2. – P. 142–147.

225. Zheng, J. A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae* / J. Zheng, S. Wittouck, E. Salvetti [et al.] // Journal of systematic and evolutionary microbiology. – 2020. – Vol. 70, № 4. – P. 2782–2858.

226. Zielinski, H. Bioactive compounds in spelt bread / H. Zielinski, A. Michalska-Ciechanowska, A. Ceglinska // European food research and technology. – 2008. – Vol. 226. – P. 537–544.

227. Zotta, T. Aerobic metabolism in the genus *Lactobacillus*: impact on stress response and potential applications in the food industry / T. Zotta, E. Parente, A. Ricciardi // Journal of applied microbiology. – 2017. – Vol. 122, № 4. – P. 857–869.

228. Zotta, T. Selection of mutants tolerant of oxidative stress from respiratory cultures of *Lactobacillus plantarum* C17 / T. Zotta, R.G. Ianniello, A. Guidone [et al.] // Journal of applied microbiology. – 2014. – Vol. 116, №3. – P. 632–643.

229. Zotta, T. Temperature and respiration affect the growth and stress resistance of *Lactobacillus plantarum* C17 / T. Zotta, A. Guidone, R. G. Ianniello [et al.] // Journal of applied microbiology. – 2013. – Vol. 115. – № 3. – P. 848–858.

Приложение А
(справочное)

Технические условия на закваску молочнокислых бактерий
для зерновых сортов хлеба

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»
(ФГБОУ ВО «КНИТУ»)

УТВЕРЖДАЮ
Директор Института пищевых производств
и биотехнологии
Сироткин А.С.
«25» февраля 2025г.



ЗАКВАСКА МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ
ДЛЯ ЗЕРНОВЫХ СОРТОВ ХЛЕБА

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
ТУ 10.89.19.300 – 002 – 02069639 – 2025
(вводятся впервые)

дата введения 01.03.2025г.

РАЗРАБОТАНО:

проф. О.А. Решетник
доц. С.В. Китаевская
асс. Д.Р. Камартдинова

Казань, 2025

Приложение Б
(справочное)

Патент на изобретение «Способ получения зернового хлеба»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2829513

Способ получения зернового хлеба

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет" (ФГБОУ ВО "КНИТУ") (RU)*

Авторы: *Камартидинова Дарья Рафаэловна (RU), Китаевская Светлана Владимировна (RU), Решетник Ольга Алексеевна (RU)*

Заявка № 2024104833
Приоритет изобретения 27 февраля 2024 г.
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 31 октября 2024 г.
Срок действия исключительного права на изобретение истекает 27 февраля 2044 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0692a7b51a9300b542604670acc2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 30.09.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



Приложение В
(справочное)

Нормативно-техническая документация на зерновой хлеб «Борай»



ЗЕРНОВОЙ ХЛЕБ «БОРАЙ»
ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
ТУ 10.71.11 – 002 – 2005989134 - 2024
(вводятся впервые)

дата введения 01.02.2024 г.

РАЗРАБОТАНО:

ИП Рамеев Р.Р.:

Рамеев Р.Р. Рамеев

ФГБОУ ВО «КНИТУ» кафедра ТПП:

проф. О.А. Решетник

доц. С.В. Китаевская

асп. Д.Р. Камартдинова

Набережные Челны, 2024.



УТВЕРЖДАЮ

ИП Рамеев Р.Р.

01.02. 2024 г.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЗЕРНОВОГО ХЛЕБА «БОРАЙ»**

ТИ к ТУ 10.71.11 – 002 – 2005989134 - 2024

дата введения 01.02.2024г.

РАЗРАБОТАНО:

ИП Рамеев Р.Р.:

Рамеев Р.Р. Рамеев

ФГБОУ ВО «КНИТУ» кафедра ТПП:

Решетник проф. О.А. РешетникКитаевская доц. С.В. КитаевскаяКамартдинова асп. Д.Р. Камартдинова

Набережные Челны, 2024



УТВЕРЖДАЮ

ИП Рамеев Р.Р.

01.02 2024 г.**РЕЦЕПТУРА****ЗЕРНОВОГО ХЛЕБА «БОРАЙ»**

РЦ к ТУ 10.71.11 – 002 – 2005989134 - 2024

дата введения 01.02.2024г.**РАЗРАБОТАНО:**

ИП Рамеев Р.Р.:

Рамеев Р.Р. Рамеев

ФГБОУ ВО «КНИТУ» кафедра ТПП:

Решетник проф. О.А. РешетникКитаевская доц. С.В. КитаевскаяКамартдинова асп. Д.Р. Камартдинова

Набережные Челны, 2024

Приложение Г (справочное)

Акт производственных испытаний



АКТ

производственных испытаний

способа приготовления зернового хлеба «Борай»

Мы, нижеподписавшиеся, ИП Рамеев Р.Р. и представители ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», провели выпуск опытно-промышленной партии зернового хлеба «Борай» на основе ферментированной зерновой массы.

Для приготовления зернового хлеба «Борай» использовали следующее сырье: зерно полбы (продовольственное), мука полбяная цельнозерновая, дрожжи хлебопекарные прессованные, соль поваренную пищевую, сухую закваску лактобактерий *L. casei* 32, *L. fermentum* 10, *L. plantarum* 24, воду питьевую. Подготовку сырья к производству производили в соответствии с «Технологическими инструкциями по производству хлебобулочных изделий» (М, 1989).

Тесто готовили на основе ферментированной молочнокислой закваской зерновой массы. Рецепт и режим приготовления теста для зернового хлеба «Борай» представлены в табл. 1.

Зерно полбы промывали водой, отволаживание проводили в течение 24 часов при температуре 18-20 °С, меняя воду 4 раза. Затем зерно снова промывали и проращивали в течение 12 часов до появления ростков размером не более 1,5 мм. Пророщенное зерно измельчали на роторном диспергаторе РДН-Х. В диспергированную зерновую массу вносили закваску молочнокислых бактерий в гидратированном виде (1:2) в количестве 10⁷ КОЕ/г, замес осуществляли в тестомесильной машине HKN-M30SN2V. Ферментацию зерновой массы осуществляли при температуре 37 °С в течение 4 ч до достижения pH=4.

На основе ферментированной зерновой массы готовили тесто безопасным способом согласно рецептуре. Брожение теста осуществлялось при температуре 30 -32 °С. Разделку теста осуществляли при помощи тестоделителя, заготовки массой 0,35 кг укладывали в хлебопекарные формы. Расстойку тестовых заготовок осуществляли при температуре 38 °С и относительной влажности воздуха 75-80 % в расстоечном шкафу ШРЭ-2.1. в течение 40-50 мин. Выпечку тестовых заготовок проводили при температуре

пекарной камеры (Abat ЭШ-ЗК) 180 - 200 °С. Продолжительность выпечки составляла 35-40 мин.

Таблица 1 - Рецепт и режим приготовления теста для зернового хлеба «Борай»

Наименование сырья, полуфабрикатов и показателей процесса	Расход сырья и параметры технологического процесса	
	ферментированная зерновая масса	тесто
Зерно полбы (продовольственное зерно), кг	100/154*	-
Мука полбяная цельнозерновая	48	-
Сухая закваска молочнокислых бактерий <i>L. casei</i> 32, <i>L. fermentum</i> 10, <i>L. plantarum</i> 24	1,0	-
Дрожжи хлебопекарные прессованные, кг	-	4,1
Соль поваренная пищевая, кг	-	3,2
Вода, кг	по расчету**	по расчету**
Ферментированная зерновая масса, кг	-	174,6
Влажность, %, не более	46	49
Продолжительность ферментации, ч	4	-
Продолжительность брожения, мин.	-	60-90
Начальная температура, °С	38-40	30-32
Конечная кислотность, град. не более	8,0	5,5

* - масса набухшего зерна;

** - исходя из влажности готовых изделий 48 %.

Готовые изделия анализировали через 14-16 ч после выпечки по органолептическим и физико-химическим показателям. Результаты анализа качественных характеристик зернового хлеба представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Показатели качества зернового хлеба «Борай»

Показатели качества	Характеристика и значения показателей
1	2
Физико-химические показатели	
Влажность, %	48,5
Кислотность, град.	4,4
Пористость, %	49,87
Формоустойчивость	1,91
Органолептические показатели	
Внешний вид: форма	правильная, хлеб с заметно выпуклой верхней коркой
поверхность	слегка шероховатая, без подрывов и трещин
цвет	золотисто-коричневый
Состояние мякиша: пористость	пористость развитая, без пустот и уплотнений, с вкраплением оболочек зерна
пропеченность	пропеченный, не заминающийся

Вкус и запах	приятный, свойственный зерновому хлебу, без постороннего привкуса и запаха
--------------	---

Заключение:

Проведенные промышленные испытания и результаты определения показателей качества зернового хлеба «Борай» установили, что технология приготовления зернового хлеба на основе ферментированной зерновой массы молочнокислыми бактериями *L. casei* 32, *L. fermentum* 10, *L. plantarum* 24 применима для производства в условиях хлебозаводов и малых хлебопекарных предприятий.

Исследование основных параметров технологического процесса тестоприготовления зернового хлеба «Борай» показало целесообразность промышленного внедрения с разработкой соответствующей технической документацией, что позволит расширить ассортимент зернового хлеба и удовлетворить спрос населения в хлебобулочных изделиях повышенной пищевой ценности.

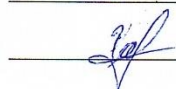
Представители ИП Рамеев Р.Р.:

Директор



Р.Р. Рамеев

Технолог



Д.А. Гараева



Представители ФГБОУ ВО КНИТУ:

Зав. каф. технологии пищевых производств,

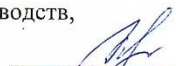
д.т.н., проф.



О.А. Решетник

Доцент каф. технологии пищевых производств,

к.т.н.



С.В. Китаевская

Ассистент каф. технологии пищевых производств



Д.Р. Камартдинова

Заведующий кафедрой ТПП, д.т.н., профессор З.Ш. Мингалева