

На правах рукописи



Науменко Наталья Владимировна

**НАУЧНОЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ СНИЖЕНИЯ
РИСКОВ КОНТАМИНАЦИИ И ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ПОТЕРЬ
ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ**

Специальность 05.18.15 –
Технология и товароведение пищевых продуктов
функционального и специализированного назначения
и общественного питания

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре пищевых и биотехнологий
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Потороко Ирина Юрьевна (Россия),
заведующий кафедрой пищевых и биотехнологий
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный
университет (НИУ)»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Мартиросян Владимир Викторович (Россия),
заместитель директора по научной работе
ФГАНУ Научно-исследовательский институт
хлебопекарной промышленности

доктор технических наук, доцент
Медведев Павел Викторович (Россия),
заведующий кафедрой технологии пищевых
производств ФГБОУ ВО «Оренбургский
государственный университет»

доктор технических наук, доцент
Губаненко Галина Александровна (Россия),
заведующий кафедрой технологии и организации
общественного питания ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Кубанский государственный аграрный
университет имени И. Т. Трубилина»

Защита диссертации состоится 5 февраля 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.287.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет» по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/ Народной Воли, 62/45, ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», зал диссертационных советов (ауд. 150).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет». Автореферат размещен на официальном сайте ВАК при Минобрнауки России: <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет»: <http://science.usue.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

О. В. Феофилактова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Получение продуктов питания на основе зернового сырья, обладающих повышенной пищевой ценностью и гарантированных по показателям безопасности в соответствии с концепцией «от поля до потребителя», сопряжено с большим количеством проблем, в числе которых устойчивая динамика ухудшения качества и технологических свойств зерна, риски контаминации сырья и конечных продуктов токсигенными плесеньями на различных этапах жизненного цикла.

На сегодняшний день международными организациями (ИСС, ААСС, NACMCF, ICMSF, ФАО) определена глобальная проблема – около 20 % ежегодных общемировых потерь зерна, обусловленных развитием патогенной микрофлоры и загрязнением продуктов переработки ее метаболитами. В Российской Федерации, по данным АЦ Минсельхоза России и ФГУ «Федеральный центр оценки безопасности и качества зерна и продуктов его переработки», в 2019 г. с превышением максимально допустимого уровня по показателям безопасности было выявлено 430 тыс. т зерна пшеницы.

В законодательных и нормативных документах, утвержденных Правительством Российской Федерации, в качестве инструмента для решения вышеуказанных проблем определено формирование единой концепции минимизации потерь продовольственных ресурсов, увеличение выхода готовой продукции с единицы перерабатываемого сырья и получение безопасных пищевых продуктов. Среди принятых на федеральном уровне законодательных актов в настоящее время можно выделить Стратегию повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 г. (распоряжение Правительства РФ от 29 июня 2016 г. № 1364-р), Долгосрочную стратегию развития зернового комплекса Российской Федерации до 2035 г. (распоряжение Правительства РФ от 10 августа 2019 г. № 1796-р) и Доктрину продовольственной безопасности Российской Федерации (указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20), а также проект Стратегии развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 г., которые определяют базирование развития пищевой промышленности, на применении наукоемких подходов и инновационных решений.

В связи с этим использование новых технологий позволит создавать и внедрять в практику решения, обеспечивающие комплексную переработку сельскохозяйственного сырья, нацеленную на минимизирование продовольственных потерь, снижение рисков контаминации микотоксинами и обеспечение высоких стандартов экологической безопасности производства. Действенным инструментом для достижения результата может стать единая методология получения продуктов питания повышенной пищевой ценности, предполагающая использование принципиально новых технологий получения растительных безопасных сырьевых ингредиентов на основе методов физического воздействия.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в раскрытие механизмов биохимических процессов технологии переработки зернового сырья внесли известные ученые, которые сформировали научный потенциал и фундаментальные знания в области процессов хлебопечения: Л. Я. Ауэрман, Н. П. Козьмина, Л. И. Мачихина, Р. Д. Поландова, Л. А. Трисвятский, В. А. Тутельян, Е. Д. Казаков и др.

Изучению вопросов безопасности зернового сырья и разработке концепции прослеживаемости пищевых продуктов растительного происхождения посвящены работы Г. А. Губаненко, Л. В. Донченко, Н. И. Дунченко, Г. А. Закладного, А. П. Косована, П. В. Медведева, Е. П. Мелешкиной, В. Д. Надыкта, Т. Б. Цыгановой, S. De Saeger, U. S. Annapure и др.

Научный вклад в основы производства продуктов питания, выработанных на основе растительного сырья, в том числе зернового, внесли Т. Г. Богатырева, И. С. Витол, Н. И. Давыденко, Н. М. Дерканосова, М. Н. Костюченко, С. Я. Корякина, В. В. Мартирисян, Л. А. Маюрникова, А. А. Покровский, В. М. Позняковский, И. Ю. Резниченко, А. С. Романов, И. В. Симакова, Л. Н. Шатнюк, Д. В. Шнейдер, C. Hoseneey, T. V. Price, J. Ding, G. G. Houb, S. Xiong и др.

Эффективность физических методов воздействия при производстве пищевых продуктов доказана в работах О. Н. Красули, В. Я. Черных, Н. В. Цугленка, В. Н. Хмелева, С. Д. Шестакова, M. Ashokkumar, M. Morales de la Peña, T. J. Mason, F. Chemat и др.

Научные результаты вышеперечисленных ученых послужили основой при разработке методологического подхода к получению сырьевого ингредиента из зерна пшеницы для использования в технологии хлебобулочных изделий. Научные исследования в данном направлении позволяют развить технологии переработки зерна пшеницы низкого качества с применением новых методов физического воздействия для обеззараживания в целях снижения продовольственных потерь и рисков контаминации микотоксинами, а также интенсификации накопления биологически активных веществ без ухудшения технологических свойств исходного сырья.

Работа проводилась в рамках программы Правительства РФ (постановление от 16 марта 2013 г. № 211), соглашение № 02.A03.21.0011, при финансовой поддержке государственного задания № 40.8095.2017/БЧ (2017123-ГЗ), гранта РФФИ 18-53-45015, гранта благотворительной программы «Стипендиальная программа Владимира Потанина» № ГСГК-40/18.

Цель диссертационного исследования заключается в научно-практическом обосновании и разработке технологии получения сырьевого ингредиента – цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы с применением методов физического воздействия для минимизации продовольственных потерь, снижения рисков контаминации и повышения пищевой ценности хлебобулочных изделий.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1) установить теоретические предпосылки необходимости разработки комплексного подхода к технологии переработки зерна пшеницы, базирующегося на принципах обеспечения безопасности и качества сырья и продуктов, полученных на его основе, для решения вопросов минимизации продовольственных потерь в целях устойчивого развития предприятий хлебопекарной отрасли;

2) разработать и верифицировать методологический подход к получению безопасного сырьевого ингредиента повышенной пищевой ценности на основе минимизации рисков микробной контаминации и снижения продовольственных потерь, а также обеспечения его технологической пригодности для размещения в пищевой системе продукта;

3) определить риски контаминации микотоксинами разработанного сырьевого ингредиента – цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы в зависимости от применяемых технологических процессов и установить рациональные методы физического воздействия для его обеззараживания;

4) определить механизмы влияния воздействующих факторов на процессы получения цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы и на основе математического моделирования установить рациональные режимы ведения процессов;

5) в целях минимизации продовольственных потерь разработать систему менеджмента безопасности производства цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы, определить вариативность показателей качества, безопасности и пищевой ценности полученного сырьевого ингредиента при хранении;

6) установить механизмы встраивания цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы в пищевую систему хлебобулочных изделий, определить технологические риски использования данного сырьевого ингредиента в процессе тестоведения и способы их минимизации;

7) разработать рецептуры хлебобулочных изделий, полученных с использованием цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы, провести товароведную оценку качества, безопасности готовых изделий, установить вариативность показателей при хранении;

8) с применением модели *in vitro* и *in vivo* провести оценку эффективности разработанного сырьевого ингредиента в составе хлебобулочных изделий, для минимизации воздействия стрессорных факторов;

9) разработать прогностическую модель факторов потребительского поведения в отношении хлебобулочных изделий, полученных с использованием цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы, провести апробацию результатов исследования в условиях производства и оценить экономическую эффективность внедрения разработанных технологий.

Научная концепция заключается в научно-практическом обосновании комплексного методологического подхода к получению сырьевого ингредиента – цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы с применением новых технологических приемов на основе методов физического воздействия для снижения рисков контаминации и минимизации продовольственных потерь при производстве продуктов повышенной пищевой ценности.

Научная новизна. Диссертационная работа содержит элементы научной новизны в рамках п. 2, 3, 4, 5 и 6 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15:

- предложен методологический подход к получению безопасного сырьевого ингредиента на основе снижения рисков контаминации и продовольственных потерь (*п. 3 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15*);

- обоснованы, экспериментально подтверждены и верифицированы технологические приемы снижения рисков контаминации и продовольственных потерь при получении безопасного сырьевого ингредиента на основе пророщенного зерна пшеницы для использования в производстве хлебобулочных изделий повышенной пищевой ценности с доказанной эффективностью (*п. 4 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15*);

- научно обоснованы и раскрыты механизмы, доказывающие эффективность обеззараживающего воздействия холодного плазменного излучения (в режиме: напряжение 10 кВ, частота 50 Гц, экспозиция 9 мин), позволяющего блокировать развитие токсигенных плесеней при проращивании зерна пшеницы, минимизировать риски накопления микотоксинов в сырьевых ингредиентах и готовых изделиях и обеспечить снижение продовольственных потерь (*п. 4 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15*);

- расширены представления о механизмах ультразвукового воздействия для стимулирования процесса проращивания зерна пшеницы и в условиях вариативности исходных параметров сырья определен рациональный режим ультразвукового воздействия в гидромодуле (мощность 378 Вт, экспозиция 3 мин) (*п. 3 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15*);

- впервые с помощью математической обработки массива экспериментальных данных (программный продукт Statistica 13) получены корреляционные зависимости между показателями для процессов замачивания и проращивания, на основе которых с учетом обобщенного критерия оптимальности установлены рациональные параметры ведения процессов (*п. 3 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15*);

- впервые установлено, что метод ультразвукового воздействия, используемый при проращивании зерна пшеницы в гидромодуле, является фактором, определяющим повышение пищевой ценности сырьевого ингредиента за счет синтеза и накопления γ -аминомасляной кислоты ($(18,9 \pm 0,3)$ мг/100 г) и повышения показателя общей антиоксидантной ем-

кости ($(6,9 \pm 0,3)$ мг ТЕАС/г), при интенсификации накопления определяющих ее веществ (флавоноидов – $(1,79 \pm 0,21)$ мг QE/г; фенольных кислот – $(3,57 \pm 0,35)$ мг САЕ/г и полифенольных соединений – $(5,35 \pm 0,23)$ мг GAE/г) (*п. 2, 4 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15*);

– подтверждено, что цельносмолотая мука из пророщенного зерна пшеницы, полученная по разработанным технологиям, сохраняет технологические свойства и пищевую ценность в течение 9 мес. хранения в вакуумной упаковке (*п. 5 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15*);

– научно обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы в технологии производства хлебобулочных изделий повышенной пищевой ценности (простых и улучшенных по рецептуре) с доказанной безопасностью (*п. 4 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15*);

– с применением методов СЭМ и ДСК экспериментально подтверждено, что использование цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы в рецептуре хлебобулочных изделий снижает интенсивность процессов черствения, происходящих при хранении (*п. 4, 5 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15*);

– получена прогностическая модель факторов потребительского поведения в отношении разработанных хлебобулочных изделий с цельносмолотой мукой из пророщенного зерна пшеницы, определены основные направления выстраивания политики продвижения данных продуктов на потребительском рынке (*п. 6 Паспорта специальности ВАК РФ 05.18.15*).

Методология и методы исследований. Методология диссертационной работы базировалась на логически выстроенной последовательности исследований на основе сбора и анализа информации, систематизации результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также обобщении практических разработок в области комплексного подхода к технологии переработки зерна пшеницы и возможности использования полученного безопасного сырьевого ингредиента в производстве хлебобулочных изделий повышенной пищевой ценности.

Положения, выносимые на защиту:

– методологический подход к получению безопасного сырьевого ингредиента на основе пророщенного зерна пшеницы для размещения в системе пищевого продукта с целью повышения его пищевой ценности;

– результаты исследования применения метода воздействия холодного плазменного излучения для обеззараживания зернового сырья с целью минимизации рисков возникновения продовольственных потерь и накопления микотоксинов токсигенными плесеньями;

– результаты разработки технологии получения цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы на основе массива данных, полученных при оценке и установлении рациональных режимов ультразвукового воздействия на процессы замачивания и проращивания;

– результаты экспериментальных исследований качества, безопасности и пищевой ценности цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы и вариативности показателей при хранении;

– совокупность результатов экспериментальных данных, подтверждающих эффективность применения цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы в технологии хлебобулочных изделий повышенной пищевой ценности с учетом механизмов встраивания сырьевого ингредиента в систему продукта, влияния на процессы черствения и эффективности биологического воздействия на моделях *in vitro* и *in vivo*.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработан методологический подход к переработке зерна пшеницы и получению безопасного сырьевого ингредиента, применение которого в практической деятельности обеспечит экономию средств за счет снижения продовольственных потерь и включения в производство сырья разнородного качества, а также выявит направленность мероприятий по обеспечению безопасности и формирования заданных свойств хлебобулочных изделий.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработаны и предложены:

– метод обеззараживания зерна пшеницы на основе рациональных режимов физического воздействия холодным плазменным излучением;

– шкала определения микрофинологических фаз контролируемого проращивания зерна пшеницы;

– технология контролируемого замачивания и проращивания зерна пшеницы на основе рациональных режимов ультразвукового воздействия;

– рецептуры хлебобулочных изделий, полученных с использованием цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы.

Научно-технические решения подтверждены четырьмя патентами Российской Федерации: патент № 2668096 «Способ производства хлеба», патент № 2690486 «Способ стимулирования прорастания зерна», патент № 2707944 «Способ обеззараживания зерна», патент № 2723957 «Способ производства хлеба с использованием пророщенного зерна пшеницы».

Обоснованные технико-технологические результаты исследования апробированы в условиях реального производства на предприятиях Уральского региона, что подтверждено соответствующими актами апробации (ООО «Боровое», ООО «Агрофирма Ариант», ООО «Черновской Хлеб», ИП Акопян Г. С. «Хлебный дом»).

Разработанные методы системного подхода и моделирования получения безопасного сырьевого ингредиента на основе пророщенного зерна пшеницы внедрены в качестве базовых в практику организации технологии производства и контроля хлебобулочных изделий на предприятии ООО «Боровое». По результатам исследований разработаны и утверждены комплекты технической документации на новые виды продуктов.

Материалы данных исследований широко используются в учебном процессе при чтении лекций, курсовом и дипломном проектировании работ студентов, обучающихся в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по основным образовательным программам подготовки бакалавров 38.03.07 «Товароведение», 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья» и магистров 19.04.01 «Биотехнология», 19.04.05 «Высокотехнологичные производства пищевых продуктов функционального и специализированного назначения». Теоретические результаты диссертации включены в учебный процесс при чтении цикла лекций и проведении лабораторных работ по дисциплинам «Инновации в пищевой биотехнологии», «Биотехнологические основы хлебопекарного производства», «Методы исследования свойств сырья и продуктов питания», «Основы рационального использования сырья» на кафедре пищевых и биотехнологий ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах различного уровня, в том числе на международных научно-практических конференциях «Торгово-экономические проблемы регионального бизнес-пространства» (Челябинск, 2008–2015); 63-й, 66-й и 67-й научных конференциях ЮУрГУ, секция «Экономика, управление и право» (Челябинск, 2009, 2011, 2014, 2015); международной научно-практической конференции «Использование электрофизических методов исследования для производства и оценки качества пищевых продуктов» (Санкт-Петербург, 2012); международной научно-практической конференции молодых ученых «Экономика и бизнес. Взгляд молодых» (Челябинск, 2012, 2016); VI Международной научно-практической конференции «Экономический рост Республики Беларусь: глобализация, инновационность, устойчивость», посвященной 80-летию БГЭУ (Минск, 2013); 2-й Международной инновационной научно-практической конференции «Современная торговля: теория, практика, перспективы развития» (Москва, 2013); научной конференции аспирантов и докторантов (Челябинск, 2015); международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Челябинск, 2016); International Conference on Biosystems Engineering (BSE 2017) (Тарту, 2017); всероссийской научно-практической конференции «Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продуктов питания» (Курган, 2017); международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию Курганской области «Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции» (Курган, 2018); научной конференции с международным участием института промышленного менеджмента, экономики и торговли «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2018); международной научной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con», IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Владивосток, 2018); V Международной

научно-практической конференции «Инновационные технологии в сфере питания, сервиса и торговли» (Екатеринбург, 2018); всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Биотехнологические аспекты управления технологиями пищевых продуктов в условиях международной конкуренции» (Курган, 2019); X Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Орловского государственного университета им. И. С. Тургенева (Орел, 2019); 6-й Научной выставке-конференции научно-технических и творческих работ «Молодой исследователь» (Челябинск, 2019); VI Научно-практической конференции с международным участием «Управление реологическими свойствами пищевых продуктов» (Москва, 2019); VI Международной научно-практической конференции «Новые концептуальные подходы к решению глобальной проблемы обеспечения продовольственной безопасности в современных условиях» (Курск, 2019); XXIV Международной научно-практической конференции «Инновация-2019» (Ташкент, 2019); всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Научно-инновационные технологии как фактор устойчивого развития агропромышленного комплекса» (Курган, 2020); VII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в пищевой промышленности и общественном питании» (Екатеринбург, 2020); 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем» (Курск, 2020).

Результаты диссертационной работы представлены на конкурсах, награждены дипломами и медалями: VI Межрегиональная агропромышленная выставка УрФО «АГРО-2015» – диплом II степени (Ханты-Мансийск, 2015); Российская агропромышленная выставка «Золотая осень 2015, 2018, 2019» – диплом, серебряная и бронзовые медали (Москва, 2015, 2018, 2019).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 84 печатных работы, в том числе 3 монографии, 22 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 8 статей, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science, ряд статей в материалах конференций и сборниках научных трудов, а также 4 патента Российской Федерации.

Личный вклад автора состоит в постановке и обосновании проблемы, разработке структуры и схемы проведения исследований, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных результатов, обобщении имеющихся материалов и подготовке их к публикации, организации внедрения результатов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов, списка литературы из 398 наименований (в том числе 215 источников иностранной литературы) и 7 приложений. Основное содержание работы изложено на 422 страницах, содержит 120 рисунков и 69 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая, практическая значимость выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Обоснование комплексного подхода в технологиях переработки зерна. Проведен глубокий аналитический обзор научно-технической литературы и материалов исследований отечественных и зарубежных авторов в области разработки технологий получения сырьевых ингредиентов из зерна пшеницы. Охарактеризованы современные подходы к технологии переработки зерна при ведении процессов проращивания и получения сырьевых ингредиентов, обладающих повышенной пищевой ценностью. На основании анализа научно-технической информации определены факторы возникновения рисков микробной контаминации зерна и зерновых продуктов, которые формируют продовольственные потери на этапах переработки и хранения. В ходе анализа доступной информации систематизированы используемые в российской и мировой практике способы обеззараживания зерновых культур; установлено, что физические методы, обладающие высоким потенциалом воздействия на биологические объекты, изучены и описаны недостаточно.

С учетом высокой пищевой ценности зерна и продуктов его переработки в рамках решения *первой задачи* обоснована необходимость разработки комплексного подхода к технологии переработки зерна пшеницы, базирующегося на принципах обеспечения безопасности, минимизации продовольственных потерь, сохранении качества зернового сырья и готовых пищевых продуктов.

Глава 2. Организация эксперимента, объекты и методы исследования. Изложена методология и поэтапная организация проведения исследований. Исследования выполнены автором в специализированных центрах и аккредитованных лабораториях: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (НОЦ «Продукты здорового питания и индустриальные технологии», НОЦ «Нанотехнологии», международной НИЛ «Синтез и анализ пищевых ингредиентов», НИЛ «Компьютерное моделирование лекарственных средств»); ИЛ «Тест-Пушино», (г. Пушино); научных лабораториях факультета биотехнологии и пищевой промышленности Словацкого сельскохозяйственного университета (г. Нитра, Словакия), лаборатории «Самоцвет», лаборатории ООО «ВИТЭКС» и лаборатории ФГБУ «Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Челябинский» (ФГБУ «Челябинскагрохимрадиология»).

Общая схема постановки, организации и проведения эксперимента, краткая характеристика объектов и методов исследований представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Обобщенная схема исследований

Объектами исследований на различных этапах выполнения работы являлись:

- партии зерна пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.) сортов «Любава» (рекомендуемая зона возделывания – степная зона Южного Урала, Центральный регион России) и «Эритроспериум 59» (рекомендуемая зона возделывания – лесостепная и степная зона Южного Урала, Западно-Сибирский регион). Отбор проб производился в соответствии с требованиями ГОСТ 13586.3-83 и ГОСТ 13586.3-2015 в период с 2014 по 2018 г., общее количество исследуемых образцов зерна пшеницы за указанный период – 405 проб;

- цельносмолотая мука из пророщенного зерна пшеницы (ЦСМПЗП), полученная согласно разработанной технологии;

- модельные смеси муки пшеничной хлебопекарной (МПХ) первого сорта по ГОСТ Р 26574-2017 (производитель – ООО «Объединение «Союзпищепром», г. Челябинск) и ЦСМПЗП;

- лабораторные и промышленные образцы хлебобулочных изделий из муки пшеничной хлебопекарной первого сорта и ЦСМПЗП.

Экспериментальные исследования проводились с использованием общепринятых и стандартных методов, а также методов математического моделирования и обработки экспериментальных данных, удовлетворяющих цели и задачам работы.

Для объективной и достоверной оценки результатов исследований использовались методы статистической обработки данных с применением программных продуктов Microsoft Excel, Statistica 13, MathCad 14.0 и OriginPro 8.5.1.

Глава 3. Методологическое обоснование и практическая реализация технологии безопасного сырьевого ингредиента из зерна пшеницы. В рамках решения *второй задачи* работы разработан методологический подход (рисунок 2) к получению безопасного сырьевого ингредиента для размещения в пищевой системе продукта. Применение на практике пищевых производств методологического подхода, ориентированного на минимизацию рисков микробной контаминации и обеспечение технологической пригодности сырьевого ингредиента, позволит снизить продовольственные потери и получить гарантированно безопасный продукт повышенной пищевой ценности.

Предложенный методологический подход был апробирован в исследовательской части диссертационной работы; сформирована доказательная база, подтверждающая его рациональность; проведена верификация качества и безопасности конечных продуктов переработки зерна.

С позиций системного анализа для решения задачи производства безопасного сырьевого ингредиента ЦСМПЗП предложена методология моделирования в нотации IDEF0 для цепочки «Зерно пшеницы → ЦСМПЗП» (рисунок 3).



Рисунок 2 – Методологический подход к получению безопасного сырьевого ингредиента на основе снижения рисков контаминации и продовольственных потерь

Разработанная система управления качеством и безопасностью продуктов переработки зерна сформирована при использовании методики эмпирического оценивания в условиях неопределенности параметров, что дало возможность обеспечить безопасность сырьевого ингредиента на всех стадиях жизненного цикла.

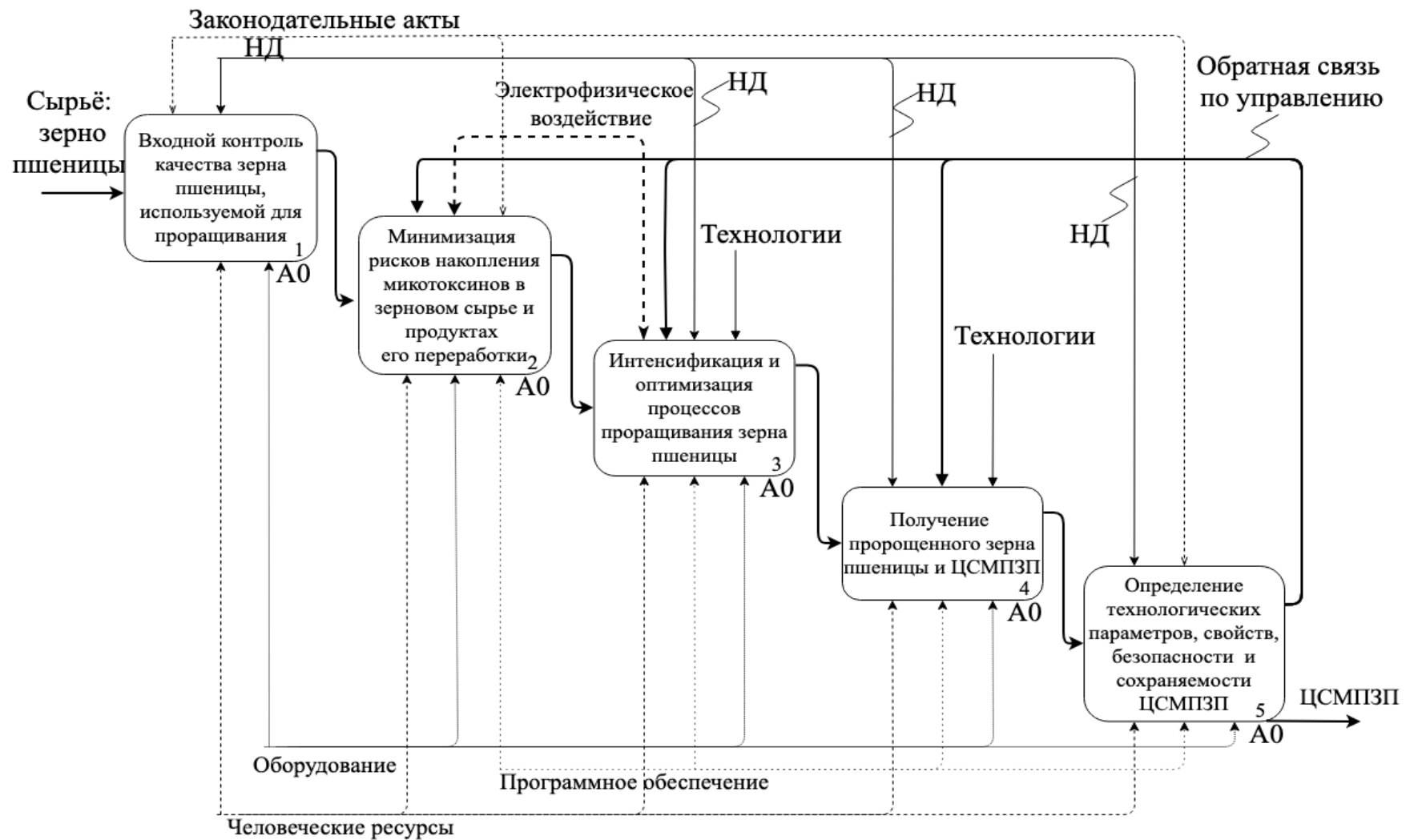


Рисунок 3 – Дочерняя диаграмма технологии производства ЦСМПЗП (в нотации IDEF0)

В целях минимизации рисков микробной контаминации зерна пшеницы для обеспечения в дальнейшем безопасности ЦСМПЗП в рамках решения *третьей задачи* проведена видовая идентификация мицелиальной токсигенной микрофлоры (рисунок 4).

Наименование образца / сорта зерна пшеницы	Идентификация методом MALDI TOF MS / коэффициент совпадения	Скор согласно коэффициенту совпадения
ЗП-1/ зерно пшеницы сорта Любава	<i>Alternaria alternate</i> / 2,312	→ +++
	<i>Aspergillus candidus</i> / 1,918	→ ++
	<i>Fusarium spp</i> / 1,854	→ ++
	<i>Penicillium spp</i> / 1,751	→ –
	<i>Sarocladium spp</i> / <1,7	→ –
	<i>Cladosporium spp</i> / <1,7	→ –
	<i>Trichoderma spp</i> / <1,7	→ –
ЗП-2/ зерно пшеницы сорта Эритроспериум 59	<i>Aspergillus glaucus</i> / 2,054	→ ++
	<i>Aspergillus candidus</i> / 1,918	→ ++
	<i>Fusarium incarnatum</i> / 2,144	→ ++
	<i>Aureobasidium pullulans</i> / 2,082	→ +
	<i>Azoarus communis</i> / 2,026	→ +
	<i>Cladosporium spp</i> / <1,7	→ –
	<i>Penicillium spp</i> / <1,7	→ –
	<i>Sarocladium spp</i> / <1,7	→ –

Рисунок 4 – Результаты идентификации мицелиальной токсигенной микрофлоры зерна пшеницы (усредненные значения)

Установлено, что в образцах зерна пшеницы сорта «Любава» присутствовали с самым высоким значением скоры (++) такие виды мицелиальной токсигенной микрофлоры, как *A. alternate* (2,312), *A. candidus* (1,918) и *Fusarium spp.* (1,854). В образцах зерна пшеницы сорта «Эритроспериум 59» идентифицировались *A. glaucus* (2,054), *A. candidus* (1,918) и *F. incarnatum* (2,144). Доказана возможность возникновения рисков контаминации микотоксинами зерновых масс и продуктов переработки, поэтому при использовании процессов проращивания необходимы исследования, направленные на поиск методов блокирования активности токсигенных микроорганизмов.

В качестве методов, приемлемых для пищевых систем и обладающих высокой обеззараживающей способностью, для исследования были определены следующие методы физического воздействия:

- холодное плазменное излучение (ХПИ) при напряжении 10 кВ, частоте 50 Гц, плазмообразующее вещество – воздух при нормальных условиях (экспозиция 5; 10; 15 мин);
- наносекундные электромагнитные импульсы (НЭМИ) при частоте 1000 Гц, амплитуде импульсов 15 кВ (экспозиция 5; 10; 15 мин);
- ультразвуковое воздействие (УЗВ) при частоте $(22 \pm 1,65)$ кГц, интенсивности не менее 10 Вт/см², мощности (номинальной) 630 Вт (экспозиция 3; 5; 7 мин).

По комплексу оцениваемых параметров наиболее эффективным методом для обеззараживания зерна пшеницы было определено ХПИ, при воздействии которого максимально блокируется активность токсигенных плесеней. Установлено, что после 5 мин воздействия КМАФАнМ снижалось более чем в 2 раза, а количество плесневых грибов и дрожжей – в 2,5–2,6 раза. Увеличение длительности экспозиции до 10 мин обеспечивало снижение количества дрожжей и плесеней до минимальных значений (10 ± 2) КОЕ/г). Эффективность использования ХПИ для блокирования токсигенных плесеней *A. flavus* или *A. parasiticus* подтверждается результатами оценки интенсивности накопления афлатоксина В₁, определяемого согласно ААСС 45-15.0. После 120 ч хранения рост значений данного показателя для партий зерна пшеницы, обработанных ХПИ в течение 5 и 10 мин, составлял ($12 \pm 1,5$) % и ($10 \pm 1,3$) % соответственно, что свидетельствует о выраженном обеззараживающем эффекте (рисунок 5).

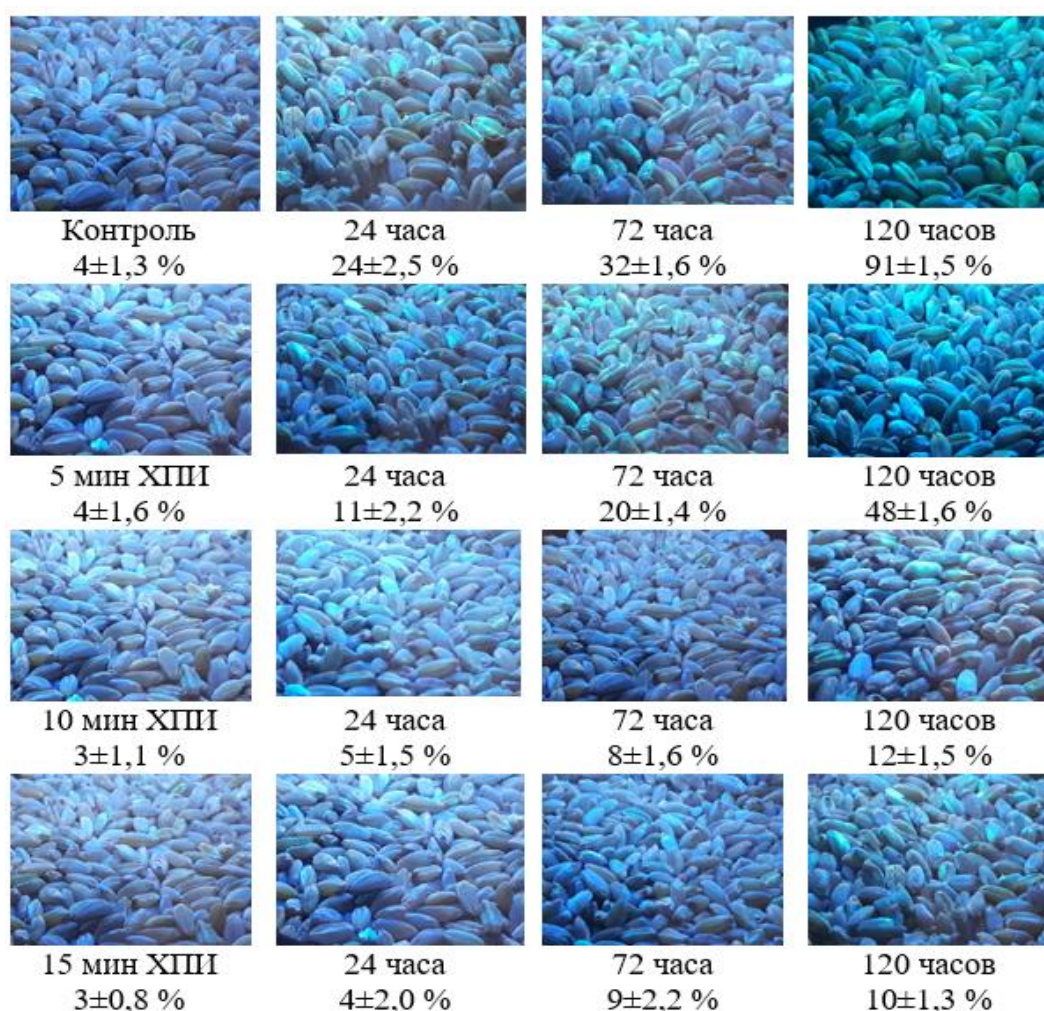
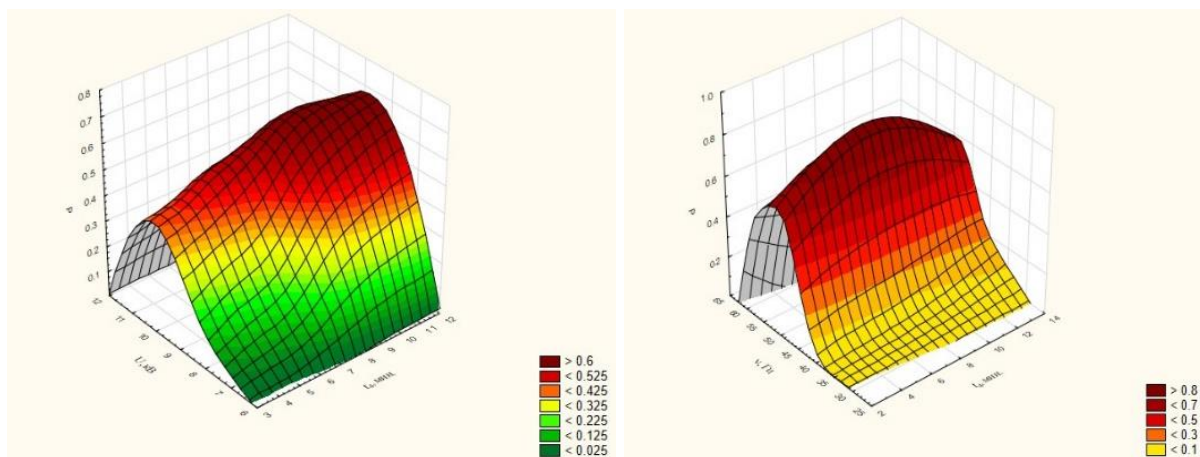


Рисунок 5 – Результаты определения накопления афлатоксина В₁ по методу ААСС 45-15.01

Установлено, что наиболее эффективно ХПИ действует на токсигенные плесени видов *A. alternate* и *A. candidus*, *Fusarium spp.*, которые после

обработки в течение 10 мин имели минимальные показатели совпадения (менее 1,7).

Математическая обработка массива данных результатов оценки показателей КМАФАнМ, количества дрожжей и плесеней после использования ХПИ позволила рассчитать функции желательности и обобщенные критерии оптимальности (P) (рисунок 6), описанные уравнениями (1) и (2).



a

б

$$\begin{cases} \ln(-\ln(0,5)) = a + b \cdot 3,1 \\ \ln(-\ln(0,95)) = a + b \cdot 1,6 \end{cases} \quad (1)$$

$$P = 0,678$$

$$P = 0,337 + 0,148t_4 - 0,00956t_4^2$$

$$(R_k = 0,995; St.err. = 0,018) \quad (2)$$

$$P = 0,902$$

Рисунок 6 – Зависимость обобщенного критерия оптимальности (P) от времени воздействия и используемого напряжения (a) и частоты ($б$)

На основе расчетов определены оптимальные параметры ХПИ, позволяющие добиться максимального обеззараживающего эффекта: напряжение – 10 кВ, частота – 50 Гц, длительность воздействия – 9 мин.

При использовании НЭМИ в качестве фактора, воздействующего на зерно пшеницы, наблюдалось значительное уменьшение количества дрожжей и плесневых грибов до (50 ± 3) и (45 ± 2) КОЕ/г соответственно, при этом способность зерна к прорастанию резко снижалась, в связи с чем данный метод воздействия был исключен из последующего эксперимента.

УЗВ показало низкую эффективность обеззараживающего действия. Так, интенсивность накопления афлатоксина В1, определяемого согласно методике ААСС 45-15.0, оставалось на высоком уровне. Однако ранее доказанные свойства кавитационных эффектов, возникающих при УЗВ в жидких средах, позволили применить данный метод для интенсификации процессов проращивания после процесса обеззараживания ХПИ.

Глава 4. Разработка и практическая реализация научно обоснованной технологии получения сырьевого ингредиента на основе цельноносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы.

Комплексные аналитико-экспериментальные исследования позволили установить сильные и слабые стороны каждого из методов физического

воздействия и определить с применением методики SWOT-анализа наиболее приемлемые для зерна пшеницы технологические приемы регулирования процессов обеззараживания на основе применения ХПИ и проращивания при использовании УЗВ.

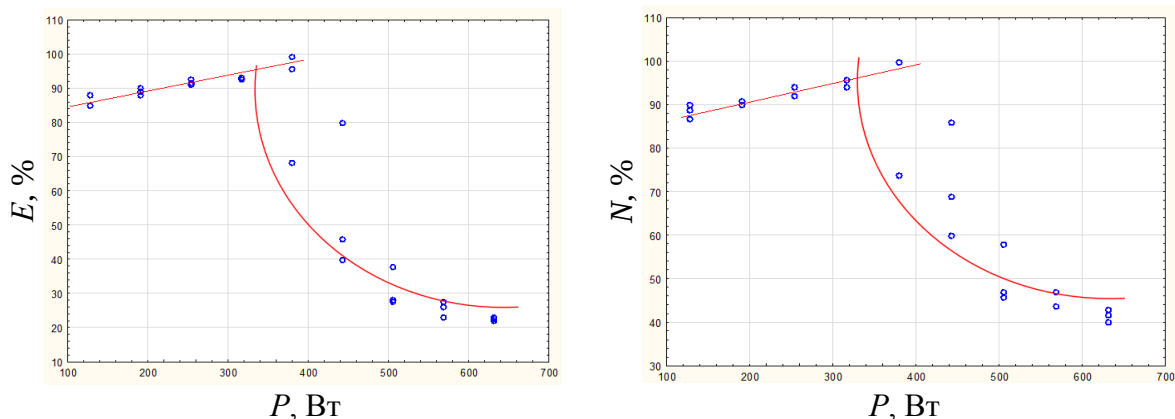
Определение механизмов влияния воздействующих факторов на процессы получения ЦСМПЗП (*четвертая задача*), установление рациональных условий и режимов ведения процесса контролируемого проращивания зерна пшеницы (КПЗП) осуществляли на основании обобщенной технологии (рисунок 7).



Рисунок 7 – Обобщенная технология ведения процесса КПЗП

Проведены масштабный скрининг КПЗП и оценка эффективности влияния УЗВ на интенсивность протекания процессов в отношении двух технологических этапов (замачивание и проращивание). В ходе исследований сформирован массив экспериментальных данных при последовательной вариации мощности воздействия (P) от 126 до 630 Вт с равным шагом в 63 Вт, что соответствует 10 % мощности прибора и длительности УЗВ (экспозиция от 3 до 7 мин).

Определены рациональные режимы УЗВ, в качестве оценочных критериев использовались энергия (E) и способность прорастания (N). В результате планирования и решения задачи оптимизации с помощью программного продукта Statistica 13 были получены кусочно-непрерывные зависимости (рисунок 8) и описывающие их уравнения, которые позволили установить наиболее приближенное к оптимальному сочетание факторов с учетом технологических возможностей работы прибора: мощность – 378 Вт, экспозиция – 3 мин.



$$E = 80,9 + 0,0417 \cdot P; \quad (3)$$

$$E = 9,9 - 879,2 \cdot \exp(-0,006981 \cdot P) \quad (4)$$

$$R_k = 0,975; St.err. = 6,9 \%$$

$$N = 82,6 + 0,0425 \cdot P; \quad (5)$$

$$N = 18,9 - 303,9 \cdot \exp(-0,004245 \cdot P) \quad (6)$$

$$R_k = 0,973; St.err. = 5,2 \%$$

Рисунок 8 – Кусочно-непрерывные зависимости при вариации показателей:
 P – мощность воздействия УЗВ; E – энергия прорастания; N – способность прорастания

Установленные рациональные режимы УЗВ оказывали значительное влияние на процессы замачивания. Номинальная влажность зерна пшеницы опытных образцов (ЗПуЗВ) достигалась после 6 ч ведения процесса, что в 2 раза быстрее по отношению к контролю (ЗПк)). Прирост массы зерна пшеницы (рисунок 9) составлял $(54 \pm 2) \%$ через 8 ч ведения процесса, номинальное значение степени набухания достигалось на 2,5 ч раньше (через 10,5 ч), чем в образцах ЗПк (через 13 ч).

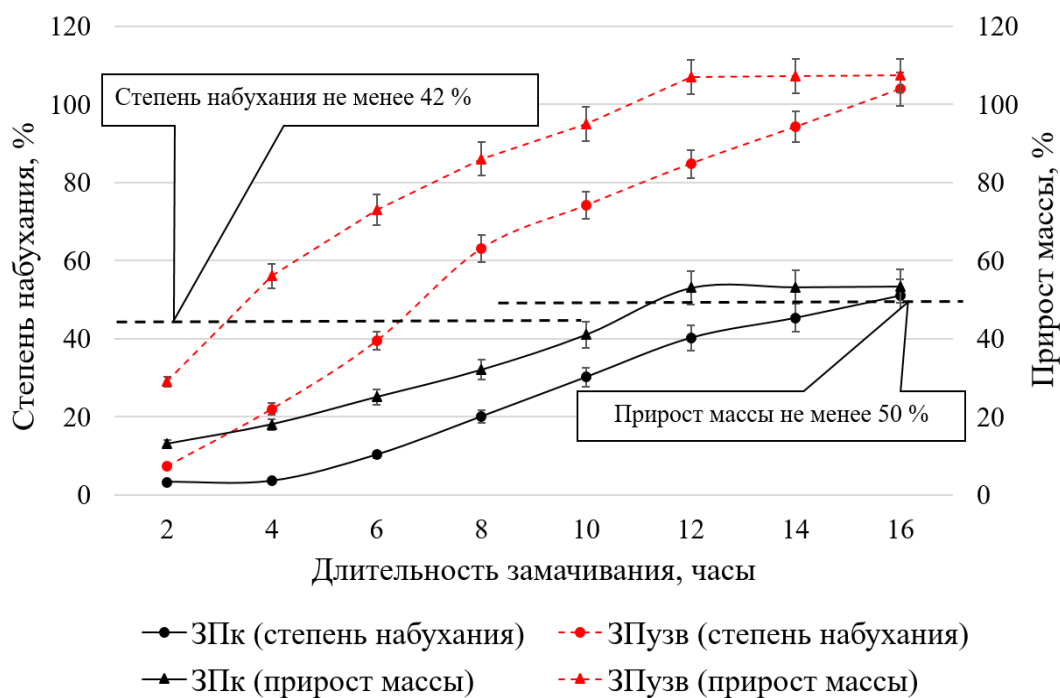


Рисунок 9 – Динамика изменения показателей степени набухания и прирост массы при замачивании контрольных и опытных образцов зерна пшеницы

Для раскрытия механизмов ускорения процесса замачивания учитывались два фактора. На первом этапе ведения КПЗП зерно пшеницы обеззараживалось с использованием ХПИ, которое имеет малую глубину проникновения в матрицу зерна, сохраняет целостность структурных элементов и по сути не влияет на активность процесса. При этом включение в технологический процесс УЗВ в гидромодуле за счет кавитационных эффектов ускоряет сорбционные процессы, что подтверждает анализ микроструктуры зерна пшеницы после 8 ч замачивания (рисунок 10).

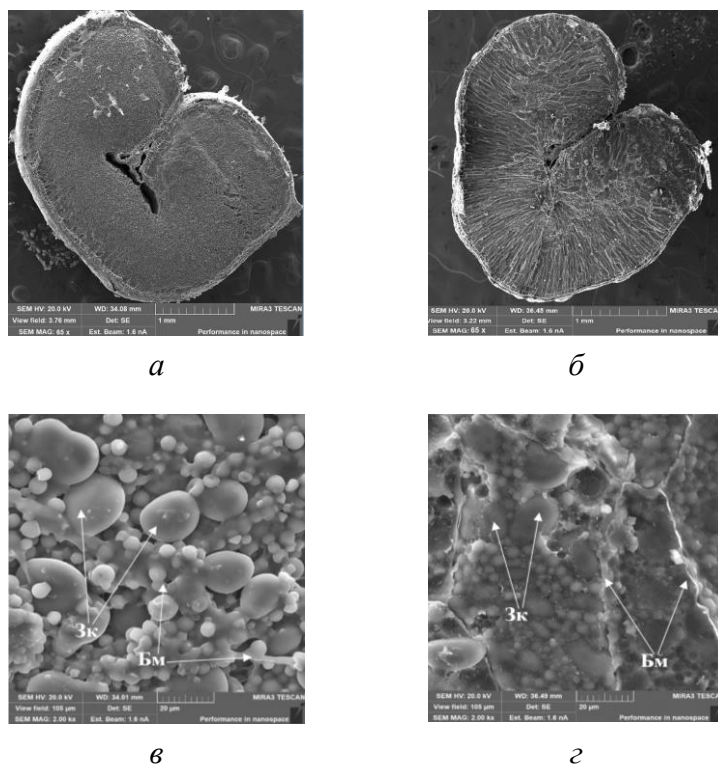


Рисунок 10 – Электронные микрофотографии поперечного разреза контрольных и опытных образцов зерна пшеницы после 8 ч замачивания, СЭМ TESCAN MIRA3:

а – ЗПк, увеличение $\times 65$; *б* – ЗПузв, увеличение $\times 65$; *в* – ЗПк, увеличение $\times 2000$; *г* – ЗПузв, увеличение $\times 2000$; Зк – зерна крахмала; Бм – белковая матрица

На микрофотографиях (рисунок 10*а*) поперечных срезов образцов ЗПк визуализируется плотно упакованная структура эндосперма, тогда как у образцов ЗПузв (рисунок 10*б*) она разрыхлена, составные части зерна набухшие, петля бороздки сомкнута. В эндосперме образцов ЗПк (рисунок 10*в*) белковая матрица в виде отдельных нитей обволакивает зерна крахмала только частично, тогда как в микроструктуре ЗПузв (рисунок 10*г*) присутствует большое количество набухшего белка, куда погружены зерна крахмала.

Эффективность ведения процессов КПЗП при УЗВ на этапе замачивания зерна пшеницы в гидромодуле 1:1 подтверждают результаты ДСК-анализа. После 8 ч замачивания количество физико-механически удержи-

ваемой влаги в образцах ЗПк составляло в среднем $(15,2 \pm 0,8) \%$, в образцах ЗПузв – $(12,5 \pm 0,6) \%$. Количество адсорбционно связанной влаги в образцах ЗПузв составляло в среднем $(45,7 \pm 0,7) \%$, в ЗПк – $(42,0 \pm 0,6) \%$.

Оценка влияния УЗВ на интенсивность протекания процесса проращивания проведена на основе разработанной шкалы микрофенологических фаз (МФФ) для КПЗП в совокупности с использованием программного инструмента для фенотипирования зерна SeedCounter (рисунок 11). Результаты, полученные с применением шкалы, дают возможность оценить динамику изменения размерных характеристик зерна пшеницы, установить оптимальную толщину насыпного слоя – 10 мм и фиксировать время завершения процесса проращивания. Для образцов ЗПузв через 4 ч проращивания, наблюдалось увеличение длины и площади поверхности на $(8 \pm 0,9) \%$ и $(21 \pm 1,3) \%$ соответственно, фиксировалась фаза набухания; аналогичные изменения в образцах ЗПк достигались только через 8 ч.

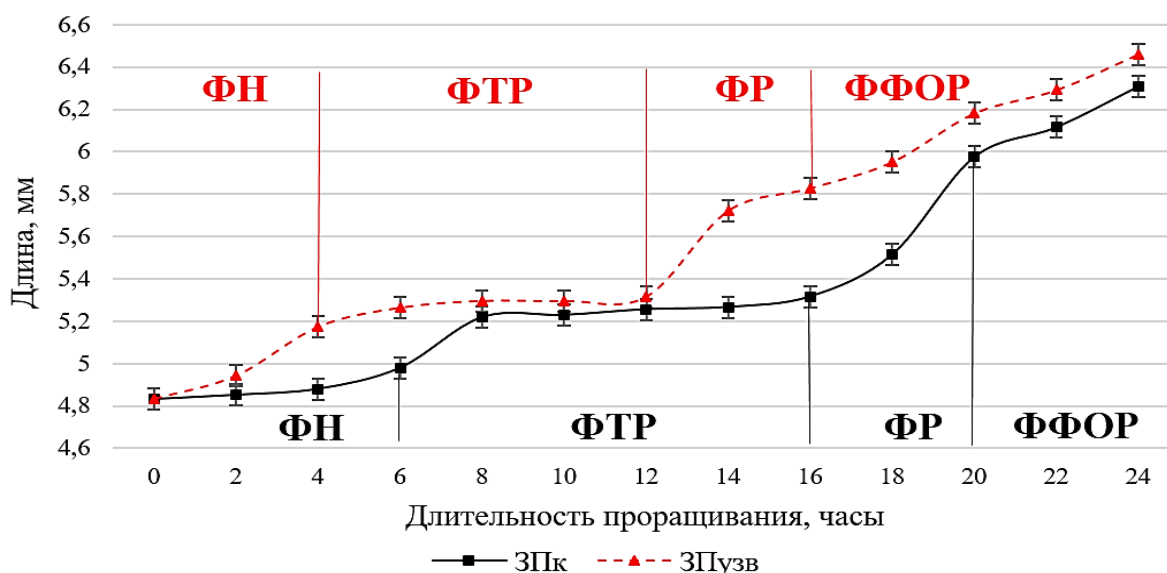


Рисунок 11 – Результаты изменения длины контрольных и опытных образцов зерна пшеницы при проращивании с учетом шкалы МФФ КПЗП

для толщины слоя зерна пшеницы 10 мм:

ФН – фаза набухания; ФТР – фаза точки роста; ФР – фаза роста;

ФФОР – фаза формирования органов роста

При дальнейшем проращивании начинался процесс наклеывания ростка, что фиксировалось приростом показателя ширины образцов ЗПузв и ЗПк, – фаза точки роста. По истечении (16 ± 1) ч проращивания образцы ЗПузв достигали номинального значения прироста длины $(20,6 \pm 0,3) \%$, наблюдались характеристики, фиксирующие фазу роста. Контрольные образцы ЗПк вступали в данную фазу только к (20 ± 1) ч. Далее наблюдалось естественное увеличение показателей длины и площади поверхности зерна пшеницы – фаза формирования органов роста.

Контроль технологических свойств пророщенного зерна пшеницы для получения ЦСМПЗП и прогнозирования его влияния на свойства конечного продукта проводился с учетом показателя числа падения (ЧП), динамика которого для образцов ЗПуЗв демонстрировала обратную криволинейную зависимость между временем проращивания и значениями показателя.

Данные ДСК-анализа показали, что в образцах ЗПуЗв в процессе проращивания происходит перераспределение влаги между моно- и полиадсорбционным слоем, их величина составляла в среднем $(4,5 \pm 0,3) \%$ и $(44,5 \pm 0,6) \%$ соответственно, увеличивалось количество осмотической влаги (в среднем $(38,3 \pm 0,4) \%$). Для контрольных образцов ЗПк характерно наличие большого количества физико-механически связанной влаги (в среднем $(15,1 \pm 0,3) \%$).

Проведенные исследования позволили сформировать массив экспериментальных данных и провести математическое моделирование процессов замачивания и проращивания зерна пшеницы путем расчета функций желательности для каждого из контролируемых показателей и определения значений обобщенного критерия оптимальности, адекватно описываемого уравнениями:

– для процессов замачивания:

$$P = -3,14 + 1,08 \cdot t_1 - 0,071 \cdot t_1^2 \quad (R_k = 0,944; St.err. = 0,15); \quad (7)$$

– для процессов проращивания:

$$P = -2,46 + 0,447 \cdot t_2 - 0,0153 \cdot t_2^2 \quad (R_k = 0,968; St.err. = 0,068). \quad (8)$$

На основании полученных уравнений установлено время, соответствующее максимуму длительности ведения процессов при УЗВ: замачивания $(7,6 \pm 0,4) \text{ ч}$ и проращивания $(14,6 \pm 0,8) \text{ ч}$.

Результаты, полученные в ходе комплексного исследования процессов КПЗП, их математическая интерпретация с учетом установления обобщенных критериев оптимальности для отдельно взятых процессов послужили основой для разработки технологии получения безопасного сырьевого ингредиента ЦСМПЗП, графическое изображение которой представлено на рисунке 12. В разработанной технологии с целью минимизации продовольственных потерь и сохранения уникального нутриентного состава, формируемого в процессе проращивания, был применен разовый помол пророщенного зерна пшеницы (ПЗП).

В целях определения сходимости гранулометрического состава ЦСМПЗП с мукой пшеничной хлебопекарной (МПХ) первого сорта (основного сырьевого ингредиента хлебопекарной промышленности) были определены показатели: размер частиц муки и их распределение по размерному ряду (рисунок 13).



Рисунок 12 – Графическое изображение технологии получения ЦСМПЗП

На основании результатов гранулометрического состава контрольных и опытных образцов муки (рисунок 13) установлена наибольшая сходимость в трех размерных рядах частиц, что доказывает возможность эффективного встраивания сырьевого ингредиента ЦСМПЗП в систему конечного продукта.

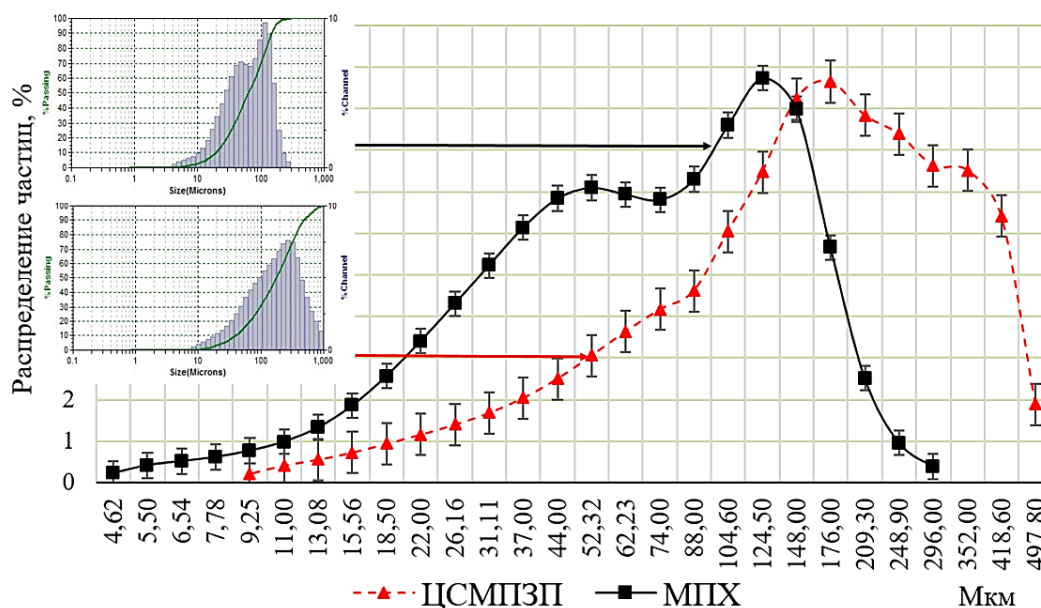


Рисунок 13 – Результаты распределения частиц в контрольных и опытных образцах муки по методу AACC 55-40.01 (Microtrac S3500)

Для исследования потенциала ЦСМПЗП при производстве хлебобулочных изделий необходимо сформировать доказательную базу, подтверждающую безопасность и высокую пищевую ценность разработанного сырьевого ингредиента.

Глава 5. Обеспечение безопасности, качества и пищевой ценности сырьевого ингредиента из пророщенного зерна пшеницы. В рамках решения *пятой задачи* для минимизации продовольственных потерь и обеспечения безопасности на всех этапах технологической цепочки была разработана система менеджмента безопасности производства ЦСМПЗП. В алгоритме деятельности были выделены обобщенные этапы, которые в дальнейшем определяли всю процедуру подготовки предприятия к процессу внедрения СМБПП. На базе действующего предприятия были выполнены процедуры мониторинга, актуализация и улучшение системы, что позволит не допустить выход на рынок опасной продукции и своевременно провести корректирующие действия по каждой отдельной критической контрольной точке.

Комплексная оценка сырьевого ингредиента доказала, что ЦСМПЗП имеет приятный, выраженный зерновой, слегка сладковатый вкус и запах, кремовый цвет, неоднородный по своему составу, с присутствием оболочечных частиц коричневого цвета. Процесс проращивания не оказал негативного воздействия на величину массовой доли белка зерна пшеницы, а также на количество и качество клейковины. Вместе с тем был получен наиболее сбалансированный по аминокислотному составу сырьевой ингредиент. Наиболее выраженный прирост можно отметить у таких незаменимых аминокислот, как лизин ($15 \pm 0,3$ %), изолейцин ($11 \pm 0,4$ %) и треонин ($7 \pm 0,6$ %). Биологическая ценность ЦСМПЗП составила ($68,7 \pm 0,6$ %), что в среднем на ($6 \pm 0,3$ %) выше, чем у контрольных образцов зерна пшеницы. Усвояемость данного сырьевого ингредиента увеличивалась в среднем на 53 %, что подтверждается приростом инфузорий *Tetrahymena pyriformis* в 1,5 раза за 24 ч.

Совокупный анализ полученных данных доказывает, что метод УЗВ является триггером, определяющим повышение пищевой ценности сырьевого ингредиента. Исходное зерно пшеницы содержало следовые количества γ -аминомасляной кислоты (ГАМК), которая активно синтезировалась при проращивании (рисунок 14а) и достигала уровня ($18,9 \pm 0,3$) мг/100 г.

Разработанная технология получения ЦСМПЗП позволяет увеличить в сырьевом ингредиенте количество флавоноидов – ($4,32 \pm 0,21$) мг QE/г; фенольных кислот – ($3,57 \pm 0,35$) мг САЕ/г; полифенольных соединений – ($5,35 \pm 0,21$) мг GAE/г, что находит отклик в повышении показателя общей антиоксидантной емкости – ($6,9 \pm 0,3$) мг TEAC/г (рисунок 14б).

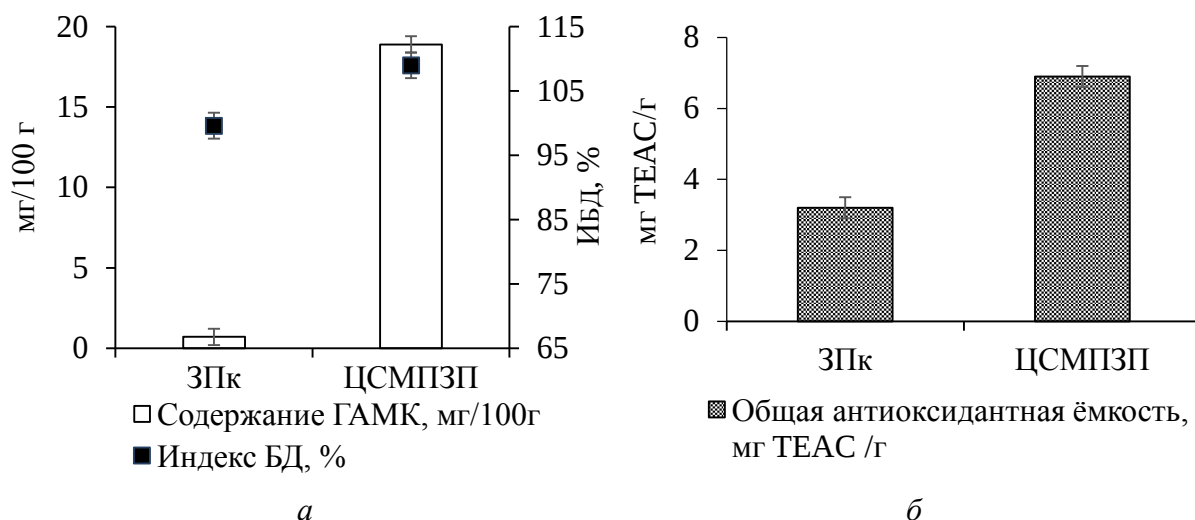


Рисунок 14 – Результаты определения содержания ГАМК (мг/100 г), ее потенциальной биодоступности (И_{БД}, %) (а) и общей антиоксидантной емкости (DPPH, мг TEAC/г) (б)

Доказательная база была дополнена определением антиоксидантной и мембраностабилизирующей активности ЦСМПЗП в условиях создания патологической модели для инфузорий *Paramecium caudatum*. Установлено увеличение времени остановки простейших по отношению к контролю, что подтверждает антиоксидантное действие сырьевого ингредиента.

Совокупный анализ результатов исследований ЦСМПЗП в процессе хранения в условиях вакуума показал его соответствие регламентируемым требованиям в течение 9 мес. (с учетом коэффициента запаса 1,15 по МУК 4.2.1847-04). Установлено, что сырьевой ингредиент на протяжении указанного периода не имел статистически значимых отличий по органолептическим, физико-химическим и микробиологическим показателям; значения показателей общей антиоксидантной емкости ((6,6 ± 0,2) мг TEAC/г) и содержания ГАМК ((18,8 ± 0,4) мг/100 г) на конец хранения также не изменялись. Кислотное число жира выше регламентируемого значения было отмечено только через 12 мес. хранения ЦСМПЗП и составило (65 ± 3) мг КОН на 1 г жира.

Подтверждено соответствие ЦСМПЗП требованиям ТР ТС 021/2011 по показателям безопасности, что позволяет использовать сырьевой ингредиент в технологии хлебобулочных изделий.

Глава 6. Использование цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы в производстве хлебобулочных изделий. Для установления механизмов встраивания ЦСМПЗП в пищевую систему хлебобулочных изделий, определения технологических рисков использования данного сырьевого ингредиента в процессе тестоведения и выявления способов их минимизации (*шестая задача*) были сформированы модельные смеси муки (СМ) с различным количеством ЦСМПЗП (в диапазоне 10–40 %).

Полученные экспериментальные данные позволили сформировать доказательную базу для оптимизации технологического процесса производства хлебобулочных изделий при частичной замене сортовой муки на ЦСМПЗП. Исследования показали незначительную вариацию показателей количества и качества клейковины; сахарообразующая способность варьировалась в диапазоне от 276 до 359 мг мальтозы; наблюдался рост газообразующей способности за счет увеличения доли питательных веществ, необходимых для развития дрожжей при внесении ЦСМПЗП. Реологические показатели теста на основе СМ (рисунок 15), также характеризовались значительной вариативностью полученных значений при явном влиянии вносимого сырьевого ингредиента.

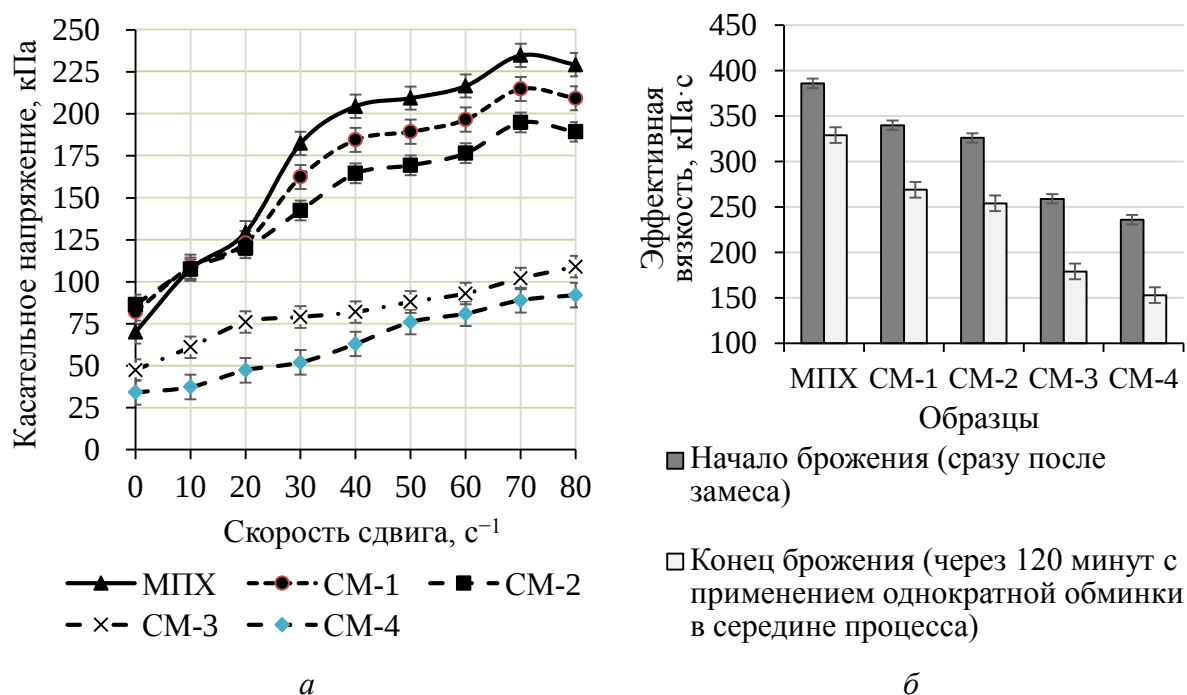


Рисунок 15 – Динамика изменения реологических показателей теста контрольных и опытных образцов, полученных из СМ:

а – касательное напряжение сразу после замеса, кПа;

б – эффективная вязкость на начало и конец брожения, кПа·с

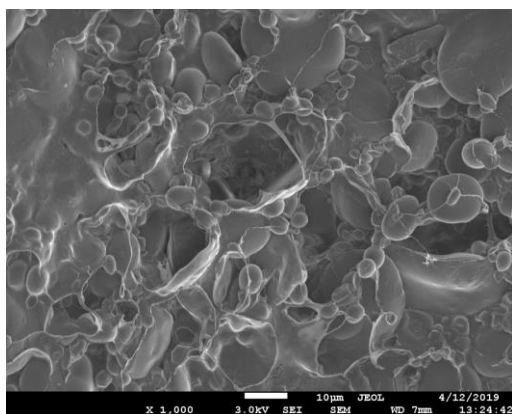
Разработка и оптимизация рецептов хлебобулочных изделий, полученных с использованием ЦСМПЗП осуществлялась на основе сформированного массива данных и их математической обработки кусочно-непрерывными функциями с использованием программного продукта Statistica 13, которая позволила получить уравнения для первого и второго участка соответственно (V' – удельный объем хлеба, см³/100 г; C – процент замены сортовой муки на ЦСМПЗП, %) ($R_k = 0,923$; $St. err. = 13$):

$$V' = 349,2 + 0,097 \cdot C; \quad (7)$$

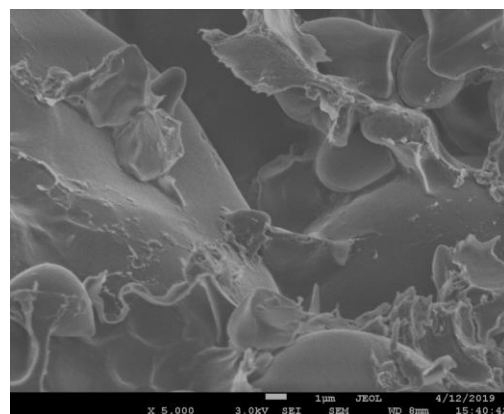
$$V' = 400,0 - 2,67 \cdot C. \quad (8)$$

На основе принципов оптимизации технологического процесса производства был определен оптимальный процент замены сортовой муки на ЦСМПЗП, который для простых хлебобулочных изделий (ХБИ) составил 18 %, для улучшенных по рецептуре мелкоштучных булочных изделий (МБИ) – 14 %.

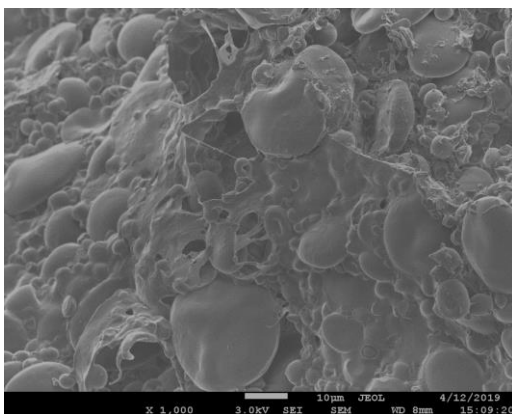
С целью минимизации технологических рисков использования ЦСМПЗП в процессе тестоведения и последующего хлебопечения изучена возможность применения метода УЗВ обработки воды в следующем режиме: мощность – 400 Вт, экспозиция – 5 мин. Экспериментально доказана эффективность данного подхода, способствующего формированию более развитого белкового каркаса, что подтверждается результатами анализа СЭМ (рисунок 16) и ДСК контрольных (ПТк) и опытных (ПТЦузв) образцов теста.



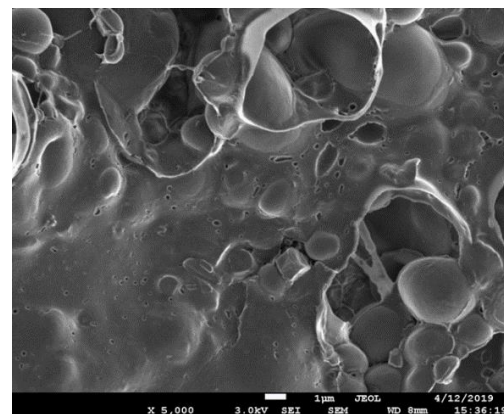
а – ПТк, увеличение $\times 1000$



б – ПТк, увеличение $\times 5000$



в – ПТЦузв, увеличение $\times 1000$



г – ПТЦузв, увеличение $\times 5000$

Рисунок 16 – Результаты исследования микроструктуры теста (СЭМ) после 150 мин (ПТк) и 120 мин (ПТЦузв) брожения, JSM-7001F (JEOL)

Образцы ПТЦузв явно отличались от ПТк, их белковая матрица хорошо развита, четко различима, равномерно распределена и обволакивала большую часть зерен крахмала. На поверхности белковой матрицы образцов ПТЦузв визуализируются многочисленные поры от сформировавшихся

пузырьков воздуха, что косвенно подтверждает интенсификацию процесса брожения теста. На конец брожения в образцах ПТЦузв увеличивается количество осмотически и адсорбционно связанной влаги на $(12,5 \pm 0,4) \%$ и $(9,2 \pm 0,5) \%$ соответственно.

Глава 7. Разработка и практическая реализация научно обоснованной технологии хлебобулочных изделий с использованием цельносмолотой муки из пророщенного зерна пшеницы. На основе теоретических и практических исследований разработана рецептура хлебобулочных изделий, полученных с использованием ЦСМПЗП, проведена комплексная товароведная оценка качества, безопасности готовых изделий и установлены изменения показателей качества при хранении (*седьмая задача*).

Для изготовления контрольных (ХБИк и МБИк) и опытных образцов (ХБИц и МБИц) хлебобулочных изделий использовался безопасный способ приготовления теста, все компоненты вносились в один прием согласно рецептуре. Хранение хлебобулочных изделий осуществляли в упакованном виде при температуре $(18 \pm 3) ^\circ\text{C}$ в течение 108 ч (с учетом коэффициента запаса 1,5 по МУК 4.2.1847-04).

Результаты товароведной оценки качества контрольных и опытных образцов хлебобулочных изделий позволили установить их соответствие требованиям ГОСТ 31805-2018. Внесение ЦСМПЗП оказало существенное влияние практически на все органолептические показатели качества: внешний вид, цвет корок, вкус, аромат, цвета мякиша (рисунок 17).

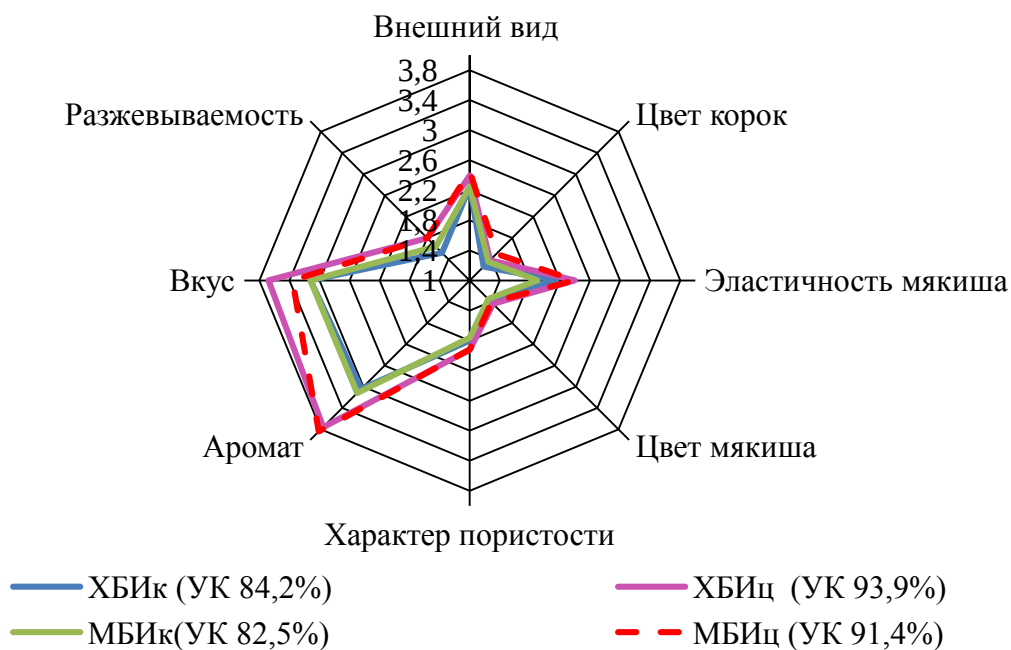


Рисунок 17 – Результаты дегустационной оценки исследуемых образцов с учетом коэффициентов весомости

Совокупный анализ результатов дегустационной оценки с использованием пятиуровневой шкалы позволил присвоить образцам ХБИц и МБИц отличный уровень качества (93,9 % и 91,4 % соответственно), тогда как образцы ХБИк и МБИк имели хороший уровень качества (84,2 % и 82,5 % соответственно).

По результатам оценки физико-химических показателей качества (таблица 1) установлено, что значения показателей кислотности и пористости мякиша у образцов ХБИц и МБИц выше контрольных. Использование ЦСМПЗП также оказывало выраженное влияние на удельный объем образцов ХБИц и МБИц. Прирост значений данного показателя для ХБИц в среднем составил $(14,5 \pm 0,2) \%$, для МБИц – $(5,9 \pm 0,2) \%$. Данная динамика также сохранялась для показателя формоустойчивости.

Таблица 1 – Влияние использования ЦСМПЗП на показатели качества хлебобулочных изделий

Наименование показателя качества (требования ГОСТ 31805-2018)	Условное обозначение образца			
	ХБИк	ХБИц	МБИк	МБИц
Влажность мякиша, % (19,0–52,0)	$42,8 \pm 0,3$	$43,5 \pm 0,2$	$41,4 \pm 0,2$	$42,8 \pm 0,3$
Пористость мякиша, % (не менее 65)	$71,0 \pm 0,5$	$76,4 \pm 0,2$	$74,0 \pm 0,3$	$79,6 \pm 0,5$
Кислотность мякиша, град. (не более 4)	$2,5 \pm 0,2$	$3,6 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,2$
Удельный объем, см ³ /100 г	345 ± 3	395 ± 2	322 ± 3	341 ± 4
Формоустойчивость, у. е.	–	–	$0,43 \pm 0,3$	$0,49 \pm 0,4$
Общая деформация ($h_{\text{общ}}$), мм	$9,07 \pm 0,5$	$12,57 \pm 0,6$	$13,35 \pm 0,9$	$14,29 \pm 0,6$
Пластичная деформация ($h_{\text{пл}}$), мм	$1,64 \pm 0,3$	$3,79 \pm 0,6$	$3,82 \pm 0,5$	$4,37 \pm 0,5$
Упругая деформация ($h_{\text{упр}}$), мм	$7,43 \pm 0,5$	$8,78 \pm 0,4$	$9,53 \pm 0,5$	$9,92 \pm 0,5$

Безопасность разработанных хлебобулочных изделий (соответствие СанПиН 2.3.2.1078-01 и ТР ТС 021/2011) была подтверждена результатами определения комплекса показателей, включая микробиологические показатели, содержание токсичных элементов, микотоксинов, пестицидов, радионуклидов, которые дополнены исследованиями степени токсичности с использованием инфузорий *Tetrahymena pyriformis* и *Paramecium caudatum* (рисунок 18). Прирост инфузорий *Tetrahymena pyriformis* и *Paramecium caudatum* был наиболее выраженным при использовании водных экстрактов ХБИц и МБИц и составил 122,6–146,3 %. Интенсивность прироста инфузорий в водном растворе ацетонового экстракта данных образцов находилась в диапазоне 101,3–105,4 %. Развитие картофельной болезни у проб образцов ХБИц и МБИц не обнаружено.

Образцы ХБИц и МБИц характеризовались повышенной пищевой ценностью за счет увеличения содержания пищевых волокон (обеспеченность суточной потребности в них составляла $(10,9 \pm 0,5) \%$ с учетом нормы потребления хлебобулочных изделий 175 г/сут).

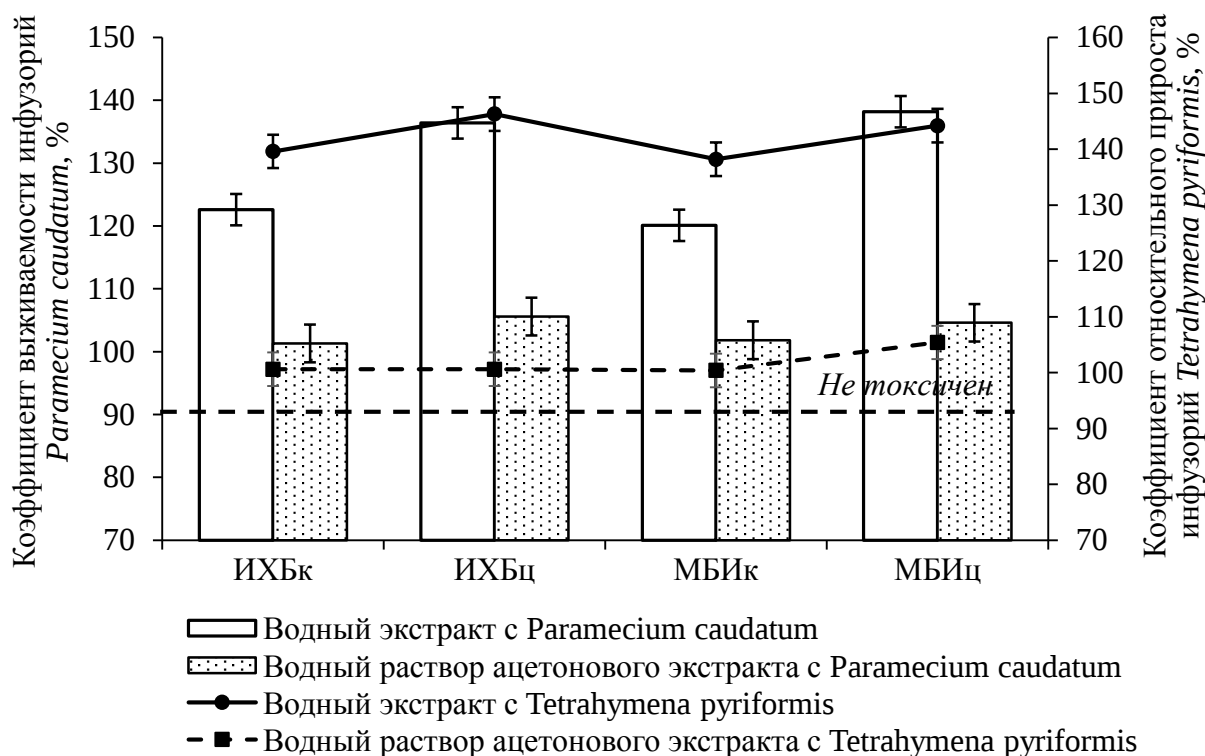


Рисунок 18 – Результаты определения коэффициентов выживаемости и относительного прироста инфузорий

Внесение ЦСМПЗП увеличивало обеспеченность организма человека магнием, калием и кальцием для ХБИц – в среднем на 5,0 %; 0,9 % и 0,6 %, для МБИц – на 3,0 %; 1,3 % и 0,8 % соответственно. Разработанный сырьевой ингредиент позволяет повысить уровень удовлетворения суточной потребности в тиамине, рибофлавине и пиридоксине на 4,0 %; 5,6 % и 7,0 % соответственно для образцов ХБИц и на 10,7 %; 2,2 % и 7,0 % соответственно для образцов МБИц.

Повышенная пищевая ценность подтверждалась высокими значениями антиоксидантной емкости ХБИц и МБИц как у свежих изделий, так и после хранения (108 ч) (рисунок 19). Мякиш образцов ХБИц и МБИц характеризовался более высокими значениями показателей – ($5,96 \pm 0,23$) и ($5,33 \pm 0,22$) мг ТЕАС/г соответственно, в отличие от корки и подкоркового слоя.

Содержание ГАМК в мякише образцов ХБИц и МБИц в среднем в 10,5 и 8,4 раза превышало значения контрольных образцов. Значения И_{БД} (по ГАМК) образцов ХБИц и МБИц были выше, чем у контрольных образцов, в среднем на 44,2 % и 51,2 % соответственно (для мякиша) и на 36,1 % и 47,3 % соответственно (для корки и подкоркового слоя). Установлена стабильность показателей антиоксидантной емкости и содержания ГАМК в процессе хранения ХБИц и МБИц в течение 108 ч.

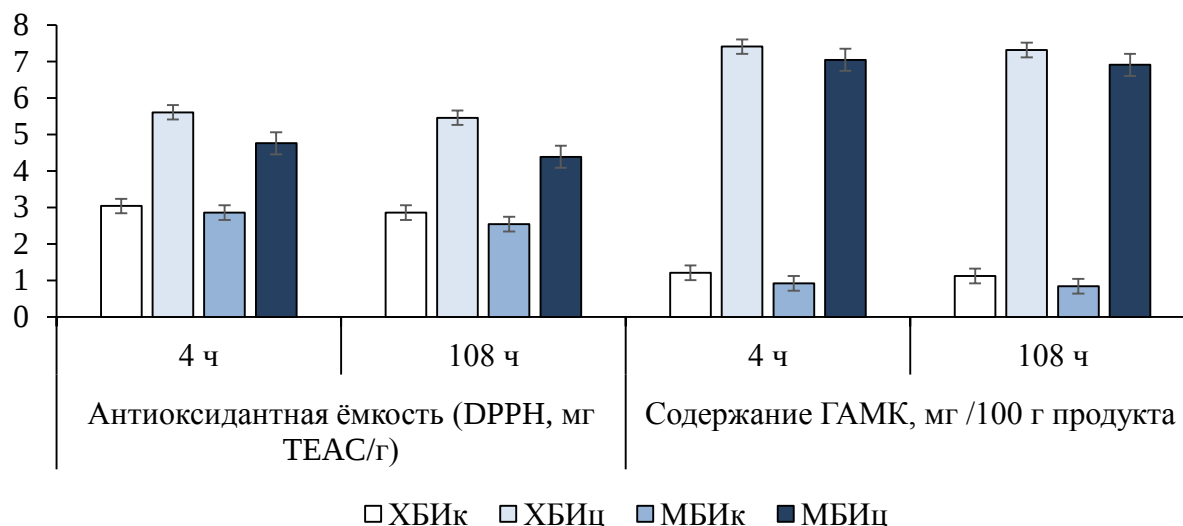


Рисунок 19 – Результаты определения антиоксидантной емкости и содержания ГАМК в исследуемых образцах хлебобулочных изделий в процессе хранения (усредненная проба)

Установлено, что ЦСМПЗП в составе хлебобулочных изделий замедляет процессы черствения. Так, ХБИц и МБИц через 24 ч хранения имели более высокую суммарную оценку степени свежести-черствости по отношению к контролю (расхождение составило $(0,47 \pm 0,05)$ и $(0,31 \pm 0,05)$ балла соответственно). Данная динамика сохранялась на протяжении всего периода хранения. При хранении в образцах ХБИц и МБИц менее интенсивно происходило увеличение значений крошковатости и снижение значений набухаемости мякиша. Динамика изменения общей деформации мякиша во времени характеризовалась меньшим значением угла наклона между лучом, отражающим изменение общей деформации мякиша во времени, и прямой, направленной параллельно оси абсцисс из точки, соответствующей первому замеру реологической характеристики.

Результаты СЭМ хлебобулочных изделий (рисунок 20) позволяют визуализировать различия в структуре мякиша и их изменения в процессе хранения. Контрольные образцы через 108 ч хранения имели измененную структуру, различались выделившиеся из белковой матрицы зерна крахмала. Тогда как опытные образцы сохраняли сетчатую белковую матрицу, которая по истечении сроков хранения изменялась незначительно.

Визуальная оценка мякиша, полученная с использованием СЭМ, дополнена результатами ДСК. Установлено, что в образцах ХБИц и МБИц через 4 ч после выпечки количество суммарного содержания осмотически и адсорбционно связанной влаги выше, чем в контрольных образцах, на $(13,3 \pm 0,2) \%$ и $(12,4 \pm 0,4) \%$ соответственно. Через 108 ч количество влаги данных форм связи выше, чем в контрольных образцах, на $(16,5 \pm 0,3) \%$ и $(16,3 \pm 0,3) \%$ соответственно.

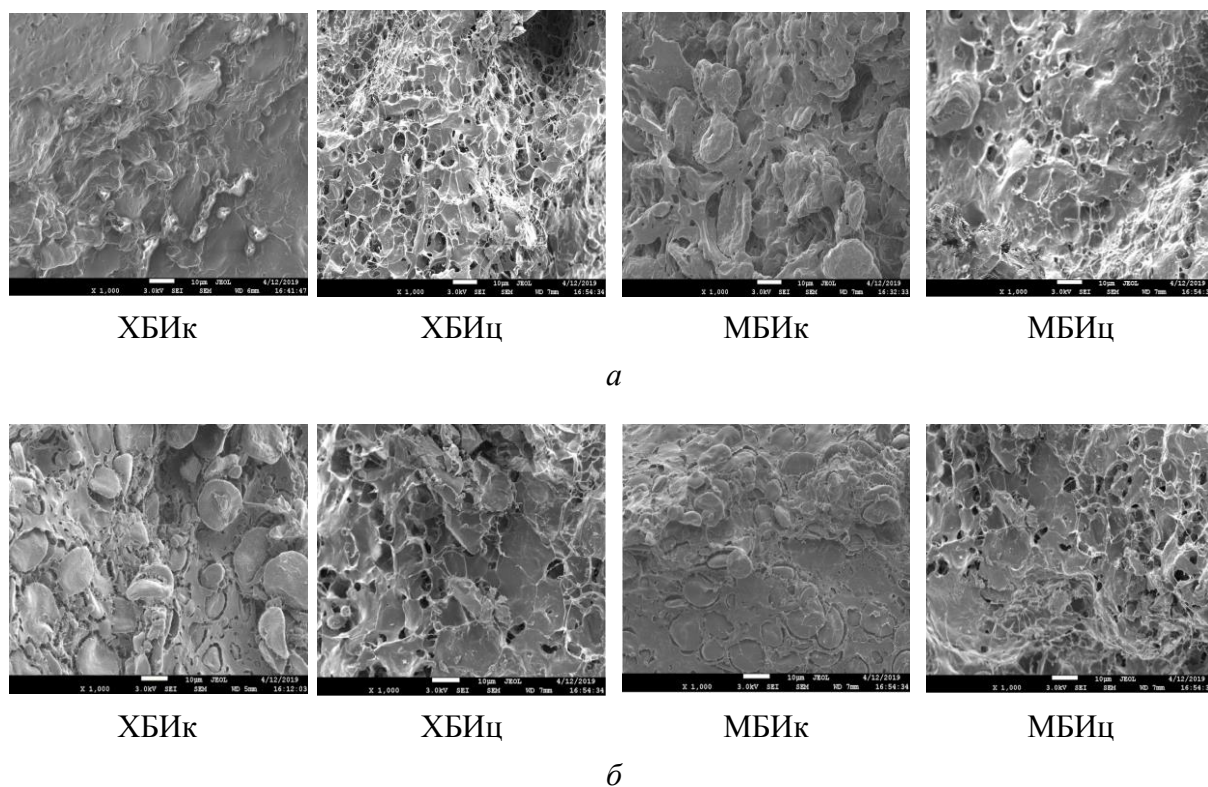


Рисунок 20 – Микроструктура мякиша исследуемых образцов хлебобулочных изделий, СЭМ, Jeol JEM-2100, увеличение $\times 1000$:
 а – через 4 ч после выпечки, б – через 108 ч хранения

Комплексный анализ результатов исследования подтверждает, что ЦСМПЗП может эффективно использоваться в составе хлебобулочных изделий, повышает их пищевую ценность, способствует замедлению процессов черствения.

С применением модели *in vitro* и *in vivo* проведено исследование эффективности хлебобулочных изделий, полученных с использованием ЦСМПЗП, для минимизации воздействия стрессорных факторов (*восьмая задача*).

Исследования *in vitro* показали возможность применения ЦСМПЗП в составе хлебобулочных изделий как сырьевого ингредиента повышающего резистентность организма человека к действию стрессорных факторов за счет присутствия в его составе ГАМК. Результаты оценки потенциальной биодоступности ГАМК в опытных образцах ХБИц и МБИц составляли для мякиша ($99,1 \pm 0,5$) % и ($102,8 \pm 0,4$) % соответственно, для корки и подкоркового слоя – ($97,2 \pm 0,4$) % и ($103,1 \pm 0,5$) % соответственно. С учетом нормы потребления хлебобулочных изделий 175 г/сут возможно насыщение организма человека в среднем на 19,1–19,6 мг ГАМК, что соответствует профилактической норме при гипертонии, бессоннице, повышенных физических и умственных нагрузках, возникающих в условиях стрессорных факторов.

Для подтверждения эффективности ЦСМПЗП в составе хлебобулочных изделий проведены клинические исследования *in vivo*. Систематическое потребление группой добровольцев-волонтеров образцов ХБИц в течение 21 дня в условиях воздействия стрессорных факторов позволило повысить стабильность психоэмоционального состояния. Так, показатель «Суммарный психический компонент здоровья» согласно оценке качества жизни SF-36 составил $(54,59 \pm 3,6)$ балла относительно $(48,36 \pm 2,5)$ балла для группы плацебо.

Результаты клинических исследований крови, динамика изменения лейкоцитарной формулы, рассчитанные индексы, а также изменение концентрации кортизола добровольцев-волонтеров подтвердили повышение резистентности организма человека к действию стрессорных факторов. Повышение лейкоцитарного индекса интоксикации Я. Я. Кальф-Калифа для контрольной группы составило $(6,6 \pm 1,8) \%$, в группе плацебо – $(37,2 \pm 1,6) \%$. Величина лимфоцитарного индекса по Шагалину снижалась как для контрольной, так и для группы плацебо добровольцев-волонтеров в среднем на $(7,8 \pm 0,8) \%$ и $(11,6 \pm 0,6) \%$ соответственно. Величина индекса сдвига лейкоцитов крови по И. И. Яблучанскому повышалась как для контрольной, так и для группы плацебо добровольцев-волонтеров, но динамика опытной группы была наиболее выражена и составила $(26,1 \pm 1,6) \%$.

Снижение величины концентрации кортизола составило $(10,8 \pm 3,6) \%$ для контрольной группы, тогда как для группы плацебо, наоборот, отмечался рост, который в среднем составил $(80,9 \pm 3,2) \%$. Все результаты исследований укладывались в рамки референсных значений, выявленные изменения не представляли угрозы для здоровья испытуемых.

В рамках решения *девятой задачи* разработана прогностическая модель факторов потребительского поведения в отношении ХБИц и МБИц (рисунок 21), проведена апробация результатов исследования в условиях производства и дана оценка экономической эффективности внедрения разработанной технологии.

Среди наиболее важных факторов потребительского поведения (рисунок 21) были выявлены доверие к производителям данных видов хлебобулочных изделий и восприятие их пользы для организма человека ($R = 0,798$ и $0,596$ соответственно). Готовность покупать ХБИц и МБИц выявлена среди респондентов, предпочитающих продукты натурального происхождения ($R = 0,67$), обращающих внимание на свое самочувствие, в чьей жизни существует понятие «мотивация здоровья» ($R = 0,77$). Определено, что для обеспечения положительного потребительского отклика и надежного закрепления ХБИц и МБИц в структуре ассортимента торговых предприятий необходимо формировать, обеспечивать и поддерживать доверие к производителям данной группы товаров.



Рисунок 21 – Оценочная модель потребительского поведения в отношении ХБИц и МБИц с коэффициентами корреляции факторов (доверительная вероятность $\geq 0,95$)

Проведен расчет экономического эффекта от внедрения в производство предлагаемого ассортимента хлебобулочных изделий. С учетом затрат на внедрение дополнительного оборудования для получения сырьевого ингредиента и хлебобулочных изделий по разработанным рецептурам значение годового экономического эффекта (для предприятий, функционирующих в городах с населением более 1 млн чел.) составит не менее 1 339,81 тыс. р. для ХБИц и 1 140,14 тыс. р. для МБИц.

На основании вышеизложенного становится очевидным, что получение сырьевого ингредиента ЦСМПЗП с применением технологических приемов на основе методов физического воздействия позволит снизить риски контаминации зернового сырья, минимизировать продовольственные потери, обеспечить качество, безопасность и повышение пищевой ценности конечных продуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований предложены для внедрения в практику технологические приемы в области снижения рисков контаминации и продовольственных потерь при переработке зерна пшеницы, на базе полученных новых данных сделаны следующие выводы.

1. На основе анализа современных научных данных обоснована необходимость разработки в продовольственной цепочке «зерно – мука – хлеб» новых технологических приемов, базирующихся на принципах безопасности, качества и пищевой полноценности получаемых изделий, позволяющих минимизировать продовольственные потери. Обобщены и систематизированы

зированы используемые в мировой практике подходы для снижения рисков контаминации зернового сырья, в том числе на основе физических методов воздействия, имеющие реальный потенциал для применения в технологии переработки растительного сырья и позволяющие обеспечить устойчивое развитие предприятий отрасли, в том числе хлебопекарной.

2. Разработан методологический подход в целях снижения рисков микробной контаминации сырья и продовольственных потерь на всех этапах технологической цепочки процесса получения безопасного сырьевого ингредиента с использованием в качестве инструмента модели системы проектирования IDEF0, обеспечивающей прослеживаемость процессов с обратной связью. Сформирована доказательная база для верификации методологического подхода к получению безопасного сырьевого ингредиента повышенной пищевой ценности, технологически пригодного для размещения в системе пищевого продукта.

3. Получены результаты комплексного исследования качества и микробиологической безопасности зернового сырья, определяющие риски продовольственных потерь за счет контаминации сырьевого ингредиента (ЦСМПЗП) микотоксинами токсигенных плесеней, среди которых наивысший показатель скора имеют *Alternaria alternate* (2,312); *Aspergillus candidus* (1,918); *Fusarium spp.* (1,854). Установлено, что для блокирования плесеней зерна пшеницы наиболее рациональным является способ, основанный на воздействии холодным плазменным излучением в режиме, определенном на основе математической обработки полученного массива данных: напряжение 10 кВ, частота 50 Гц, экспозиция 9 мин. Обеззараживание зерна пшеницы на основе воздействия холодного плазменного излучения обеспечивает снижение количества дрожжей и плесеней до минимальных значений – менее (10 ± 2) КОЕ/г.

4. Установлено влияние ультразвукового воздействия (в режиме: мощность 378 Вт, экспозиция 3 мин), применяемого на этапе замачивания в гидромодуле при соотношении зерна и воды 1:1, на интенсификацию процесса получения пророщенного зерна пшеницы при вариативности исходных параметров качества сырья. Математически на основе установления корреляционных зависимостей между показателями и с учетом обобщенного критерия оптимальности доказано, что в данных условиях возможно сократить длительность процессов замачивания (на 4,5 ч) и проращивания (на 2,5 ч). Разработана и апробирована шкала определения микробиологических фаз для обеспечения контролируемого проращивания зерна пшеницы и установлена ее применимость для экспрессной оценки в практических целях. Сформирована графическая модель получения ЦСМПЗП с характеристикой рациональных режимов ведения процессов. Определен средневзвешенный размер частиц ЦСМПЗП – (170 ± 15) мкм, обеспечивающий эффективное встраивание сырьевого ингредиента в систему хлебобулочных изделий.

5. На основе системного подхода к управлению процессами получения ЦСМПЗП определены критические контрольные точки (на этапах обеззараживания зернового сырья и сушки пророщенного зерна пшеницы) для обеспечения безопасности сырьевого ингредиента, позволяющие рекомендовать его к использованию в технологиях простых и улучшенных по рецептуре хлебобулочных изделий. Подтверждено, что ЦСМПЗП, полученная по разработанным технологиям, сохраняет технологические свойства и пищевую ценность в течение 9 мес. хранения в вакуумной упаковке, что позволяет обеспечить сохранение химических компонентов на уровне первичных значений (содержание γ -аминомасляной кислоты в количестве $(18,9 \pm 0,3)$ мг/100 г и общую антиоксидантную емкость – $(6,9 \pm 0,3)$ мг ТЕАС/г), обуславливающих в совокупности высокую пищевую ценность сырьевого ингредиента.

6. На основе установленной взаимосвязи гранулометрических составов ЦСМПЗП и основного сырья, используемых в технологии хлебобулочных изделий, дополненной результатами оценки систем, полученных с помощью СЭМ, доказано, что сырьевой ингредиент может эффективно встраиваться в структуру конечного продукта. Это также подтверждают результаты комплексной оценки технологических свойств по расширенной номенклатуре показателей модельных смесей муки пшеничной хлебопекарной первого сорта и ЦСМПЗП, теста и образцов изделий. Доказана эффективность ультразвукового воздействия (мощность 400 Вт, экспозиция 5 мин) применительно к процессу водоподготовки на этапе замеса теста для минимизации возникновения и коррекции технологических рисков (в частности, ухудшения реологических свойств теста). Установлено, что ультразвуковое воздействие в технологии хлебобулочных изделий с ЦСМПЗП обеспечивает интенсификацию процесса брожения теста (повышает ТЭБ на $(43,1 \pm 0,7)$ %, интенсифицирует кислотонакопление на $(28,2 \pm 0,3)$ %, стабилизирует значения показателя качества фаринографа на уровне (200 ± 4) мм), а также способствует формированию более развитого белкового каркаса, что подтверждается результатами СЭМ и ДСК опытных образцов теста.

7. На основе математического моделирования, исходя из принципов оптимизации технологического процесса, установлены оптимальные количества замены сортовой муки на ЦСМПЗП: для простых изделий – 18 % (хлебобулочные изделия) и улучшенных по рецептуре – 14 % (мелкоштучные булочные изделия).

На основании результатов комплексной оценки образцов хлебобулочных изделий (простых и улучшенных по рецептуре), получены данные, подтверждающие адекватность разработанных рецептов для обеспечения повышения пищевой ценности изделий. Наблюдаются явные отличия по отношению к контролю, в частности:

- увеличение количества пищевых волокон с учетом установленных норм потребления до уровня $(10,9 \pm 0,5) \%$ относительно суточной потребности;

- увеличение массовой доли γ -аминомасляной кислоты в мякише изделий: $(11,2 \pm 0,12)$ мг/100 г у образцов ХБИц и $(10,9 \pm 0,09)$ мг/100 г у МБИц;

- повышение антиоксидантной емкости опытных образцов ХБИц и МБИц в 1,87 и 1,68 раза соответственно.

Установлено, что все исследуемые образцы в соответствии с требованиями ТР ТС 0121/2011 являлись безопасными.

В процессе хранения определена незначительная вариативность органолептических и физико-химических показателей хлебобулочных изделий, полученных с использованием ЦСМПЗП. Установлено минимальное изменение деформационных характеристик мякиша, результаты СЭМ не фиксируют явных различий, в конце хранения в опытных образцах определено высокое суммарное содержание осмотически и адсорбционно связанной воды $((54,5 \pm 0,6) \%$ в ХБИц и $(62,9 \pm 0,5) \%$ в МБИц), что в совокупности подтверждает замедление процессов черствения при использовании ЦСМПЗП в технологии хлебобулочных изделий.

8. Исследовано влияние ЦСМПЗП в составе хлебобулочных изделий с применением моделей *in vitro* и *in vivo*, полученные результаты доказывают:

- потенциальную биодоступность γ -аминомасляной кислоты в пищевой системе хлебобулочных изделий: после проведения процедуры переваривания индекс биодоступности для корки и подкоркового слоя составлял $(97,2 \pm 0,4) \%$ для образцов ХБИц и $(103,1 \pm 0,5) \%$ для МБИц, для мякиша $(99,1 \pm 0,5) \%$ и $(102,8 \pm 0,4) \%$ для ХБИц и МБИц соответственно;

- результаты биотестирования опытных образцов хлебобулочных изделий с использованием двух культур инфузории: *Paramecium caudatum* и *Tetrahymena pyriformis* (количественный прирост простейших составил $(122,6 \pm 2,4) \%$ и $(146,3 \pm 3,2) \%$ соответственно), подтвердили высокую пищевую ценность и безопасность;

- на основе модели *in vivo* получены результаты, доказывающие, что введение в рацион хлебобулочных изделий с ЦСМПЗП позволит повысить резистентность организма человека к действию стрессорных факторов. Это подтверждается снижением динамики роста лейкоцитарного индекса интоксикации Я. Я. Кальф-Калифа $(6,6 \pm 1,8) \%$ для контрольной группы и $(37,2 \pm 1,6) \%$ для группы плацебо), большим значением индекса сдвига лейкоцитов крови по И. И. Яблчанскому (на $(26,1 \pm 1,6) \%$), изменением уровня концентрации кортизола в крови (снижение на $(10,8 \pm 3,6) \%$) по отношению к результатам, полученным в группе плацебо. Суммарный психический компонент здоровья, определенный с использованием опрос-

ника SF-36, составил $(54,59 \pm 3,6)$ балла, что на 15,3 % больше, чем у группы плацебо.

9. Для определения устойчивости на потребительском рынке и востребованности хлебобулочных изделий с ЦСМПЗП потенциальными потребителями на основе факторного и регрессионного анализа получена прогностическая модель, отражающая недостаточную информированность потребителя по ряду характеристик (гарантии безопасности при потреблении, стресс-протекторные свойства), что позволило сформулировать рекомендации для предприятий по выстраиванию политики продвижения данных продуктов на потребительском рынке.

Проведен расчет экономического эффекта от внедрения в производство предлагаемого ассортимента хлебобулочных изделий. С учетом затрат на дополнительное оборудование для получения сырьевого ингредиента и хлебобулочных изделий по разработанным рецептурам значение годового экономического эффекта в расчете на 1 т изделий (для предприятий, функционирующих в городах с населением более 1 млн чел.) составит не менее 1 339,81 тыс. р. для ХБИц и 1 140,14 тыс. р. для МБИц.

Результаты исследования апробированы и внедрены в условиях производства: ООО «Боровое», ООО «Агрофирма Ариант», ООО «Черновской хлеб», ИП Акопян Г. С. «Хлебный дом». Разработан комплект технической документации на новые виды хлебобулочных изделий, утвержденный ООО «Боровое».

Основой технологий разработанных хлебобулочных изделий является применение результатов практической реализации разработанной и верифицированной методологии процесса получения безопасного сырьевого ингредиента и продуктов с повышенной пищевой ценностью.

Таким образом, предложенные в работе концептуальные подходы, инструментарий и результаты верификации методологического подхода к процессу получения безопасного сырьевого ингредиента и хлебобулочных изделий повышенной пищевой ценности развивают перспективное научное направление, связанное с минимизацией рисков контаминации и снижением продовольственных потерь. Предложенный подход к получению сырьевого ингредиента ЦСМПЗП может быть рекомендован к применению в отношении других зерновых культур, а также для предприятий пищевой индустрии различной направленности производства.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, индексируемые в международных базах цитирования Web of Science и Scopus

1. **Naumenko, N. V.** Sonochemistry effects influence on the adjustments of raw materials and finished goods properties in food production / N. V. Naumenko, I. V. Kalinina. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.691 // Materials science forum. – 2016. – Vol. 870. – P. 691–696.

2. Nilova, L. A study of the forms of bound water in bread and bakery products using differential thermal analysis / L. Nilova, **N. Naumenko**, I. Kalinina // Agronomy Research. – 2017. – Vol. 15, № S2. – P. 1386–1398.

3. **Naumenko, N. V.** Effects of various raw ingredients on bread quality / N. V. Naumenko, A. V. Paymulina, A. A. Ruskina, V. V. Khudyakov // Agronomy research. – 2017. – Vol. 15, № S2. – P. 1375–1385.

4. Kretova, Y. I. The application of micro-wave treatment to reduce barley contamination / Y. I. Kretova, L. A. Tsirulnichenko, **N. V. Naumenko** [et al.] // Agronomy research. – 2018. – Vol. 16, № 5. – P. 2079–2087.

5. Kalinina, I. Perspectives of using of ultrasonic cavitation in water treatment technology for the food productions / I. Kalinina, **N. Naumenko**, R. Fatkullin. – DOI 10.1088/1755-1315/272/3/032077 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 272. – Art. 032077. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/272/3/032077/pdf>.

6. **Науменко, Н. В.** Обеспечение производства безопасной цельнозерновой муки из пророщенного зерна пшеницы на основе принципов СМБПП / Н. В. Науменко, И. Ю. Потороко, И. В. Калинина. – DOI 10.36107/spfr.2019.205 // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2019. – № 4. – С. 103–117.

7. Kalinina, I. The application of ultrasound for the regulation of the starch gel viscosity / I. Kalinina, A. Ruskina, R. Fatkullin, **N. Naumenko** [et al.] // Bulgarian journal of agricultural science. – 2020. – Vol. 26, № 3. – P. 690–695.

8. **Науменко, Н. В.** Возможности регулирования стресспротекторных свойств продуктов питания для повышения иммунитета организма человека в условиях пандемии COVID-19 / Н. В. Науменко, И. Ю. Потороко, И. В. Калинина [и др.]. – DOI 10.14529/hsm20s115 // Человек. Спорт. Медицина. – 2020. – Т. 20. № S1. – С. 116–128.

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий ВАК

9. Потороко, И. Ю. Использование возможностей регулирования состава микрофлоры продовольственных товаров электрофизическими мето-

дами воздействия / И. Ю. Потороко, **Н. В. Науменко** // Товаровед продовольственных товаров. – 2011. – № 2. – С. 6–10.

10. Нилова, Л. П. Прогноз развития рынка обогащенных хлебобулочных изделий / Л. П. Нилова, К. Ю. Маркова, С. А. Чунин, И. В. Калинина, **Н. В. Науменко** // Товаровед продовольственных товаров. – 2011. – № 5. – С. 25–30.

11. Нилова, Л. П. Оптимизация ассортимента хлебобулочных изделий на основе анализа структуры потребительского рынка в г. Санкт-Петербурге и Челябинске / Л. П. Нилова, **Н. В. Науменко**, И. В. Калинина, К. Ю. Маркова // Вестник ЮУрГУ. Серия: Экономика и менеджмент. – 2011. – Вып. 17, № 21. – С. 183–189.

12. **Науменко, Н. В.** Использование микроскопии как перспективного метода для изучения микроструктуры пшеничного теста / Н. В. Науменко. – DOI 10.14529/food150403 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 17–22.

13. **Науменко, Н. В.** Исследование факторов физической природы, используемых для интенсификации биотехнологических процессов / Н. В. Науменко. – DOI 10.14529/food160102 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2016. – Т. 4, № 1. – С. 13–19.

14. **Науменко, Н. В.** Опыт отечественных и зарубежных ученых в использовании микроскопии как перспективного метода для изучения пищевых продуктов / Н. В. Науменко. – DOI 10.14529/food160409 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2016. – Т. 4, № 4. – С. 80–85.

15. **Науменко, Н. В.** Способы корректировки свойств сырья и качества хлеба из пшеничной муки / Н. В. Науменко, В. В. Худяков. – DOI 10.14529/food160309 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2016. – Т. 4, № 3. – С. 71–79.

16. **Науменко, Н. В.** Возможности варьирования технологических свойств зерна пшеницы Уральского региона / Н. В. Науменко, И. В. Калинина, А. В. Паймулина, В. В. Худяков. – DOI 10.14529/food170306 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2017. – Т. 5, № 3. – С. 45–51.

17. **Науменко, Н. В.** Возможности использования пищевых ингредиентов растительного происхождения для улучшения потребительских характеристик хлеба из пшеничной муки / Н. В. Науменко, И. В. Калинина, Т. Ю. Фомина. – DOI 10.14529/food170408 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 57–65.

18. Паймулина, А. В. Использование активированной воды и комбинированной растительной добавки на основе стевиозида и фукоидана в технологии хлебопечения / А. В. Паймулина, В. В. Худяков, **Н. В. Науменко**. – DOI 10.14529/food170111 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2017. – Т. 5, № 1. – С. 82–89.

19. **Науменко, Н. В.** К вопросу интенсификации процесса проращивания зерна / Н. В. Науменко, И. Ю. Потороко, Ю. И. Кретьева [и др.]. – DOI 10.24411/1999-6837-2018-14089 // Дальневосточный аграрный вестник. – 2018. – № 4 (48). – С. 109–114.

20. **Науменко, Н. В.** Влияние размеров частиц муки из пророщенного зерна на ее технологические свойства и качество готовых изделий / Н. В. Науменко, А. В. Паймулина, М. Т. Велямов. – DOI 10.14529/food190105 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 40–50.

21. **Науменко, Н. В.** Совершенствование технологии производства хлебобулочных изделий, полученных с использованием ингредиентов растительного происхождения / Н. В. Науменко, И. Ю. Потороко, И. В. Калинина [и др.]. – DOI 10.20914/2310-1202-2019-2-108-113 // Вестник ВГУИТ. – 2019. Т. 81, № 2. – С. 108–113.

22. **Науменко, Н. В.** Афлотоксины зерна и способы минимизации рисков их накопления / Н. В. Науменко, И. Ю. Потороко, А. В. Малинин [и др.]. – DOI 10.14529/food190208 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 70–80.

23. **Науменко, Н. В.** Оптимизация условий процесса проращивания зерна пшеницы / Н. В. Науменко, И. Ю. Потороко, А. В. Малинин, А. В. Цатуров. – DOI 10.21515/1990-4665-151-017 // Научный журнал КубГАУ. – 2019. – № 151 (07). – URL: <http://ej.kubagro.ru/2019/07/pdf/17.pdf>.

24. **Науменко, Н. В.** Цельнозерновая мука из пророщенного зерна пшеницы как пищевой ингредиент в технологии продуктов питания / Н. В. Науменко, И. Ю. Потороко, М. Т. Велямов. – DOI 10.14529/food190303 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 23–30.

25. Калинина, И. В. Исследование содержания флавоноидов в обогащенных хлебобулочных изделиях, полученных с использованием ингредиентов растительного происхождения / И. В. Калинина, И. Ю. Потороко, **Н. В. Науменко** [и др.]. – DOI 10.20914/2310-1202-2019-2-114-118 // Вестник ВГУИТ. – 2019. – Т. 81, № 2. – С. 114–118.

26. **Науменко, Н. В.** Влияние ультразвукового воздействия при проращивании зерна пшеницы на синтез γ -аминомасляной кислоты / Н. В. Науменко, И. Ю. Потороко, Н. В. Белоглазова [и др.]. – DOI 10.14529/food190409 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2019. – Т. 7, № 4. – С. 85–93.

27. **Науменко, Н. В.** Применение нетепловых методов обеззараживания растительного сырья в производстве пищевых продуктов / Н. В. Науменко, И. Ю. Потороко, Н. В. Попова [и др.]. – DOI 10.20914/2310-1202-2019-4-110-116 // Вестник ВГУИТ. – 2019. – Т. 81, № 4. – С. 110–116.

28. **Науменко, Н. В.** Микотоксины и безопасность продуктов питания: явные и скрытые угрозы / Н. В. Науменко, В. В. Ботвинникова, В. Сотт-

никова [и др.]. – DOI 10.14529/food200112 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 105–111.

29. **Науменко, Н. В.** Исследование рисков контаминации зерновых культур микотоксинами токсигенных плесеней / Н. В. Науменко, В. В. Ботвинникова. – DOI 10.14529/food200209 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 74–81.

30. **Науменко, Н. В.** Продовольственные потери и пищевые отходы в контексте устойчивости продовольственных систем: понятийный аппарат и его применимость / Н. В. Науменко, В. В. Ботвинникова, Е. Е. Науменко. – DOI 10.14529/food200301 // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2020. – Т. 8, № 3. – С. 5–11.

Патенты

31. Патент № 2668096 Российская Федерация, МПК A21D 8/02. Способ производства хлеба / Худяков В. В., Потороко И. Ю., **Науменко Н. В.** [и др.] : № 22017141350 ; заявл. 27.11.2017 ; опубл. 26.09.2018. – 6 с.

32. Патент № 2690486 Российская Федерация, МПК A01C 1/00. Способ стимулирования прорастания зерна / Потороко И. Ю., **Науменко Н. В.**, Калинина И. В. [и др.] : № 2018134834 ; заявл. 01.10.2018 ; опубл. 03.06.2019. – 6 с.

33. Патент № 2707944 Российская Федерация, МПК A21D 8/02. Способ обеззараживания зерна / Потороко И. Ю., **Науменко Н. В.**, Лейви А. Я., Калинина И. В. : № 2019124649 ; заявл. 31.07.2019 ; опубл. 02.12.2019. – 10 с.

34. Патент № 2723957 Российская Федерация, МПК A21D 2/36. Способ производства хлеба с использованием пророщенного зерна пшеницы / Потороко И. Ю., **Науменко Н. В.**, Калинина И. В. : № 2019133259 ; заявл. 17.10.2019 ; опубл. 18.06.2020. – 12 с.

Монографии

35. Потороко, И. Ю. Электрофизические методы в формировании потребительских свойств, качества и безопасности продовольственных товаров / И. Ю. Потороко, **Н. В. Науменко**. – Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2011. – 159 с. – ISBN 978-5-696-04265-7.

36. **Науменко, Н. В.** Использование факторов физической природы для обеспечения качества и сохраняемости хлебобулочных изделий / Н. В. Науменко. – Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2014. – 160 с. – ISBN 978-5-696-04618-1.

37. Потороко, И. Ю. Формирование потребительских свойств хлебобулочных изделий с использованием пищевых ингредиентов растительного происхождения / И. Ю. Потороко, И. В. Калинина, **Н. В. Науменко**. – Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2019. – 171 с. – ISBN 978-5-696-05047-8.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

УЗВ – ультразвуковое воздействие.

НЭМИ – наносекундные электромагнитные импульсы.

ХПИ – холодное плазменное излучение.

ЦСМПЗП – цельносмолотая мука из пророщенного зерна пшеницы.

ГАМК – γ -аминомасляная кислота.

И_{Бд} – индекс биодоступности.

R_k – коэффициент корреляции расчетных и экспериментальных значений.

St. err. – стандартное отклонение.

СЭМ – сканирующая электронная микроскопия.

ЗП-1 – пшеница мягкая яровая сорта «Любава».

ЗП-2 – пшеница мягкая яровая сорта «Эритроспериум 59».

ЗПк – контрольные образцы зерна пшеницы после обработки ХПИ.

ЗПузв – опытные образцы, которые обеззараживались ХПИ и подвергались УЗВ в гидромодуле.

КПЗП – контролируемое проращивание зерна пшеницы.

ПЗП – пророщенное зерно пшеницы.

МПХ – мука пшеничная хлебопекарная.

СМ-1 (2, 3, 4) – модельные смеси муки пшеничной хлебопекарной первого сорта и ЦСМПЗП в соотношении 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 соответственно.

ПТк – пшеничное тесто из муки первого сорта (контроль).

ПТЦузв – пшеничное тесто из муки первого сорта с заменой 18 % сортовой муки на ЦСМПЗП.

ХБИк – хлебобулочное изделие (контроль).

ХБИц – хлебобулочное изделие с заменой 18 % муки первого сорта на ЦСМПЗП и предварительной подготовкой воды путем УЗВ.

МБИк – мелкоштучное булочное изделие (контроль).

МБИц – мелкоштучное булочное изделие с заменой 14 % муки первого сорта на ЦСМПЗП и предварительной подготовкой воды путем УЗВ.