

На правах рукописи



Руськина Алена Александровна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОНОХИМИЧЕСКОЙ
МОДИФИКАЦИИ КАРТОФЕЛЬНОГО КРАХМАЛА
ДЛЯ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ**

Специальность 4.3.3. Пищевые системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Потороко Ирина Юрьевна (Россия),
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Литвяк Владимир Владимирович (Россия),
ведущий научный сотрудник ВНИИК – филиал
ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А. Г. Лорха»

кандидат технических наук, доцент
Цыганок Сергей Николаевич (Россия),
доцент кафедры методов и средств измерений
и автоматизации Бийского технологического
института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский
государственный технический университет
им. И. И. Ползунова»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический университет»

Защита диссертации состоится 18 сентября 2024 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.425.03 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).

Отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ГСП-985, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.425.03. Факс: (343) 283-13-25.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент



Л. А. Донскова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В текущий момент необходимость повышения качества жизни населения и увеличения ее продолжительности не утрачивает своей актуальности. Заинтересованность мирового сообщества в устойчивости сегмента рынка продуктов питания для профилактики заболеваний отражает разработанная Программа «Десятилетие действий ООН по проблемам питания, 2016–2025 годы», а также Цели в области устойчивого развития до 2030 г.

Решение поставленных задач обозначено в приоритетных направлениях государственной политики РФ, закрепленных в Доктрине обеспечения продовольственной безопасности России до 2030 г. и Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 г. Одним из основных направлений в обеспечении глобальной продовольственной безопасности и технологического суверенитета государства является осуществление мер по повышению пищевой ценности и доступности пищевой продукции. Среди основных видов продукции АПК особое место отводится производству картофеля, что также обозначено в федеральном проекте «Развитие отраслей овощеводства и картофелеводства».

Россия входит в десятку ведущих стран, производящих более половины валового производства картофеля (около 30 млн т). Однако значимой является проблема потерь урожая картофеля при хранении, которые в ряде хозяйств достигают 30 %. В связи с этим в рамках решения задачи сохранения продовольственных ресурсов особый интерес представляют разработки в области глубокой переработки картофеля.

В нашей стране доля полуфабрикатов и продуктов глубокой переработки картофеля не превышает нескольких процентов, что требует поиска новых технологических решений. Тенденции увеличения объемов продукции переработки картофеля очевидны, что, по мнению экспертов, перспективно для перерабатывающей отрасли. В рамках государственной стратегии импортозамещения возникают новые стимулы к расширению рыночного предложения в сегменте пищевых добавок и ингредиентов на основе продуктов переработки картофельного сырья, а также модификации выделенных из него компонентов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке программы стратегического лидерства «Приоритет 2030», стратпроект № 3 «Экосреда постиндустриальной агломерации», подпроект «Экотехнологии ресурсосбережения АПК».

Степень разработанности темы исследования. Исследования в области глубокой переработки растительного сырья и модификации извлекаемых компонентов представлены в работах Л. В. Донченко, Н. Р. Андреева, Н. Д. Лукина, В. А. Бызова, О. Н. Давыденко, В. В. Литвяк, В. М. Позняковского, О. В. Чугуновой, И. И. Судзиловского, А. Н. Богатырева, А. И. Бондарь, Д. М. Исакова, А. Ю. Соловьева, Е. П. Тюрева, С. В. Зверева, О. В. Цы-

гулева, О. С. Серпова, Л. А. Борченкова, В. И. Седова. Исследования в области модификации крахмалов различной природы описаны российскими и зарубежными учеными Е. В. Никитиной, В. Н. Кряжевым, Л. Б. Кузиной, О. Н. Красуля, S. H. Sonawan, U. Bagale, J. Y. Zuo, O. O. Awolu, S.-S. Wong, M.-C. Gentès, P. N. Agyemang, H. E. Oh, R. P. W. Williams, M. Sujka и др.

Однако при анализе доступных источников информации выявлено незначительное количество данных, описывающих применение методов электрофизического воздействия для модификации крахмалов и использование для этих целей эффектов ультразвука. Кроме того, недостаточно комплексных исследований, посвященных повышению доли резистентного крахмала в составе растительного сырья и продуктов его переработки, а также его пищевой ценности и перспективности как пребиотика.

Целью диссертационной работы является разработка модифицированного на основе ультразвукового воздействия картофельного крахмала с доказанными функциональными и технологическими свойствами для интеграции в пищевые системы с добавленной пользой.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие **задачи**:

1) проанализировать состояние сырьевой базы, используемых в Челябинской области технологий глубокой переработки картофеля, определить приоритетные критерии для обоснования исследований в данном направлении;

2) исследовать факторы, определяющие качество картофельного сырья и функционально-технологические свойства (ФТС) полученных из него крахмалов, установить необходимость их корректировки для использования в качестве пищевой добавки и ингредиента;

3) разработать технологию модификации картофельного крахмала на основе низкочастотного ультразвукового воздействия, определить рациональные режимы воздействия и провести их верификацию;

4) обосновать целесообразность использования сонохимически модифицированного картофельного крахмала как пищевой добавки и ингредиента для компенсации ФТС сырья при получении пищевых систем с добавленной пользой;

5) исследовать технологическую пригодность разработанного модифицированного картофельного крахмала в составе рецептурных композиций мясных эмульсионных продуктов и оценить их свойства;

6) провести оценку физиологической ценности разработанного сонохимически модифицированного картофельного крахмала с использованием методов *in vitro*, спрогнозировать *in silico* физиологическую пользу;

7) рассчитать экономическую эффективность технологии сонохимической модификации крахмала для рекомендации производителям, разработать нормативно-техническую документацию.

Научная новизна. Работа содержит элементы научной новизны в рамках п. 8, 11, 13, 36 паспорта специальности ВАК при Минобрнауки России 4.3.3. Пищевые системы (технические науки).

1. Научно обоснована и экспериментально доказана эффективность использования кавитационных эффектов низкочастотного ультразвука для направленного изменения морфологии и структуры зерен картофельного крахмала на начальной стадии процесса модификации. Определены рациональные режимы ультразвукового воздействия по двум критериям: размеру частиц – мощность 576 Вт/л, экспозиция 10 мин; массовой доли амилозной фракции – мощность 400 Вт/л, экспозиция 10 мин (п. 13 паспорта специальности 4.3.3).

2. Впервые доказано, что эффекты ультразвукового воздействия при модификации крахмала улучшают его функционально-технологические свойства: установлено повышение на 60 % водоудерживающей способности, на 130 % жирудерживающей способности, на 79 % эмульгирующей активности и уменьшение вязкости на 60 % при увеличении доли амилозы до 44,4 % (п. 36 паспорта специальности 4.3.3).

3. Впервые подтверждено *in vitro* влияние эффектов кавитации ультразвука на увеличение до 50,8 % доли резистентной фракции в сонохимически модифицированном крахмале. С использованием метода *in silico* спрогнозированы высокоспецифичные межмолекулярные взаимодействия амилозы с рецепторами антиканцерогенного и иммуномодулирующего действия, что доказывает физиологическую ценность модифицированной формы крахмала (п. 8 паспорта специальности 4.3.3).

4. Научно обоснованы рецептуры и получены мясные эмульсионные фарши обеспечивающих добавленную полезность готовых изделий с заменой говядины на белое мясо птицы и внесением модифицированного крахмала с высокой долей резистентной фракции пребиотического действия (п. 11 паспорта специальности 4.3.3).

Положения, выносимые на защиту:

– результаты исследования качества картофельного сырья и ФТС выделенных крахмалов; обоснование необходимости корректировки для использования крахмала в качестве пищевой добавки и ингредиента;

– новая технология модификации картофельного крахмала на основе низкочастотного ультразвукового воздействия; рациональные режимы ультразвукового воздействия и результаты оценки ФТС;

– результаты оценки физиологической ценности модифицированного крахмала с использованием методов *in vitro* и *in silico* для профилактики воспалительных процессов в ЖКТ;

– результаты оценки технологической пригодности разработанного пищевого высокоамилозного ингредиента в составе мясных эмульсионных продуктов.

Теоретическая и практическая значимость. *Теоретическая значимость* заключается в применении научно обоснованного подхода к осуществлению процессов модификации картофельного крахмала на основе кавитационных эффектов низкочастотного ультразвука с целью увеличения

в крахмале доли амилозной фракции и использования в качестве пищевой добавки и ингредиента для обеспечения добавленной полезности.

Практическая значимость заключается в разработке технологии получения сонохимически модифицированного высокоамилозного крахмала из районированных в Челябинской области сортов картофеля как пищевой добавки с улучшенными ФТС и пищевого ингредиента, формирующего добавленную полезность при фортификации в пищевые системы.

По результатам работы получены: патент РФ № 2708557 «Способ производства модифицированного крахмала»; патент РФ № 2810087 «Способ получения высокоамилозного картофельного крахмала».

Разработаны рецептуры мясных эмульсионных фаршей с заменой говядины на белое мясо птицы и внесением модифицированного крахмала с высокой долей резистентной фракции (50,8 %) пребиотического действия, обеспечивающие добавленную полезность готовых изделий. Разработанные рецептуры прошли промышленную апробацию на мясоперерабатывающем предприятии ООО «Концерн Митмонд», г. Челябинск.

Разработана технологическая инструкция ТИ 07116724-023-2023 на технологию производства модифицированного картофельного крахмала, которая внедрена на ООО «ИНТЕХ», г. Воронеж (НИОКР № 2023246 от 06.07.2023).

Материалы диссертации используются в учебном процессе на кафедре пищевых и биотехнологий ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» для студентов направлений подготовки 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья» и 19.03.03 «Продукты питания животного происхождения», 19.04.01 «Биотехнология».

Работа является комплексной и включает в себя элементы научного исследования, практического применения, методического использования, результаты которых получены автором лично либо при его непосредственном участии.

Методология исследований. Методологической основой работы являются труды отечественных и зарубежных ученых по вопросам глубокой переработки картофеля и производства модифицированных крахмалов. Для решения поставленных задач применялись общенаучные подходы, при проведении экспериментальных исследований использовались классические методы и методики, а также специальные методы исследований.

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности подтверждена результатами экспериментальных исследований, большими объемами экспериментальных данных, обработанных методами расчета статистической достоверности измерений с использованием серии компьютерных программ Microsoft Office Word и Excel для Windows 10, Statistica 13, MathCad 14.0 Professional, OriginPro 8.0 SR5, PyMOL 1.7.4.2.

Основные положения и результаты работы докладывались на конференциях, форумах и выставках, прошедших в Кургане (2016, 2018, 2020, 2023), Москве (2016), Челябинске (2019, 2023), Екатеринбурге (2023).

Публикации. По материалам работы опубликовано 22 научных работы, из них 12 статей в журналах, входящих в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, две публикации в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus, одна статья в RSCI; получено два патента.

Структура и объем работы. Работа состоит из пяти глав, в том числе введения, аналитического обзора научно-технической литературы, методической части, результатов исследования и их анализа, заключения, списка литературы и четырех приложений. Основное содержание изложено на 159 страницах печатного текста и включает 29 таблиц и 31 рисунок, список литературы включает 199 информационных источников, из них 107 – зарубежных авторов.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность работы, проанализирована степень разработанности проблемы, показаны научная новизна и практическая значимость, достоверность и уровень апробации, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен аналитический обзор российских и зарубежных открытых информационных источников по теме исследования. Рассмотрены химический состав, структура растительных высокомолекулярных углеводов, их значение для гомеостаза человека. Описаны технологии модификации крахмалов и их влияние на формирование ФТС и пищевой ценности. На основе проанализированных данных сформулированы цель и задачи собственных исследований.

Во **второй главе** приведена общая схема исследования (рисунок 1), определены объекты и методы исследований.

Объектами исследований являлись: картофель продовольственный трех ботанических сортов (Ред Скарлетт – РС, Браслет – Б, Розара – Р), обладающих по объемам производства в Челябинской области, предоставленных Южно-Уральским НИИ садоводства и картофелеводства – филиалом ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН; крахмалы, выделенные из картофельного сырья нативные (КК_{РС}, КК_Б, КК_Р) и модифицированные с использованием методов ультразвукового воздействия (ККН – нативный; ККМ1 – модификация в режиме 1; ККМ2 – модифицированный в режиме 2); мясные эмульсионные фарши для колбасного производства с использованием сонохимически модифицированного крахмала (К1, К2, М1, М2, М3, М4), полученные по традиционной технологии.



Рисунок 1 – Схема проведения экспериментальных исследований

В работе использованы стандартные общепринятые и специальные методы анализа для определения химического состава, структурных свойств, физико-химических, микробиологических показателей качества и свойств исследуемых объектов, а также методы молекулярного моделирования.

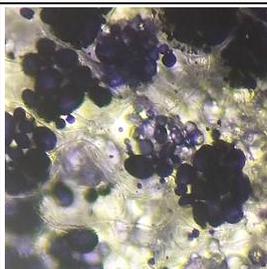
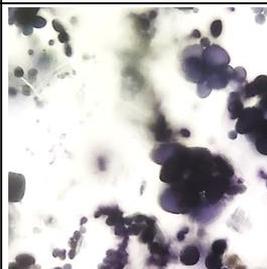
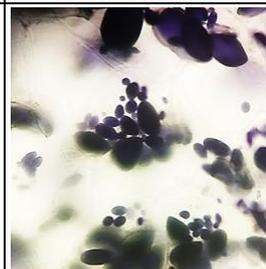
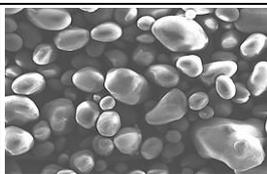
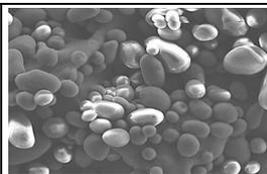
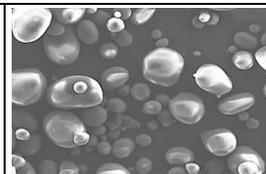
Основная часть экспериментальных исследований выполнена в соответствии с поставленными задачами на базе научно-исследовательских лабораторий ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»: НОЦ «Нанотехнологии»; международной НИЛ «Синтез и анализ пищевых ингредиентов» кафедры пищевых и биотехнологий Высшей медико-биологической школы.

В третьей главе представлены результаты обоснования использования картофельного сырья, произведенного в Челябинской области, для получения крахмалов в нативной и модифицированной форме.

На первом этапе проведена оценка качества и технологической пригодности картофеля трех ботанических сортов – Ред Скарлетт (КРС), Браслет (КБ), Розара (КР). В ходе исследований установлена высокая сохраняемость на уровне 96–98 %, крахмалистость на 20–22 % превышает базисное значение (14 %).

На втором этапе исследованы технологические свойства выделенных крахмалов из картофеля трех ботанических сортов (таблица 1). Анализ результатов показал высокую вариабельность данных по показателям: вязкость крахмальных гелей от $(2,85 \pm 0,13)$ до $(1,99 \pm 0,12)$ Па/с; содержание амилозы от $(14,3 \pm 0,5)$ % до $(9,6 \pm 0,5)$ %.

Таблица 1 – Результаты исследования реологических и структурных показателей свойств картофельных крахмалов

Показатель	Наименование образцов		
	КК _{РС}	КК _Б	КК _Р
Содержание крахмала, %	$17,4 \pm 1,0$	$16,5 \pm 0,5$	$16,0 \pm 0,5$
Внешний вид распределения крахмальных зерен в нативном состоянии в мякоти клубней			
Вязкость, Па/с	$1,99 \pm 0,12$	$2,16 \pm 0,13$	$2,85 \pm 0,13$
Растворимость, %	$6,0 \pm 0,5$	$2,6 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,2$
Набухающая способность, г/г	$9,2 \pm 0,6$	$9,9 \pm 0,6$	$6,1 \pm 0,5$
Содержание амилозы, %	$14,3 \pm 0,5$	$10,8 \pm 0,5$	$9,6 \pm 0,5$
Дисперсность образцов по размерному ряду частиц			
СЭМ образцов крахмалов (увеличение $\times 500$)			
Размер частиц (медианное значение), мкм	39,79	38,18	37,64

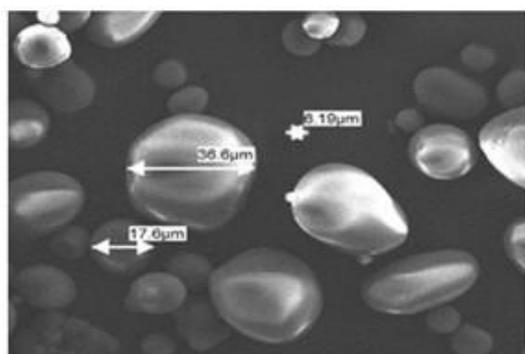
На основании совокупной оценки качества исходного картофельного сырья, функциональных и технологических свойств выделенных крахмалов для применения физических методов модификации в качестве объекта дальнейших исследований определен картофель ботанического сорта Ред Скарлетт.

В четвертой главе исследованы возможности применения кавитационных эффектов низкочастотного ультразвука (КЭУЗ) для модификации ФТС и полезности крахмала выделенного из картофеля сорта Ред Скарлетт и установлены рациональные режимы ультразвукового воздействия.

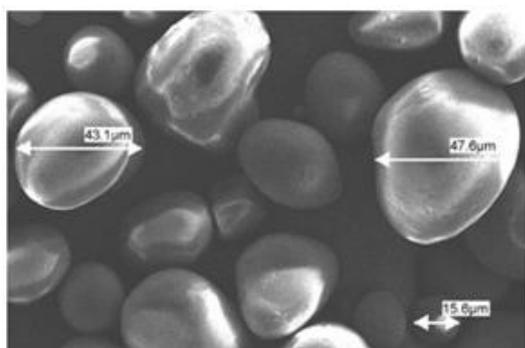
Сформирован массив данных о влиянии КЭУЗ при вариативности режимов воздействия на свойства водных крахмальных суспензий (КС) (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты оценки влияния параметров КЭУЗ на свойства крахмальных суспензий (усредненные значения по показателям оценки)

Код образца (режим КЭУЗ: мощность, Вт/л – время, мин)	Содержание амилозы, %	Вязкость, мПа/с	Размер частиц (медианное значение), мкм
Контроль	14,3 ± 0,5	1,99 ± 0,12	39,79
КС 189-5	15,0 ± 0,5	1,71 ± 0,10	44,42
КС 189-10	15,7 ± 0,5	1,68 ± 0,10	44,24
КС 189-15	15,9 ± 0,5	1,65 ± 0,10	41,01
КС 409,5-5	18,6 ± 0,6	1,59 ± 0,10	44,75
КС 409,5-10	42,9 ± 1,0	1,41 ± 0,05	48,79
КС 409,5-15	39,0 ± 1,0	1,37 ± 0,05	45,71
КС 630-5	40,5 ± 1,0	1,32 ± 0,05	45,26
КС 630-10	41,0 ± 1,0	1,28 ± 0,05	49,63
КС 630-15	40,0 ± 1,0	1,45 ± 0,05	46,08



а



б

Рисунок 2 – СЭМ-изображения образцов зерен крахмала (увеличение ×500): а – контроль; б – КЭУЗ в режиме 630 Вт/л и 10 мин

В зависимости от режимов воздействия установлено: снижение вязкости суспензий на 14–36 %; изменение дисперсии размерного ряда частиц крахмала (рисунок 2) в диапазоне $(52,32 \pm 10,00)$ мкм – 23,97 %, а также $(62,23 \pm 10,00)$ мкм – 20,19 %; максимальное увеличение доли амилозной фракции в 3 раза.

Моделировали процесс воздействия КЭУЗ по двум критериям: дисперсии и размеру частиц (режим воздействия М1); массовой доле амилозы (режим воздействия М2). Полученные поверхности отклика (рисунок 3) и уравнения регрессии (1), (2) адекватно описывают влияние эффектов ультразвукового воздействия на выбранные критерии. Определены рациональные режимы сонохимической модификации крахмала.

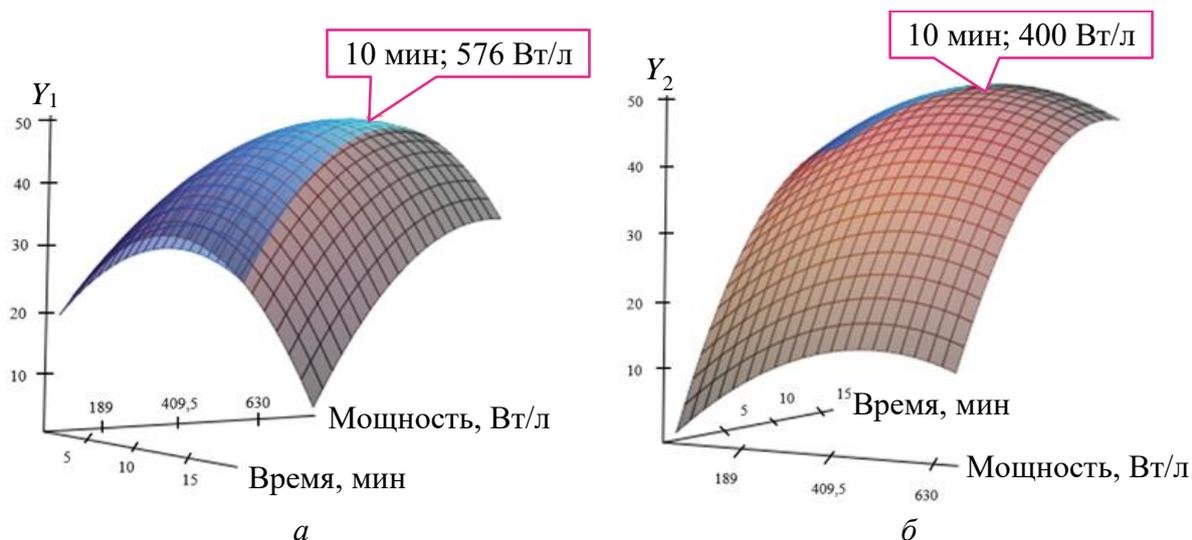


Рисунок 3 – Результаты моделирования процесса воздействия КЭУЗ в зависимости от режимов и контролируемых параметров:

Y_1 – дисперсного состава, мкм (а); Y_2 – содержания амилозы, % (б)

$$Y_1 = -2,644 \cdot 10^{-5} X_1^2 - 0,127 X_2^2 + 9,249 \cdot 10^{-4} X_1 X_2 + 0,021 X_1 + 2,085 \cdot 10^{-3} X_2 + 32,432; \quad (1)$$

$$Y_2 = -1,519 \cdot 10^{-6} X_1^2 - 2,02 \cdot 10^{-3} X_2^2 - 7,508 \cdot 10^{-6} X_1 X_2 + 1,885 \cdot 10^{-3} X_1 + 0,05 X_2 - 0,4. \quad (2)$$

Значительное увеличение доли амилозы (до 44,4 %) под воздействием КЭУЗ обусловлено изменениями фракционного состава на основе разрыва α -1,6-связи в молекуле амилопектина, что наглядно подтверждает анализ ФТ-ИР-спектров (рисунок 4).

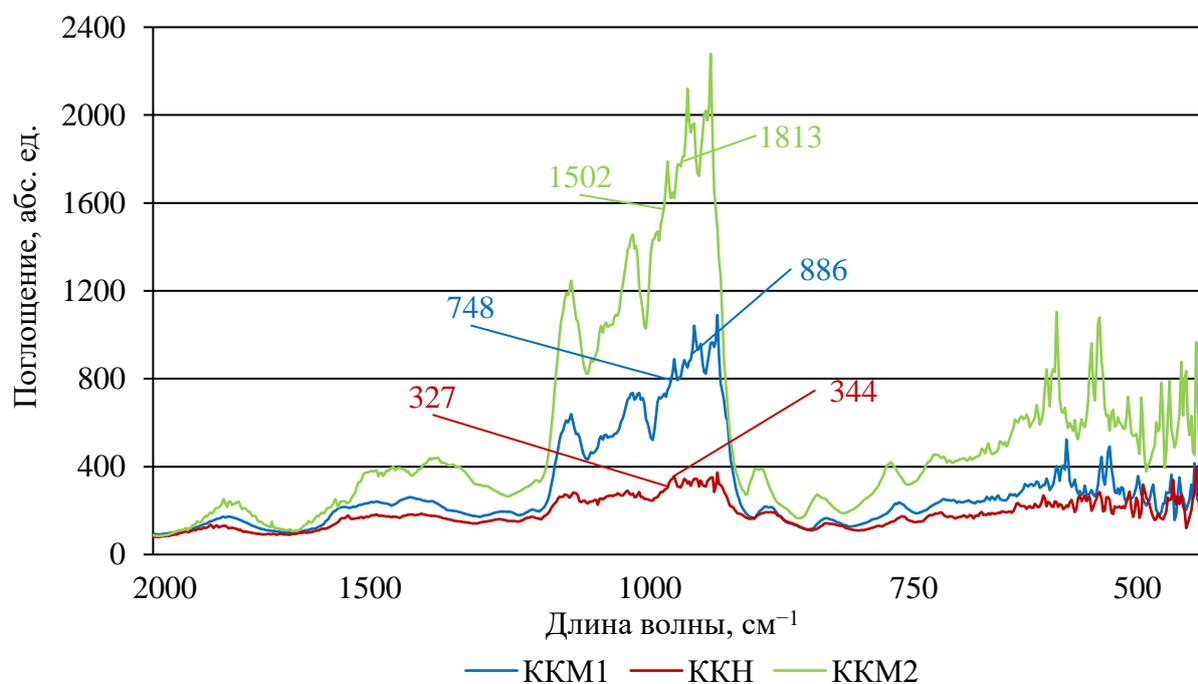


Рисунок 4 – ФТ-ИР-спектры контрольного и модельных образцов модифицированного картофельного крахмала

Фракционные изменения в крахмале при ультразвуковой модификации определяют снижение уровня кристалличности (таблица 3): для ККМ1 – до 17,66 %, для ККМ2 – до 13,90 %.

Таблица 3 – Соотношение кристаллической и аморфной областей в образцах картофельного крахмала до и после модификации

Показатель	Код образца крахмала		
	ККН	ККМ1	ККМ2
Кристаллическая область, %	39,77	17,66	13,90
Аморфная область, %	60,23	82,34	86,10
Соотношение волн 1049/1022 $\text{см}^{-1}/\text{см}^{-1}$ – индекс кристалличности (К)	0,95	0,84	0,82
Содержание амилозы, %	$14,3 \pm 0,5$	$41,0 \pm 0,5$	$44,4 \pm 0,5$

Высокая доля аморфной области 86,1 % (образец ККМ2) определяет амилозную активность модифицированного крахмала и увеличении доли устойчивой формы в его составе.

Эффективность процесса сонохимической модификации крахмала для свойств жиропоглощения и водопоглощения доказывают результаты ФТ-IR-анализа (рисунок 5). Полосы, характеризующие О–Н-связь, подтверждают увеличение водопоглощения в среднем на 60 %, а максимальное растяжение «плеча» метиленовой группы ($-\text{CH}_2-$) отражает увеличение жиропоглощения на 130 %, что связано с возможностью регулирования ФТС крахмалов как пищевой добавки.

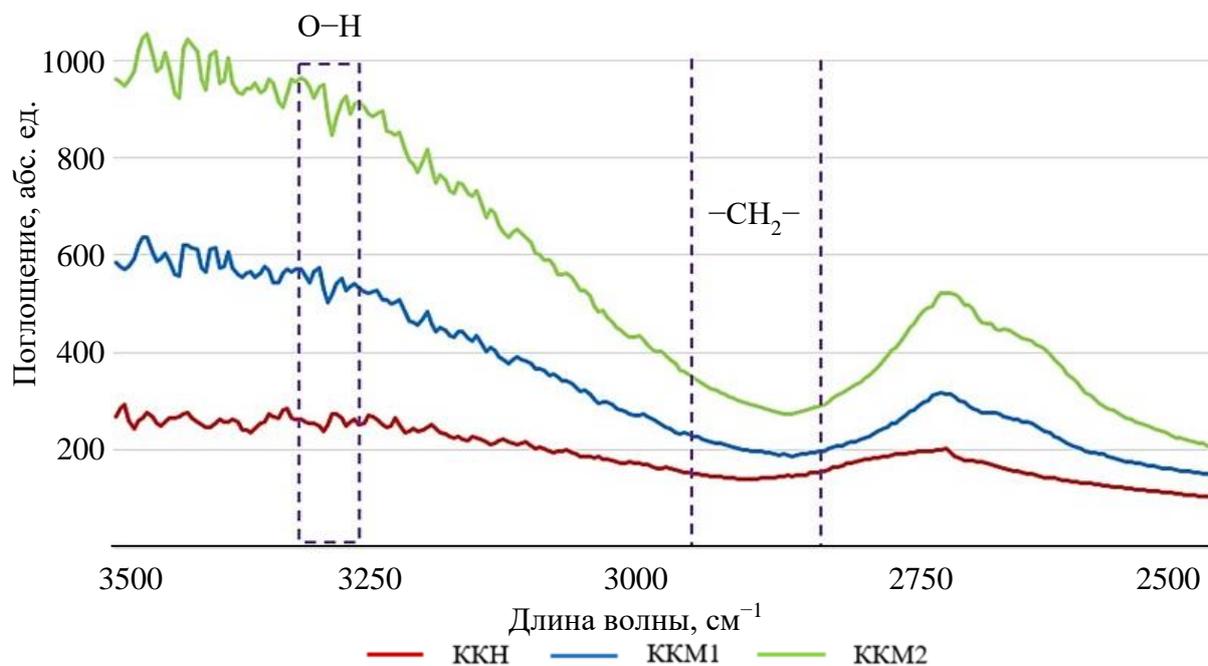


Рисунок 5 – Результаты исследования ФТ-IR-спектров контрольного и модельных образцов на гидро- и липофильность

Таблица 4 – Результаты исследования контролируемого переваривания *in vitro* с использованием метода Н. N. Englyst

Образец	Содержание типа крахмала после переваривания, %		
	RDS (до 20 мин)	SDS (20–120 мин)	RS (< 120 мин)
ККН	28,6 ± 0,5	59,8 ± 0,5	11,6 ± 0,5
ККМ1	18,8 ± 1,5	37,6 ± 1,5	43,6 ± 1,5
ККМ2	17,6 ± 1,5	31,6 ± 1,5	50,8 ± 1,5

Результаты контролируемого переваривания *in vitro* (таблица 4) свидетельствуют об изменениях в соотношении крахмальных фракций по длительности процесса (рисунок 6) и доказывают присутствие устойчивой фракции крахмала в количестве 50,8 %, что в 4,4 раза выше, чем в нативном крахмале.

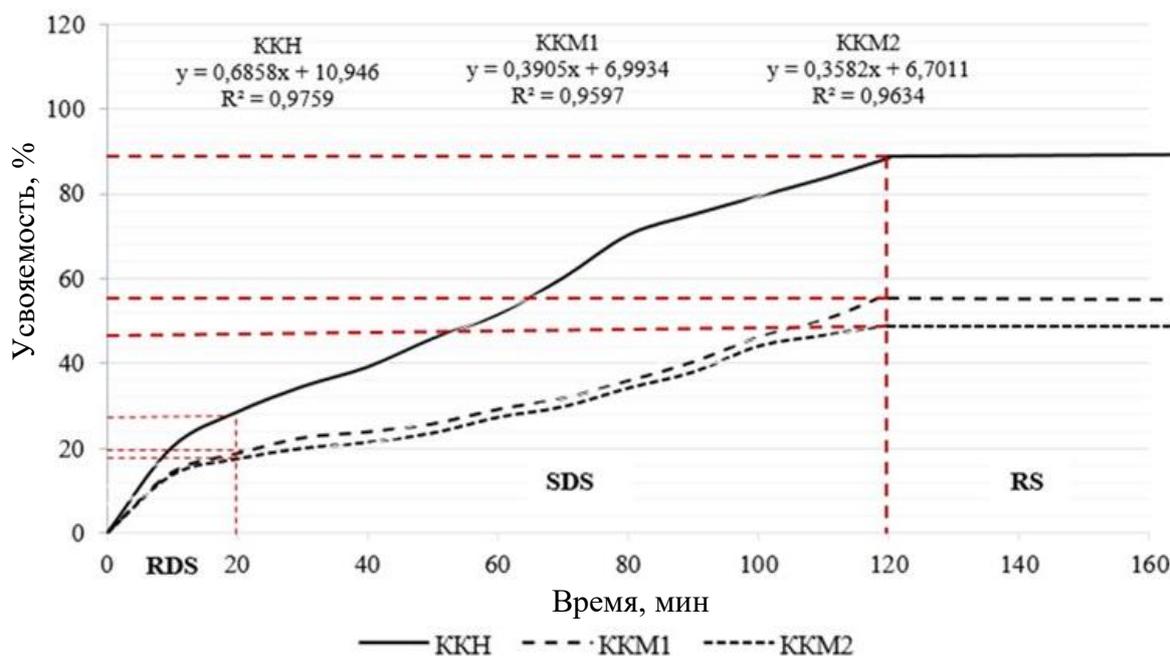


Рисунок 6 – Кривые контролируемого переваривания *in vitro* с использованием метода Н. N. Englyst

В пятой главе представлены результаты исследования применения со-нохимически модифицированного крахмала в составе мясных эмульсионных полуфабрикатов (МЭП) для колбасного производства. При разработке рецептов (таблица 5) для МЭП использованы общепринятые в мясном производстве подходы: 1) соотношение компонентов основного мясного сырья – свинины и мяса птицы – составило 60:40 и определялось с учетом их ФТС; 2) при внесении крахмальной пищевой добавки руководствовались требованиями ГОСТ 23670-2019 (массовая доля не более 2 % для колбас категории А). Для обеспечения полезности готовых изделий применяли прямую замену «красного» мяса КРС на мясо птицы и включение в состав фаршевых систем разработанного ингредиента МКК-RS2, содержащего 50,8 % резистентного крахмала. Нативный картофельный крахмал (НКК) заменяли на МКК-RS2 и учитывали рекомендуемые нормы потребления RS – от 5 до 20 г/сут, что обеспечивает пребиотическую добавленную полезность конечного продукта.

Таблица 5 – Рецептуры модельных образцов колбасных фаршей

Наименование сырья	Вариант рецептуры					
	1	2	3	4	5	6
Основное сырье, г/100 г						
Свинина жилованная полужирная	45,0	–	43,0	–	43,0	–
Свинина жилованная жирная	–	45,0	–	43,0	–	43,0
Филе куриное	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Крахмал картофельный нативный	–	–	2,0	2,0	–	–
Модифицированный картофельный крахмал (МКК-RS2) с долей резистентной фракции 50,8 %	–	–	–	–	2,0 (1 г RS)	2,0 (1 г RS)
Вода	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
<i>Итого</i>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Пряности и материалы, %						
Соль поваренная пищевая	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Для получения модельных образцов фаршей использовали общепринятую в колбасном производстве последовательность технологических операций (рисунок 7).

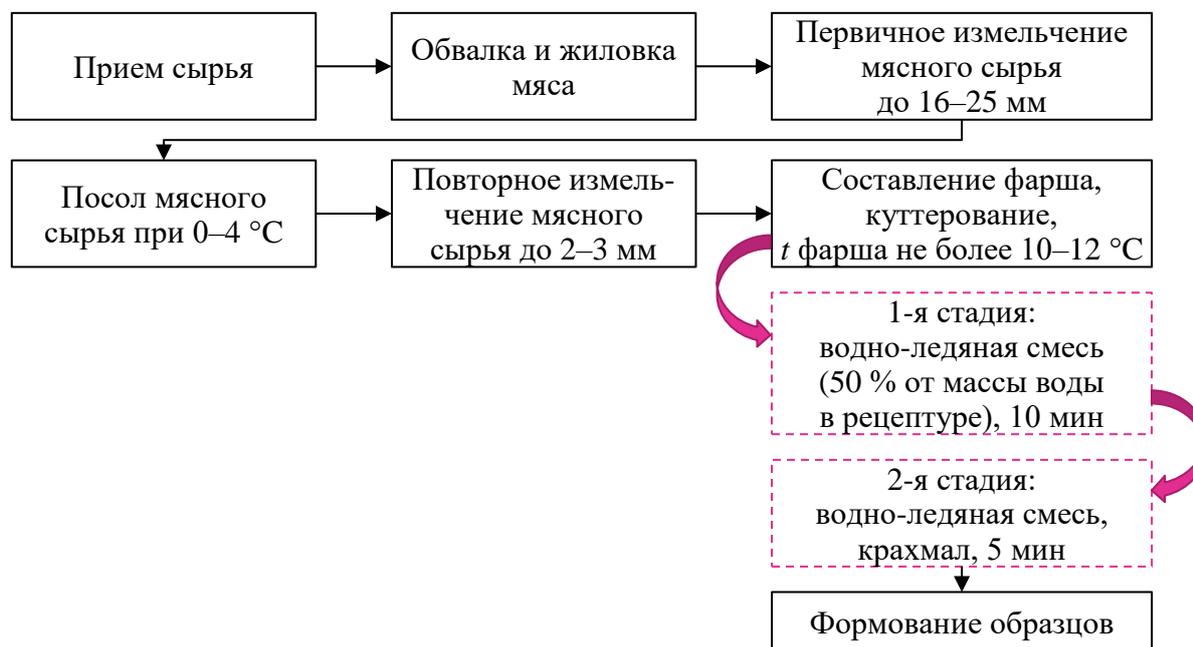


Рисунок 7 – Технологическая схема производства модельных образцов фаршей

Влияние комбинаций мясного сырья и разработанного ингредиента (МКК-RS2) оценивалось в отношении ФТС и безопасности модельных фаршей, а также потребительских свойств изделий после термической обработки. Разработанный ингредиент МКК-RS2 значительно улучшил органолептические характеристики модельных фаршей М3 и М4 по сравнению с образцами, содержащими нативный крахмал (М1 и М2). Результаты дегу-

стационарной оценки показали (рисунок 8), что модельные образцы фаршей М3 и М4 после термической обработки имели улучшенную консистенцию и сочность, по сравнению с образцами М1 и М2.

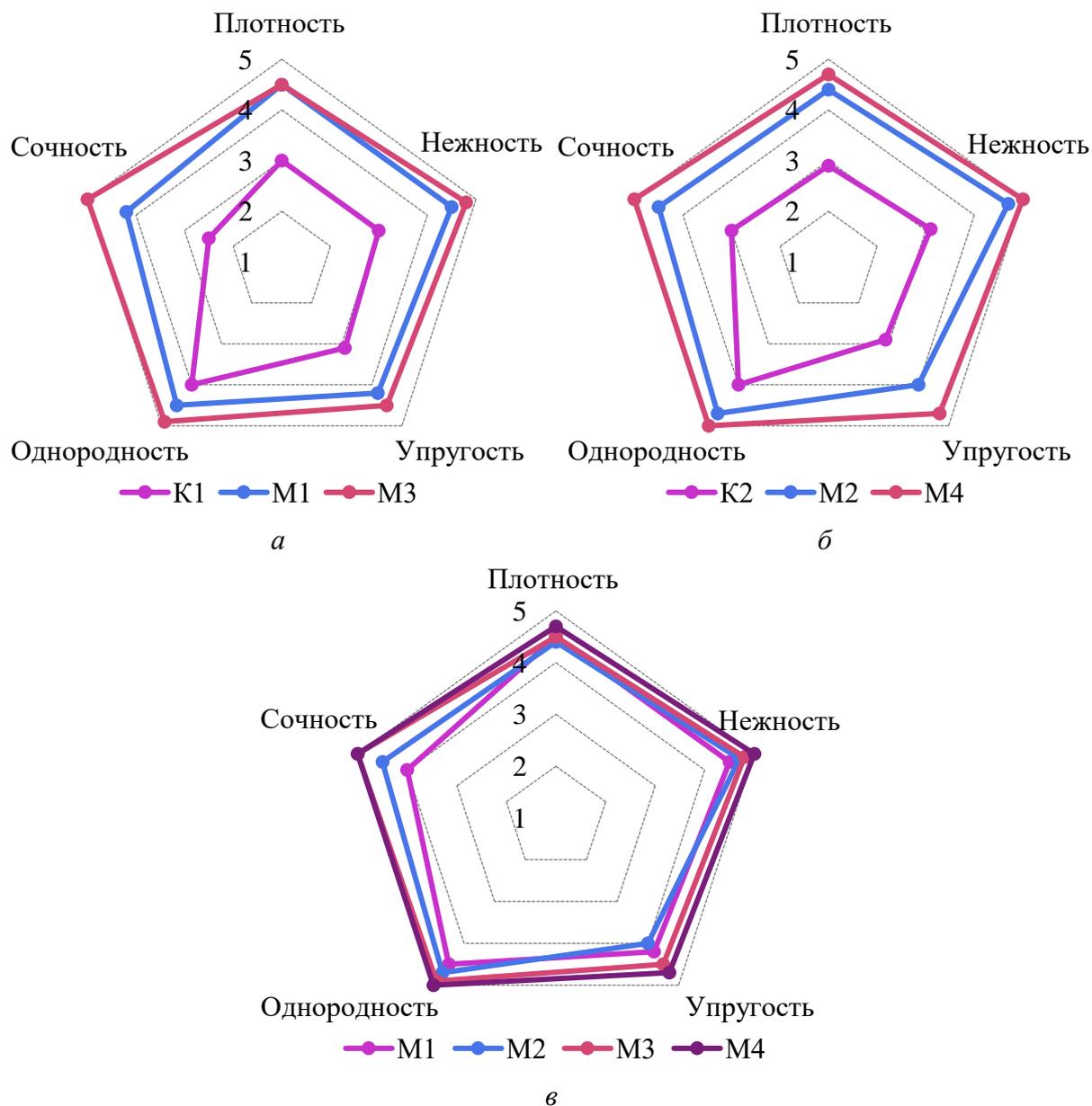


Рисунок 8 – Профиллограммы оценки консистенции модельных образцов фаршей при вариации мясных сырьевых компонентов:
а – свинина жилованная полужирная; *б* – свинина жилованная жирная;
в – при внесении НКК и МКК-RS2

Установлено, что разработанный ингредиент на основе модифицированного картофельного крахмала с высокой долей амилозной фракции позволяет повысить значение ВСС на 20–21 %, ВУС на 14,1–15,7 %, ЖУС на 17,9–23,3 %; снизить потери при тепловой обработке до 9,0–9,7 % (таблица б), что увеличивает выход готового продукта и оптимизирует экономическую составляющую производства.

Таблица 6 – Результаты оценки органолептических, физико-химических показателей качества и ФТС модельных фаршей

Показатель	Образец, содержащий					
	свинину жилованную полужирную			свинину жилованную жирную		
	K1	M1	M3	K2	M2	M4
Внешний вид						
Содержание влаги, %	73,6 ± 0,5	73,0 ± 0,5	71,3 ± 0,5	72,3 ± 0,5	72,0 ± 0,5	71,1 ± 0,5
pH	6,3	6,4	6,4	6,5	6,8	6,5
ВСС, %	69,8	72,2	91,2	67,4	71,6	89,6
ВУС, %	70,5	75,5	89,6	70,3	75,3	87,7
ЖУС, %	65,4	72,3	88,4	66,1	71,9	93,8
Потеря массы после термообработки, %	23,7 ± 1,5	19,1 ± 1,2	9,7 ± 0,1	26,2 ± 1,5	18,6 ± 1,2	9,0 ± 0,1
Эмульгирующая способность, %	63,0 ± 2,5	76,0 ± 2,5	80,0 ± 2,8	63,7 ± 1,3	78,0 ± 1,5	84,0 ± 2,4
Предельное напряжение сдвига, мм	0,287 ± 0,001	0,291 ± 0,001	0,338 ± 0,001	0,283 ± 0,001	0,283 ± 0,001	0,333 ± 0,001
Вязкость, г/мм	12,3 ± 0,5	15,4 ± 0,5	16,6 ± 0,5	12,2 ± 0,5	15,3 ± 0,5	16,4 ± 0,5

Совокупность полученных данных оценки функционально-технологических свойств (ВСС, ВУС, ЖУС, эмульгирующая способность, вязкость, растворимость) сонохимически модифицированного крахмала позволит обеспечить его широкую применимость в качестве пищевой добавки для разных пищевых систем.

Исследования физиологической ценности сонохимически модифицированного крахмала с повышенной долей RS-фракции осуществляли с использованием прогностической стратегии *in silico*. Докинг-моделирование доказало формирование высокоспецифичных межмолекулярных взаимодействий амилозы с рецепторами антиканцерогенного и иммуномодулирующего действия по совокупности аминокислотных остатков (таблица 7).

Таблица 7 – Анализ энергии взаимодействия лиганда амилозы с рецепторами с использованием системы молекулярной графики PyMOL 1.7.4.2

Рецептор	Энергия связи, ккал/мол	Аминокислотные остатки	Модель
Иммуномодулирующие рецепторы			
4RRW	-7,2	GLN-192 (3.4), SER-579 (2.9), GLY-354 (2.6), HIS-351 (2.5), ASP-347 (2.6)	
6MP4	-7,2	LYS-99 (2.8), VAL-82 (2.7), GLU-86 (2.2, 2.6), LYS-99 (2.9), THR-94 (2.8, 3.3), THR-81 (3.2, 3.0), VAL-82 (2.9)	
Антиканцерогенные рецепторы			
3KR3	-7,7	LYS-60 (3.4), LYS-65 (2.9), ASP-62 (2.0), ASP-2 (2.6, 2.2), THR-7 (3.0, 2.9), ASN-94 (3.3), SER-95 (3.2, 2.9, 3.2, 2.2)	

Из противораковых рецепторов наивысшую оценку стыковки с амилозой (-7,7 ккал/мол) показал рецептор 3KR3, что определяет физиологическую ценность крахмала RS2 как компонента антиканцерогенного действия, способствующего снижению рисков злокачественных новообразований. Из иммуномодулирующих рецепторов наивысшую оценку стыковки с амилозой (-7,2 ккал/мол) показали два рецептора – 4RRW и 6MP4, что определяет

высокую физиологическую ценность RS2 как пребиотического ингредиента, минимизирующего воспалительные процессы в организме человека.

Исследование относительной безопасности фаршей методом биотестирования на тест-культурах простейших *Paramecium caudatum* позволило оценить токсичность среды, в частности, по отсутствию биоцидного действия. По уровню выживаемости простейших сделан вывод о стабильности показателей безопасности модельных образцов фаршей на протяжении 2–4 ч до начала следующей технологической операции.

Оценка экономической эффективности технического решения показала некоторое увеличение себестоимости разработанного ингредиента на основе сонохимически модифицированного картофельного крахмала, которое компенсируется повышением уровня рентабельности за счет увеличения выхода готовой продукции в среднем на 15 %.

Заключение

В результате проведенной работы были решены поставленные задачи, на основании чего сделаны следующие выводы.

1. На основе анализа открытых статистических данных, в том числе Министерства сельского хозяйства Челябинской области, зафиксированы значительные объемы производства картофеля – 419 тыс. т в 2022 г., демонстрирующие высокую самообеспеченность региона – на уровне 200 %. Результаты анализа позволяют сделать вывод о высокой перспективности переработки картофельного сырья. Развитие данного направления позволит эффективно использовать продовольственные ресурсы с целью сокращения потерь на этапах сбора и в процессе хранения, которые составляют ежегодно от 15 % до 20 %. В соответствии с изученной информацией определены цель и задачи исследования в данном направлении.

2. В ходе исследования определены приоритетные по объемам возделывания ботанические сорта картофеля, среди которых по урожайности, крахмалистости и технологической пригодности выделены наиболее приемлемые для глубокой переработки – сорта Ред Скарлетт, Браслет, Розара. Извлеченные из них крахмалы по результатам комплексной оценки имеют различия в размерах зерен, пик распределения которых от 37,64 до 39,79 мкм; значения показателя вязкости варьируют в диапазоне от $(2,85 \pm 0,13)$ до $(1,99 \pm 0,12)$ Па/с, содержание амилозы – от $(14,3 \pm 0,5)$ % до $(9,6 \pm 0,5)$ %. Среди оцениваемых сортов для извлечения крахмала выделен картофель сорта Ред Скарлетт (ранний, универсальный, высокоурожайный, крахмалистость 17,4 %, сохраняемость на уровне 96–98 %).

3. По результатам исходных данных оценки функционально-технологических свойств выделенных крахмалов установлены направления корректировки фракционного состава крахмальных зерен, ориентированной на увеличение амилозной фракции и, как следствие, жиро- и водопоглощения,

а также показателя вязкости за счет улучшения структурных характеристик на надмолекулярном и молекулярном уровнях с помощью низкочастотного ультразвукового воздействия. Установлено, что кавитационные эффекты низкочастотного ультразвукового воздействия при двух режимах – мощности 576 Вт/л и длительности 10 мин; мощности 400 Вт/л и длительности 10 мин – являются эффективным физическим методом модификации картофельного крахмала.

4. Целесообразность использования эффектов кавитации низкочастотного ультразвука для модификации картофельного крахмала подтверждена полученными в ходе исследований данными: увеличение размера крахмального зерна в среднем на 30 % при незначительном изменении состояния поверхности; содержание амилозы на уровне 44,4 %, что коррелирует со снижением вязкости; увеличение растворимости в 4–6 раз, а также водо- и жиропоглощения на 60 % и 130 % соответственно. Совокупность результатов указывает на формирование в модифицированной форме устойчивого крахмала типа RS2 как пребиотика, определяющего добавленную полезность пищевых систем.

5. При разработке рецептуры мясных эмульсионных фаршей согласно рекомендациям ВОЗ руководствовались исключением рисков употребления «красного» мяса и увеличением в рационах доли RS-фракции. Результаты исследования показали, что в рецептурах композиционных мясных фаршей на основе разных видов мяса использование свинины (жирной и полужирной), мяса птицы и разработанного ингредиента RS-фракции позволяет повысить значения ВСС на 21 %, ВУС на 15 %, ЖУС на 20 %, что облегчает процесс формирования мясных изделий из фарша и минимизирует потери при тепловой обработке.

6. Физиологическая ценность RS-фракции крахмала доказана с использованием методов *in vitro* и *in silico*. Установлено влияние сонохимических преобразований на увеличение доли RS-фракции в крахмале; *in vitro* доказано, что усвояемость модифицированного крахмала снижается на 50,8 % по отношению к нативному, поэтому фарши, наполненные RS, способны за счет пребиотических свойств ферментироваться микрофлорой нижних отделов кишечника как пребиотики. С использованием метода *in silico* установлены высокоспецифичные межмолекулярные взаимодействия амилозы с рецепторами антиканцерогенного и иммуномодулирующего действия, что доказывает физиологическую ценность модифицированной формы крахмала.

7. Расчет экономической эффективности показал увеличение себестоимости на 2,64 % (7 615 р.) по отношению к модифицированному крахмалу E1442. Разработана ТИ 07116724-023-2023 по производству модифицированного картофельного крахмала. Проведена промышленная апробация на мясоперерабатывающем предприятии ООО «Концерн Митмонд» (г. Челябинск).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в журналах, индексируемых в RSCI, WoS/Scopus

1. Потороко, И. Ю. Бифункциональный ингредиент для мясных эмульсий: сонохимически модифицированный картофельный крахмал / И. Ю. Потороко, **А. А. Руськина**, А. В. Малинин [и др.]. – DOI 10.37861/2618-8252-2023-12-38-42 // Мясная индустрия. – 2023. – № 12. – С. 38–42.
2. Potoroko, I. Y. Modeling of potato convenience of exposure effects of ultrasound / I. Y. Potoroko, **A. A. Ruskina**. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.697 // Solid State Phenomena. – 2016. – Vol. 870. – P. 697–702.
3. Kalinina, I. V. The application of ultrasound for the regulation of the starch gel viscosity / I. V. Kalinina, **A. A. Ruskina**, R. I. Fatkullin [et al.] // Bulgarian Journal of Agricultural Science. – 2020. – Vol. 26, № 3. – P. 690–695.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

4. **Руськина, А. А.** Анализ современных способов модификации крахмала как инструмента повышения его технологических свойств / А. А. Руськина, Н. В. Попова, Н. В. Науменко, Д. В. Руськин. – DOI 10.14529/food170302 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2017. – Т. 5, № 3. – С. 12–20.
5. Потороко, И. Ю. Научные подходы в обеспечении качества и безопасности плодов и овощей в процессе хранения. Мировой опыт. Часть 1 / И. Ю. Потороко, И. В. Калинина, **А. А. Руськина**. – DOI 10.14529/food170102 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2017. – Т. 5, № 1. – С. 14–18.
6. Потороко, И. Ю. Влияние эффектов ультразвука на свойства биodeградируемого полимера на основе картофельного крахмала / И. Ю. Потороко, А. В. Цатуров, А. В. Малинин, **А. А. Руськина** [и др.]. – DOI 10.14529/food190410 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2019. – Т. 7, № 4. – С. 94–103.
7. **Руськина, А. А.** Влияние эффектов ультразвука на реологические свойства клейстеров картофельного крахмала / А. А. Руськина, И. Ю. Потороко, А. В. Малинин, А. В. Цатуров. – DOI 10.14529/food190110 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 89–96.
8. **Руськина, А. А.** Влияние ультразвуковой модификации картофельного крахмала на его функционально-структурные свойства и дисперсный состав / А. А. Руськина, И. В. Калинина, Н. В. Попова [и др.]. – DOI 10.20914/2310-1202-2020-3-176-182 // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 82, № 3 (85). – С. 176–182.
9. **Руськина, А. А.** Сонохимически модифицированный крахмал в технологии жележных кондитерских изделий / А. А. Руськина, И. В. Калинина, Н. В. Попова [и др.]. – DOI 10.14529/food210302 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 14–22.
10. **Руськина, А. А.** Возможности трансформации фракций нативного крахмала для получения сырьевых ингредиентов целевого назначения / А. А. Русь-

кина, И. Ю. Потороко. – DOI 10.14529/food220301 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2022. – Т. 10, № 3. – С. 5–12.

11. **Руськина, А. А.** Технология синтеза резистентного крахмала, применимого для эмульсионных систем, на основе ультразвуковой кавитации / А. А. Руськина, И. Ю. Потороко. – DOI 10.14529/food230205 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2023. – Т. 11, № 2. – С. 41–48.

12. Потороко, И. Ю. Молекулярный докинг растительных стабилизирующих частиц для функциональных эмульсионных пищевых систем / И. Ю. Потороко, А. М. Я. Кади, В. Анйум, **А. А. Руськина**. – DOI 10.29141/2500-1922-2023-8-2-9 // Индустрия питания. – 2023. – Т. 8, № 2. – С. 84–92.

13. Потороко, И. Ю. Методология трехфакторного ультразвукового воздействия для стабильности эмульсионных пищевых систем с добавленной пользой / И. Ю. Потороко, А. М. Я. Кади, **А. А. Руськина**, А. В. Малинин. – DOI 10.14529/food230407 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2023. – Т. 11, № 4. – С. 65–73.

14. Потороко, И. Ю. Фортификация эмульсий, стабилизированных аутентичным биоактивным комплексом, в сложную гетерогенную пищевую матрицу / И. Ю. Потороко, А. М. Я. Кади, **А. А. Руськина** [и др.]. – DOI 10.29141/2500-1922-2023-8-4-12 // Индустрия питания. – 2023. – Т. 8, № 4. – С. 119–127.

15. **Руськина, А. А.** Пищевые системы для персонифицированных замещающих технологий сохранения здоровья / А. А. Руськина, А. В. Астаева, И. Ю. Потороко, А. В. Штрахова. – DOI 10.14529/food240108 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 68–75.

Прочие публикации

16. Потороко, И. Ю. Разработка технологии модификации крахмала. Часть 1: Ультразвуковое воздействие в охлаждающей системе / И. Ю. Потороко, А. В. Малинин, **А. А. Руськина** [и др.]. – DOI 10.14529/food180411 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2018. – Т. 6, № 4. – С. 83–92.

17. **Руськина, А. А.** Модификация крахмала с помощью ультразвукового воздействия как инструмент изменения его технологических характеристик / А. А. Руськина, Н. В. Попова, Д. В. Руськин. – DOI 10.14529/food180108 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 69–76.

18. Потороко, И. Ю. Кавитационные эффекты ультразвука как инструмент регулирования функционально-технологических свойств растительных полисахаридов / И. Ю. Потороко, **А. А. Руськина**, А. М. Я. Кади, А. В. Паймулина // Актуальные проблемы экологии и природопользования : сб. ст. по материалам VII Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. (Курган, 20 апр. 2023 г.). – Курган : КГУ, 2023. – С. 195–198.

19. **Руськина, А. А.** Применение ультразвукового воздействия технологии резистентного крахмала / А. А. Руськина, И. Ю. Потороко // Наука ЮУрГУ. Секции естественных наук : материалы 75-й науч. конф. (Челябинск, 11–12 апр. 2023 г.). – Челябинск : ЮУрГУ, 2023. – С. 28–32.

20. **Руськина, А. А.** Сонохимическая трансформация функционально-технологических свойств крахмалов / А. А. Руськина, И. Ю. Потороко // Современные материалы и методы решения экологических проблем постиндустриальной агломерации : сб. материалов I Всерос. науч.-практ. конф. (Челябинск, 12–14 дек. 2023 г.). – Челябинск : ЮУрГУ, 2024. – С. 147–149.

Результаты интеллектуальной деятельности

21. Патент № 2708557 Российская Федерация, МПК C08B 30/12. Способ производства модифицированного крахмала : № 2019110493 : заявл. 08.04.2019 : опубл. 09.12.2019 / **А. А. Руськина**, И. Ю. Потороко, А. В. Малинин [и др.] ; заявитель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

22. Патент № 2810087 Российская Федерация, МПК C08B 30/00. Способ получения высокоамилозного картофельного крахмала : № 2023124779 : заявл. 27.09.2023 : опубл. 21.12.2023 / **А. А. Руськина**, И. Ю. Потороко ; заявитель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Список сокращений и условных обозначений

- ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения.
- ВСС – влагосвязывающая способность.
- ВУС – влагоудерживающая способность.
- ЖКТ – желудочно-кишечный тракт.
- ЖУС – жирудерживающая способность.
- КЭУЗ – кавитационные эффекты ультразвука.
- МКК – модификация крахмала картофельного.
- НКК – нативный картофельный крахмал.
- СЭМ – сканирующая электронная микроскопия.
- ФТС – функционально-технологические свойства.

Подписано в печать 02.07.2024.
Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная. Печать плоская.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета в подразделении оперативной полиграфии
Уральского государственного экономического университета
620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45