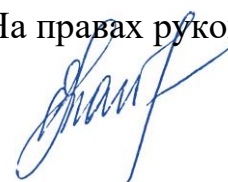


На правах рукописи



Нагорных Елена Михайловна

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАДАННЫХ СВОЙСТВ
ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ
ПЛАВЛЕННЫХ ПАСТООБРАЗНЫХ СЫРОВ**

4.3.3. Пищевые системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2026

Диссертационная работа выполнена на кафедре технологии продуктов питания
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет
им. И. И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Мусина Ольга Николаевна (Россия),
профессор кафедры технологии продуктов питания
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им. И. И. Ползунова»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Красуля Ольга Николаевна (Россия),
профессор кафедры технологии хранения
и переработки продуктов животноводства
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА имени
К. А. Тимирязева»

доктор технических наук, доцент
Ивкова Ирина Александровна (Россия),
профессор кафедры ветеринарно-санитарной
экспертизы продуктов животноводства и гигиены
сельскохозяйственных животных
ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный
университет имени П. А. Столыпина»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Орловский государственный
университет имени И. С. Тургенева», г. Орел

Защита диссертации состоится 26 сентября 2026 г. в 13:30 на заседании
диссертационного совета 24.2.425.03, созданного на базе 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.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

 Л. А. Донскова

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Указом Президента России от 21.01.2020 № 20 утверждена Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации на период 2020–2030 гг. Важный этап реализации Доктрины – разработка новых продуктов питания улучшенного качества, в том числе функциональных и обогащенных. Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации (указ Президента России от 28.02.2024 № 145) определены актуальные приоритеты научно-технологического развития страны, позволяющие создать отечественные наукоемкие технологии и обеспечивающие «эффективную переработку сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания; переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении технологий машинного обучения и искусственного интеллекта». Прогнозирование заданных свойств пищевых систем – важная задача, эффективность решения которой в значительной степени зависит от используемого инструментария, самым современным из которого являются нейросетевые технологии и искусственный интеллект.

Разработка отечественного цифрового инструментария (баз данных, компьютерных программ, нейросетей) для создания инновационной пищевой продукции особенно актуальна на базе продуктов, входящих в повседневный рацион и пользующихся спросом у потребителей, таких как плавленый сыр – его технология позволяет эффективно управлять составом путем введения различных ингредиентов, относительно низкая стоимость плавленого сыра делает его доступным источником нутриентов для всех групп населения.

Таким образом, разработка и демонстрация эффективности цифровых технологий для прогнозирования свойств пищевых систем на примере плавленого сыра представляют собой актуальное и перспективное направление.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы моделирования свойств пищевых систем, в том числе с использованием соответствующего цифрового инструментария, нейросетевых технологий, машинного обучения и других возможностей искусственного интеллекта, активно занимают российские и зарубежные ученые: А. А. Борисенко, Н. И. Дунченко, И. А. Евдокимов, Л. А. Забодалова, Ю. А. Ивашкин, О. Н. Красуля, А. Б. Лисицин, М. А. Никитина, Е. Д. Рожнов, В. В. Садовой, В. К. Семипятный, М. Н. Школьников, С. Б. Юдина, P. Freire, G. K. Goyal, S. Goyal, A. Kaczmarek, C. C. Lison и др. Большой теоретический и практический вклад в развитие технологии поликомпонентных молочных продуктов, в том числе плавленых сыров, внесли Н. Б. Гаврилова, С. В. Гудков, З. Х. Диланян, А. В. Дунаев, Н. П. Захарова, Т. Н. Иванова, И. А. Ивкова, В. В. Калабушкин, Т. М. Коновалова, О. В. Лепилкина, Е. А. Молибога, Е. А. Орлова, Т. А. Остроумова, В. М. Позняковский, В. Ф. Роздова, Ю. Я. Свириденко, А. П. Симоненкова, Н. Ю. Соколова, Р. Т. Тимакова, О. С. Чеченихина, R. F. Fox, T. P. Guinee, D. Kannar, R. Kapoor, P. L. H. McSweeney, L. E. Metzger, C. Selomulya, G. Talbot-Walsh, A. Y. Tamime, P. Upreti и др. Несмотря на значительный вклад российских

и зарубежных ученых в развитие научного направления, остается неизученной возможность использования цифрового инструментария и нейросетевых технологий для прогнозирования заданных свойств пищевых систем.

Анализ научно-технической и патентной литературы свидетельствует об актуальности избранной темы, в связи с чем сформулирована **цель работы** – разработка и валидация информационной системы и нейросетевой модели для прогнозирования органолептических свойств плавленых пастообразных сыров при проектировании их рецептур.

Цель диссертационной работы направлена на решение важной государственной задачи по созданию безопасных и качественных продуктов питания путем совершенствования рецептур с использованием передовых технологий проектирования высокотехнологичной продукции, основанных на применении технологий машинного обучения и искусственного интеллекта, что соответствует приоритетам, указанным в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (п. 21, подп. «а» и «г»).

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1) провести аналитический обзор российского и зарубежного опыта применения цифровых инструментов (баз данных, нейросетей) в сыроделии и пищевой промышленности;

2) разработать информационную систему «Рецептуры плавленых сыров» (базу данных более чем на 800 рецептур и программу управления), обеспечивающую поиск, фильтрацию и замену ингредиентов;

3) разработать и обучить нейросеть «Пищевые системы» для прогнозирования органолептической оценки рецептур, определить параметры машинного обучения (достоверность прогноза нейросети не ниже 80 %), провести валидацию на модельной линейке плавленых сыров;

4) выбрать на основе предиктивной аналитики нейросети «Пищевые системы» перспективную рецептуру плавленого пастообразного сыра и оптимизировать ее методами математического моделирования;

5) провести комплексную оценку свойств разработанного сыра «Сырте», установить срок годности, утвердить нормативную документацию и апробировать в промышленных условиях предложенные решения.

Научная новизна. Диссертационная работа содержит элементы научной новизны в рамках п. 5, 15, 19 Паспорта научной специальности 4.3.3.

1. Впервые предложен и реализован комплексный цифровой инструментарий для проектирования пищевых систем, включающий информационную систему «Рецептуры плавленых сыров» (база данных на 869 рецептур с открытой архитектурой и программа управления), обеспечивающую поиск, фильтрацию по заданным критериям и автоматизированную замену ингредиентов (п. 5, 19 паспорта).

2. Разработана, обучена и валидирована нейросетевая модель «Пищевые системы» для прогнозирования органолептической оценки рецептур с достоверностью не менее 80 %, проведена оценка робастности цифрового инструмента в условиях неопределенности и доказана эффективность ра-

боты нейросети на примере модельной линейки из 14 плавленых пастообразных сыров (п. 19 паспорта).

3. Впервые установлено влияние гидролизованного коллагена на свойства плавленого пастообразного сыра: аминокислотный профиль (появление гидроксипролина, увеличение глицина на 128,6 %, пролина на 18,4 %); микроструктуру (уменьшение среднего размера жировых глобул на 44 %, снижение пористости белковой матрицы на 20 %) и реологические характеристики (увеличение вязкости на 40 %, сопротивления деформации на 48 % при сохранении пластичности). Предложен механизм действия коллагена как многофункционального модификатора структуры плавленого пастообразного сыра, обеспечивающего формирование гибридной казеин-коллагеновой матрицы, стабилизацию жировой эмульсии и равномерное распределение водной фазы (п. 15 паспорта).

Новизна технических решений подтверждена свидетельствами о государственной регистрации базы данных и двух программ для ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

- компоненты информационной системы «Рецептуры плавленых сыров» (логическая и физическая модели базы данных, программа управления) обеспечивающие автоматизированный поиск, фильтрацию рецептов по заданным критериям и интеллектуальную замену ингредиентов;
- параметры машинного обучения нейросети «Пищевые системы», обеспечивающие стабильность модели и высокую достоверность прогноза;
- результаты оценки эффективности работы нейросети «Пищевые системы»;
- обоснование использования в составе плавленых сыров гидролизованного коллагена как многофункционального компонента, улучшающего микроструктуру, реологические свойства продукта и его аминокислотный профиль;
- состав и соотношение компонентов плавленого сыра с гидролизированным коллагеном, пшеничными отрубями и лецитином подсолнечника.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость заключается в расширении и систематизации знаний об использовании цифровых инструментов для сбора, обработки, анализа данных о пищевых системах, прогнозирования их свойств и повышения эффективности работы с рецептурным портфелем в пищевой промышленности. Дано научное обоснование механизма действия гидролизованного коллагена как многофункционального модификатора свойств плавленых пастообразных сыров, подтвержденное экспериментально.

Практическая значимость. Материалы исследований использованы при разработке технологии и рецептуры плавленого пастообразного сыра «Сырте» с гидролизированным коллагеном, пшеничными отрубями, лецитином подсолнечника, утвержден комплект нормативной документации (СТО 02067824-006-2023 и технологическая инструкция к СТО). Предложена линейка рецептов (14 наименований) на базе сыра «Сырте». Сформулированы

практические рекомендации по использованию гидролизованного коллагена в составе плавленых сыров. Технология сыра «Сырте» (СТО 02067824-006-2023) апробирована в производственных условиях и внедрена в промышленное производство на базе ООО «Сибирское подворье» (г. Барнаул, Алтайский край, Российская Федерация).

Разработан цифровой инструментарий, включающий в себя нейросетевую модель «Пищевые системы» (№ 2023684297), информационную систему «Рецептуры плавленых сыров», включающую «Программу для управления электронным справочником рецептов плавленых сыров» (№ 2023618007) и базу данных «Рецептуры плавленых сыров» (№ 2023620806). Цифровые инструменты внедрены в работу ЦКИ «АлтайБиоЛакт», Испытательного центра пищевых продуктов инжинирингового центра «ХимБиоМаш» АлтГТУ.

Материалы исследований и разработанный цифровой инструментарий используются в учебном процессе при подготовке обучающихся по направлениям 19.03.03, 19.04.03, 19.04.04, 19.06.01 Института биотехнологии, пищевой и химической инженерии АлтГТУ.

Отдельные результаты диссертационной работы получены на различных этапах научно-исследовательских проектов: № НИОКТР 122012700036-4 (2020–2023 гг.); № НИОКТР 124013000666-5 (2024–2026 гг.).

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность подтверждается выбором современных методов анализа, проведением исследований на поверенном оборудовании, промышленной апробацией, использованием методов статистической обработки данных. Основные положения работы доложены и обсуждены на конференциях международного и всероссийского уровня (Улаанбаатар, 2023; Семей, 2022; Павлодар, 2023; Краснообск, 2021; Барнаул, 2022, 2023; Новосибирск, 2022; Бийск, 2023; Красноярск, 2022; Кемерово, 2023; Казань, 2023; Оренбург, 2023; Курск, 2026).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 26 работах, в числе которых семь статей в журналах из Перечня ВАК; две статьи в изданиях, индексируемых в Scopus; 14 статей в сборниках конференций; одна база данных и две программы для ЭВМ.

Личное участие автора на всех стадиях работы состояло в постановке цели и задач исследований, выполнении экспериментов, статистической обработке результатов, разработке цифрового инструментария для достижения поставленной цели, формулировании заключения и выводов, проведении апробации результатов исследований, подготовке публикаций на основе полученных данных. Представленная работа является обобщением научных исследований, проведенных с 2021 по 2026 г. лично автором или при его непосредственном участии на всех этапах выполнения диссертации.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы являются труды отечественных и зарубежных ученых в области технологии плавленых сыров, в том числе функциональных и обогащенных, а также по вопросам применения нейросетевых технологий в пищевой отрасли. Для решения поставленных задач применялись стандартные и специ-

альные методы (анализ, синтез, обобщение, биохимические, физико-химические, реологические, хроматографические, микробиологические и органолептические методы исследований, математическое моделирование, методы математической статистики). В процессе разработки информационной системы и обучения нейросети использованы следующие методы: методы машинного обучения, методы извлечения и анализа данных, включая методы системного анализа, методы аналитической обработки информации, методы объектно-ориентированного программирования, методы оптимизации; аппарат нечеткой логики, инструменты и методы программной инженерии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения и четырех глав, в том числе аналитического обзора литературы, методологической части, результатов собственных исследований и их анализа, заключения, списка литературы, приложений. Основной текст изложен на 197 страницах, содержит 25 таблиц и 49 рисунков; список литературы включает 290 наименований, в том числе 95 на иностранных языках.

Основное содержание работы

Глава 1. Аналитический обзор научно-технической литературы и патентной информации. Проанализированы отраслевые отечественные цифровые инструменты, изучен мировой опыт применения нейросетевых технологий в пищевой промышленности, дана оценка перспективности использования лецитина, коллагена и отрубей в составе плавленных сыров. На основе аналитического обзора показана актуальность исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Глава 2. Методология и организация исследования. Исследования проводились в течение 2021–2026 гг. в лабораториях кафедры технологии продуктов питания, Сибирского НИИ сыроделия и АО «Барнаульский молочный комбинат». Часть результатов получена при выполнении НИР № 122012700036-4, № 124013000666-5. Апробация технологических результатов исследования проведена в промышленных условиях ООО «Сибирское подворье» (г. Барнаул, Россия).

Объекты исследования: модельные пищевые системы для плавления, включающие дополнительные ингредиенты (далее – наполнители); плавленные пастообразные сыры экспериментально-лабораторного производства (опытные образцы, контроль – по рецептуре из Сборника технологических инструкций по производству плавленных сыров); для наполнения информационной системы (ИС) использовались рецептуры из сборников технологических инструкций по производству плавленных сыров, публикаций, индексированных в международных базах научного цитирования, диссертаций, размещенных в Российской государственной библиотеке, рецензируемых научных и учебных изданий.

При проведении экспериментов применяли комплекс общенаучных и специальных методов исследования. В процессе создания ИС и обучения

нейросети использованы методы машинного обучения, методы извлечения и анализа данных; аппарат нечеткой логики, инструменты и методы программной инженерии.

Исследования проводили в 3–5-кратной повторности, полученные данные обрабатывали методами математической статистики. Математические модели в работе получены методом полного факторного эксперимента.

Общая схема проведения исследования приведена на рисунке 1.

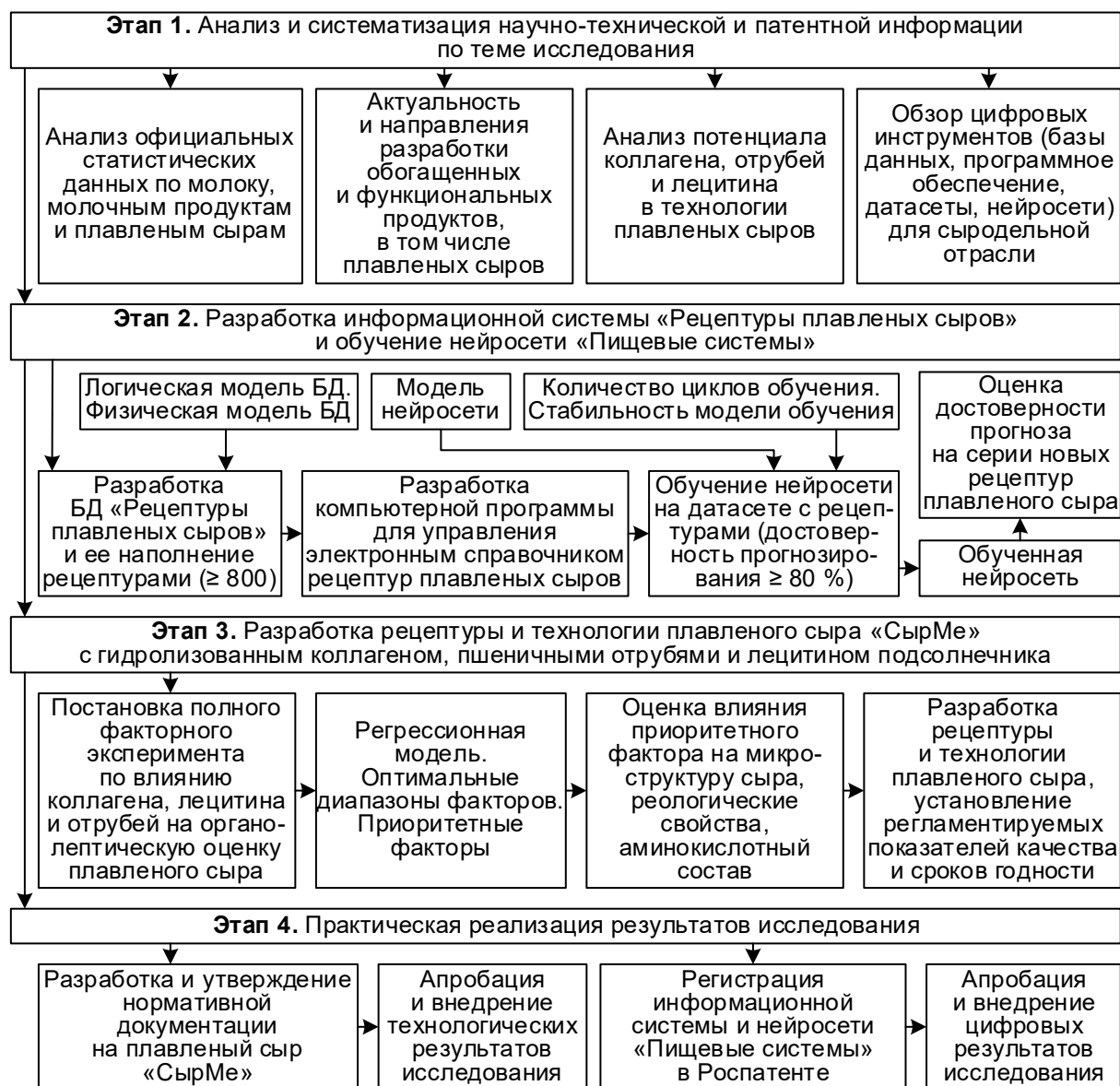


Рисунок 1 – Схема проведения исследования

На первом этапе выполнен аналитический обзор отечественных и зарубежных источников информации по теме исследования.

На втором этапе разработана ИС «Рецептуры плавленых сыров», включающая базу данных (БД) и компьютерную программу, разработана и обучена нейросеть «Пищевые системы», проведена ее валидация на линейке новых рецептов плавленых сыров.

На третьем этапе изучена рецептура плавленого сыра с наполнителями, выбранная на основе предиктивной аналитики нейросети «Пищевые системы». Смоделировано влияние дозировки наполнителей на органолептическую оценку плавленого сыра, определены приоритетные факторы регрессионной модели и их оптимальные диапазоны, установлено влияние гидролизованного коллагена (ГК) на аминокислотный состав, микроструктуру и реологические свойства плавленого сыра, разработана рецептура и технология сыра «Сырте» с ГК, пшеничными отрубями и лецитином подсолнечника, оценены потребительские свойства нового сыра, установлены регламентируемые показатели качества и обоснован срок годности.

На заключительном этапе разработана и утверждена нормативная документация на плавленый пастообразный сыр «Сырте», проведена ее апробация и внедрение в производственных условиях, цифровой инструментарий зарегистрирован, апробирован и внедрен.

Глава 3. Разработка ИС «Рецептуры плавленых сыров» и нейросетевой модели «Пищевые системы». В разработанную ИС входят два компонента: БД «Рецептуры плавленых сыров» (869 рецептов) и «Программа для управления электронным справочником рецептов плавленых сыров» (рисунки 2). ИС позволяет отбирать рецепты по различным критериям и их сочетаниям, в том числе по показателям пищевой ценности, предлагать замену сырья на основе химического состава ингредиентов. Логическая и физическая модели позволяют адаптировать ИС «Рецептуры плавленых сыров» к рецептурам любых пищевых систем.

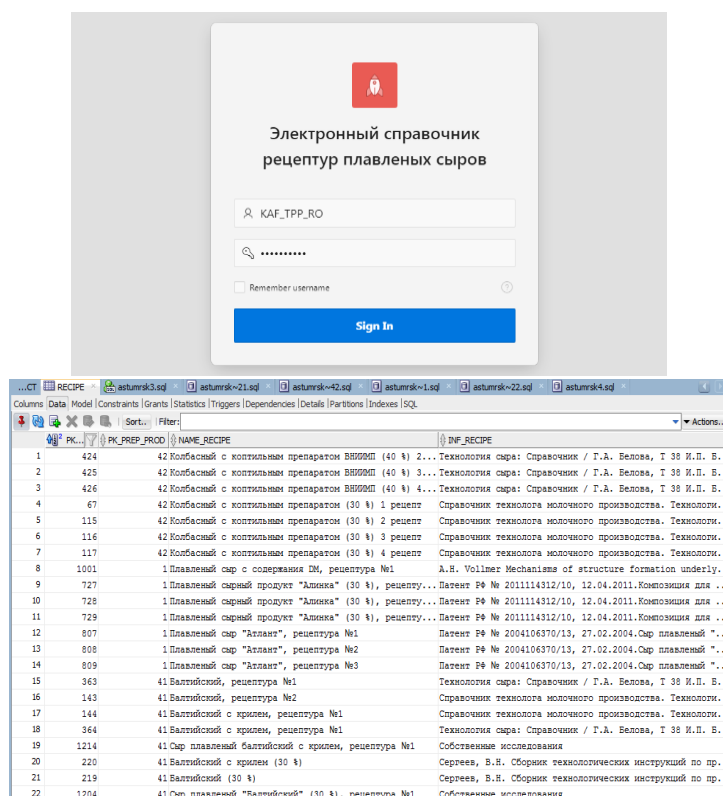


Рисунок 2 – ИС «Рецептуры плавленых сыров»

Разработана нейросетевая модель «Пищевые системы» и обучена на наборе данных (рецептурах) ИС по алгоритму, показанному на рисунке 3.

Нейросеть состоит из входного слоя на 8 нейронов, 2 скрытых слоев по 64 нейрона и выходного слоя из 1 нейрона. Входной слой – значения столбцов рецептур: массовая доля (м. д.) жира, белков, влаги, жира в сухом веществе, органических кислот, сахарозы, пищевой соли, сухого вещества; выходной слой (целевая переменная) – условный показатель QUALITY. Показатель QUALITY (прогнозный индекс) – это нормализованная цифровая модель органолептической оценки, адаптированная для машинного обучения и принимающая значение от 0 до 10 условных единиц (шкала обусловлена требованиями устойчивости обучения нейросети). QUALITY – инструмент предиктивной аналитики (прогнозирования оценки органолептических свойств сыра), позволяет отсеять заведомо неудачные рецептуры до проведения натуральных экспериментов. Прогноз сужает область поиска среди множества возможных рецептур и позволяет сократить количество пробных варок в 5–10 раз.

Для дальнейшего обучения нейросети обоснован выбор сочетания функции активации (среди linear; sigmoid; tanh; ReLu) и алгоритма-оптимизатора (среди SGD; RMSProp; Adam) на основе минимизации средней абсолютной ошибки (MAE) выборки. В эксперименте установлено, что наиболее эффективно нейросеть «Пищевые системы» будет обучаться по модели «с учителем» и использованием функции активации ReLu в сочетании с алгоритмом-оптимизатором Adam (рисунок 4).

Для доказательства стабильности модели обученной нейросети «Пищевые системы» реализовано 5 000 эпох обучения, до 40-й эпохи наблюдается значительный разброс в MAE выборок, при дальнейшем обучении MAE выходит на плато (рисунок 5). MAE проверочной выборки на уровне не более 20 % позволят обеспечить следующие параметры: количество циклов обучения – не менее 40, количество батчей – 10, количество итераций – 10 % от исходного набора данных.

На наборе данных ИС «Рецептуры плавленых сыров» проведено обучение нейросети «Пищевые системы» (количество циклов обучения 100 – коэффициент резерва 2,5, количество пакетов – 10, количество итераций – 87). Установлено, что после 100 циклов MAE стремится к нулю, предложенные параметры обучения стабильны.

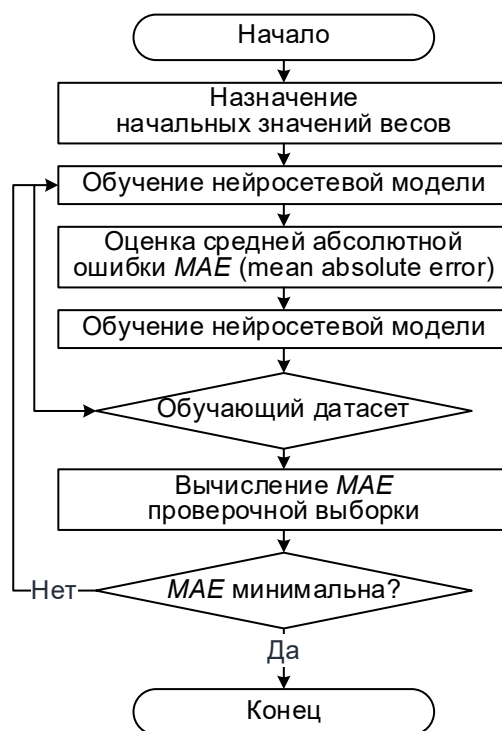


Рисунок 3 – Алгоритм обучения нейросети



Рисунок 4 – Обоснование выбора сочетания функции активации и алгоритма-оптимизатора

11

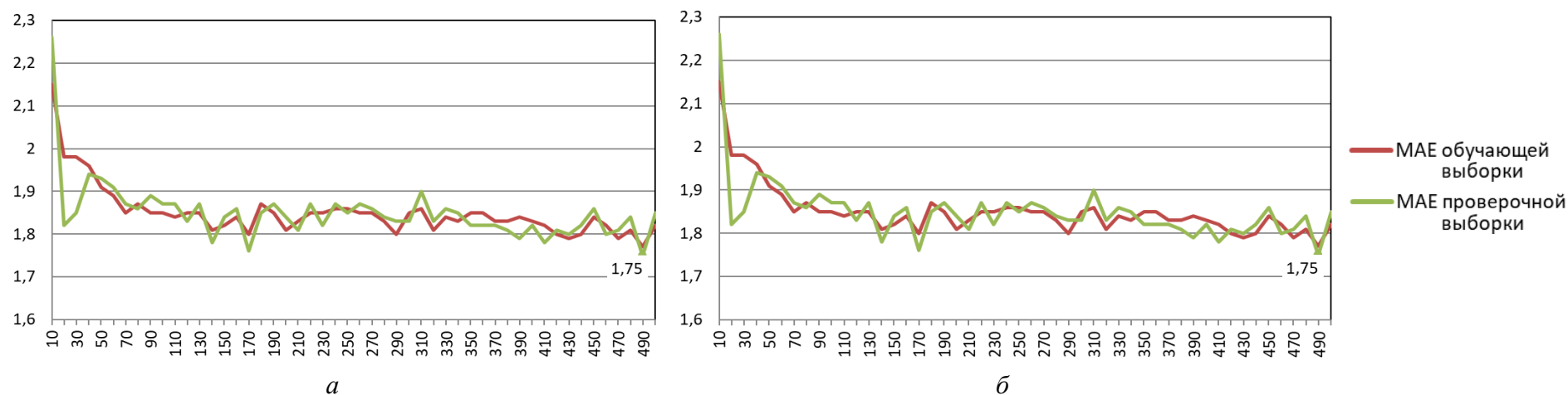


Рисунок 5 – Зависимость MAE обучающей и проверочной выборок от количества эпох обучения: а – 10–500; б – 500–5000

Установлено, что объем выборки, необходимой для работы нейросети с требуемой достоверностью, составляет не менее 200 рецептов. Повысить достоверность прогноза на 13,24 % (с 67,1 % до 80,34 %) позволило разделение рецептов по группам сыров (повышение однородности выборки).

Далее проведена валидация прогнозной способности обученной нейросети через натурный эксперимент на модельных рецептурах: прогноз нейросети → натурный эксперимент с пробной варкой → дегустация → сравнение оценок по прогнозу и по факту. Для стресс-тестирования нейросети смоделирована линейка из 14 вариантов рецептов с целенаправленной диверсификацией наполнителей за пределами обучающей выборки: с минорным внесением ГК, лецитина, пшеничных отрубей, а также с наполнителями из разных групп сырья – зерновые (отруби пшеничные, овсяные, ростки ячменя), плодово-ягодные (манго, клубника, ирга), овощные (томаты), мед, какао, бетулин. Новые рецепты внесены в ИС «Рецептуры плавленых сыров». Проведена выработка образцов плавленых сыров из новой линейки и их органолептическая оценка с участием экспертов дегустационной комиссии Сибирского НИИ сыроделия (обобщенная оценка по 30-балльной шкале дана на рисунке 6), внешний вид некоторых образцов представлен на рисунке 7.

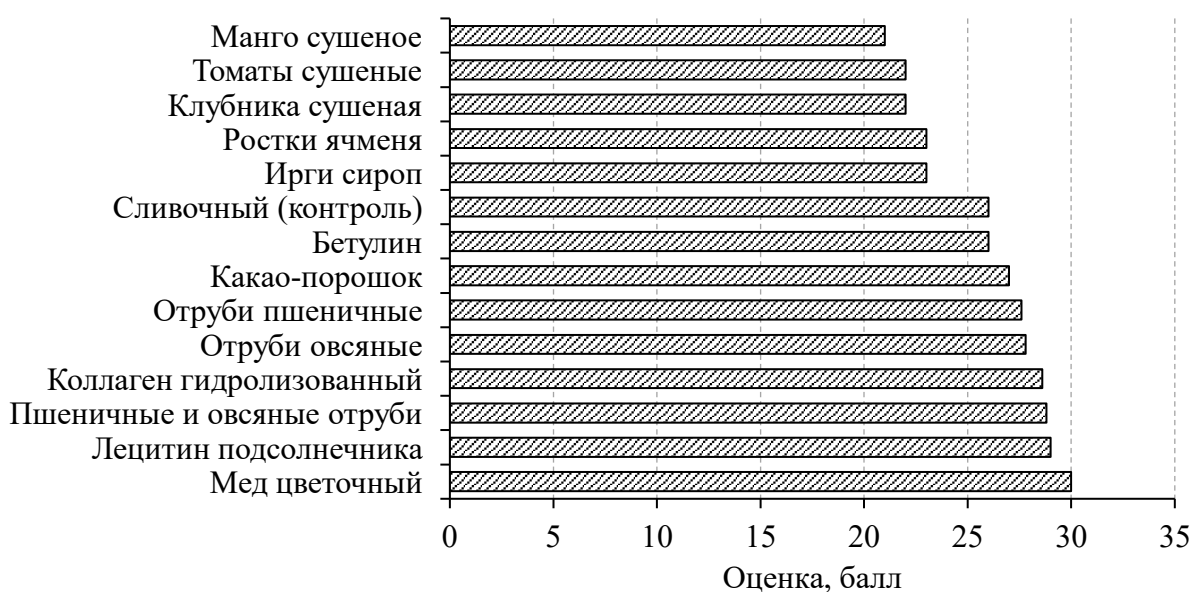


Рисунок 6 – Органолептическая оценка линейки плавленых сыров

Анализ новых рецептов с помощью нейросети «Пищевые системы» подтвердил эффективность обучения: достоверность прогноза QUALITY составила от 86,31 % до 97,33 %. Установлена высокая сходимость прогнозных и эмпирических данных органолептической оценки новых рецептов (рисунок 8). Средняя теоретическая ошибка прогноза QUALITY, по данным нейросети, составляет 7,18 %. Средняя фактическая ошибка прогноза, полученная при сравнении прогноза показателя QUALITY и его значения при пробных варках сыров, составляет 5,3 %, что подтверждает высокую робастность нейросети в условиях неопределенности.



Рисунок 7 – Внешний вид сыров, выработанных по модельным рецептурам

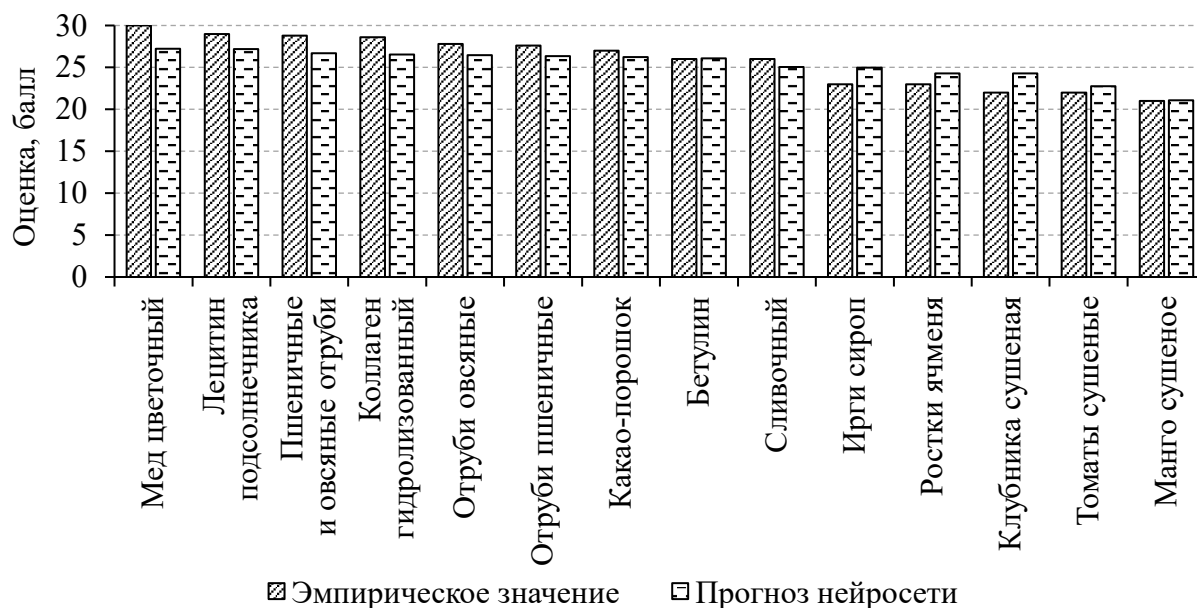


Рисунок 8 – Сходимость прогнозных и эмпирических данных органолептической оценки рецептур

Цифровые инструменты зарегистрированы (№ 2023684297, № 2023618007, № 2023620806), проведены их практическая апробация и внедрение.

Глава 4. Разработка рецептур и технологии плавленого пастообразного сыра «Сырте» с ГК, лецитином подсолнечника и пшеничными отрубями. Для апробации разработанных цифровых инструментов среди смоделированных рецептур линейки плавленых сыров выбраны перспективные наполнители на основе результатов предиктивной аналитики нейросети

«Пищевые системы». В зону высоких баллов органолептической оценки устойчиво попадают варианты с ГК, лецитином подсолнечника и отрубями пшеничными. Выбор ГК также обусловлен его аминокислотным составом: содержит глицин, гидроксипролин и пролин, гистидин, аланин, глютаминовую и аспарагиновую кислоты, серин, валин, причем глицин и пролин составляют соответственно 25,2 % и 15,2 % от общего пула аминокислот.

Методом полного трехфакторного эксперимента получена математическая модель, позволяющая оптимизировать рецептуру плавленого пастообразного сыра и оценить значимость факторов (дозировка наполнителей) и их влияние на отклик. Уровни факторов (отруби, лецитин) определены на основе анализа литературных данных, коллагена – с учетом предварительных пробных варок сыра. Модель в натуральных значениях факторов:

$$Y = 24,4 + 2,60x_1 + 1,72x_2 + 1,12x_3 - 0,64x_1^2 - 0,51x_2^2 - 0,80x_3^2, \quad (1)$$

где Y – органолептическая оценка плавленого сыра, балл; x_1 – дозировка ГК, %; x_2 – дозировка лецитина подсолнечника, %; x_3 – дозировка пшеничных отрубей, %.

Установлены оптимальные диапазоны внесения наполнителей в состав плавленого сыра: $x_1 \in [3,0 \text{ \%}; 3,5 \text{ \%}]$; $x_2 \in [2,5 \text{ \%}; 3,0 \text{ \%}]$; $x_3 \in [1,0 \text{ \%}; 1,5 \text{ \%}]$.

Поскольку приоритетное влияние на отклик оказывает ГК, изучено его селективное влияние на аминокислотный состав, микроструктуру и реологические свойства плавленого пастообразного сыра.

Внесение ГК изменяет аминокислотный профиль плавленого сыра (рисунки 9): в образце с ГК возросло содержание аспарагиновой кислоты, гидроксипролина, глютаминовой кислоты, серина, глицина, гистидина, аланина и пролина; содержание аргинина и тирозина не изменилось, а триптофана и цистина с цистеином – снизилось.

Добавление ГК в опытный образец сыра привело к появлению гидроксипролина (180 мг/100 г), который отсутствовал в контрольном образце. Наиболее значительное увеличение содержания в опытном образце сыра отмечено для глицина (на 128,6 %), гистидина (на 24,3 %), аланина (на 19,6 %), пролина (на 18,4 %) и глютаминовой кислоты (на 12,3 %). Введение ГК привело к снижению сора по большинству незаменимых аминокислот, но все они превышают 100 %, за исключением суммы метионина и цистина (ГК беден серосодержащими аминокислотами). Добавление ГК снизило содержание незаменимых аминокислот (на 8,3 %), но увеличило содержание заменимых (на 14,7 %). При этом общее количество аминокислот возросло на 3,2 %. Соотношение заменимых и незаменимых аминокислот в контрольном образце составило 1,01:1, в опытном – 1,26:1 (рекомендуемый физиологический оптимум 2–2,5:1). В контексте рациона смешанного питания такое изменение баланса благоприятно, так как рацион современного человека зачастую избыточен по незаменимым аминокислотам, а сыр не рассматривается как единственный источник белка в рационе.

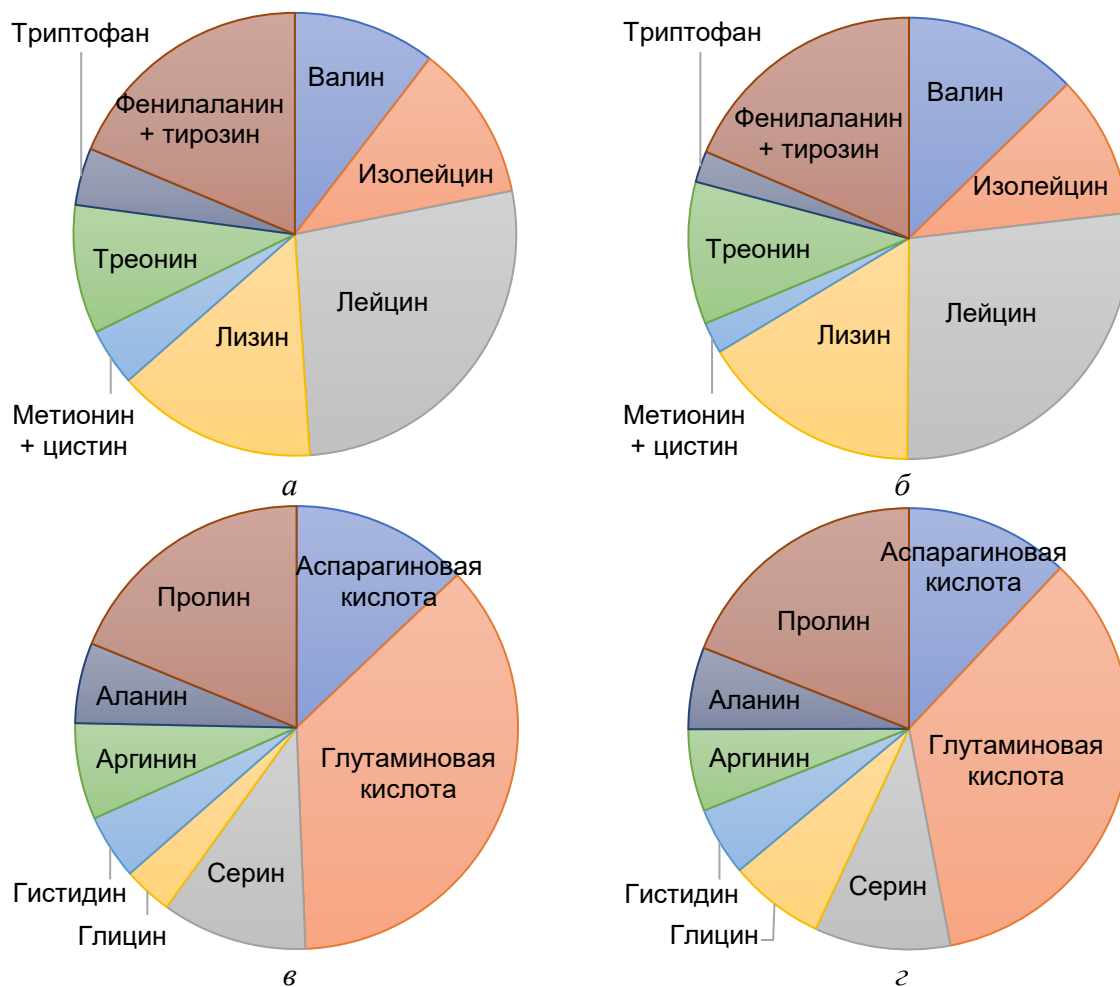


Рисунок 9 – Аминокислотный профиль образцов плавленого сыров, г/100 г:
 а – незаменимые аминокислоты (контроль); б – незаменимые аминокислоты (опыт);
 в – заменимые аминокислоты (контроль); г – заменимые аминокислоты (опыт)

Микроструктурные исследования показали, что в образце сыра с ГК белковая матрица плотная и непрерывная, водная фаза распределена однородно (рисунок 10).

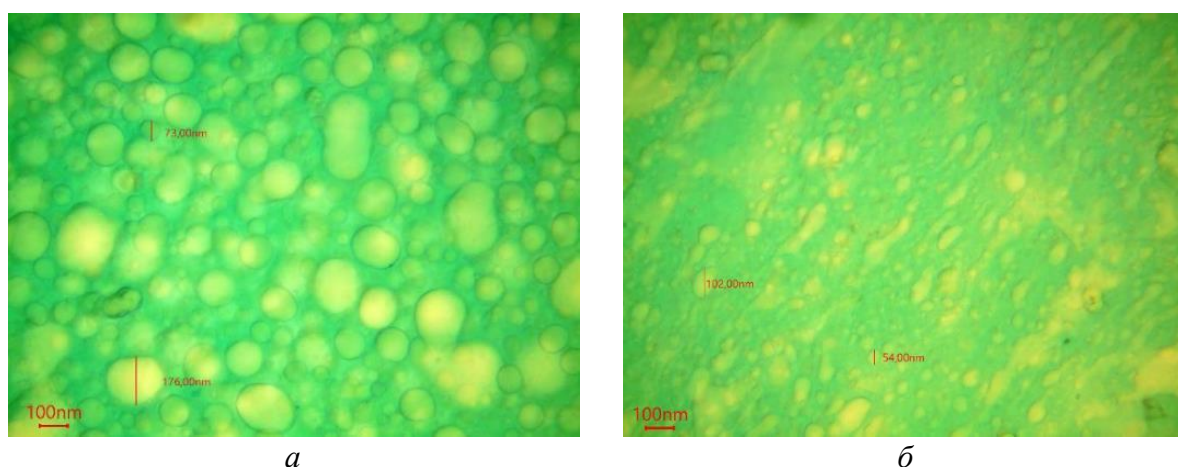


Рисунок 10 – Микроструктура плавленого пастообразного сыра (увеличение $\times 1270$): а – контроль; б – с коллагеном

Жировые глобулы в контрольном образце крупные (12–97 мкм) и неравномерно распределены, есть коалесценция. В образце сыра с ГК жировые глобулы мельче (6–29 мкм) и равномерно распределены в белковой матрице, слипание капель жира единичное. ГК не оказывает прямого влияния на жир в продукте, но за счет укрепления белковой матрицы и предотвращения коалесценции и кластеризации жировых глобул способствует сохранению мелкодисперсной жировой фазы. В образце сыра с ГК на 20 % меньше пустот и уменьшение среднего размера жировых глобул на 44 % (с 26,5 до 14,8 мкм). Следовательно, ГК укрепил белковую матрицу, создал физический барьер, препятствующий коалесценции жировых капель, стабилизировал эмульсию и улучшил структурно-механические характеристики плавленого сыра.

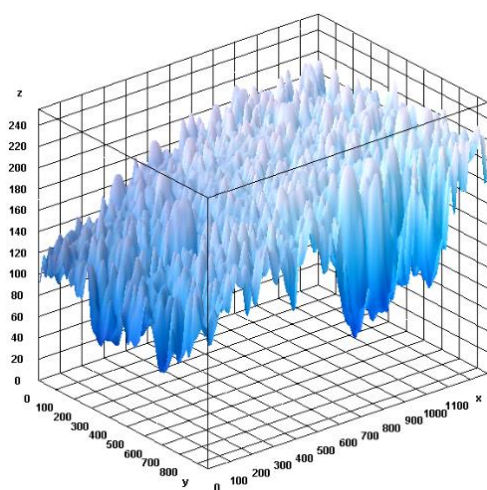
Выявленные зависимости отражаются на потребительских достоинствах плавленого сыра. Уменьшение и выравнивание размеров жировых глобул обеспечивает гладкость и однородность текстуры (важно для пастообразных сыров), а также стабильность при нагреве: такой сыр лучше плавится и распределяется (важно для горячих блюд и соусов).

Установлено (таблица 2), что добавление ГК приводит к статистически значимому уменьшению и выравниванию размеров жировых глобул ($p < 0,05$).

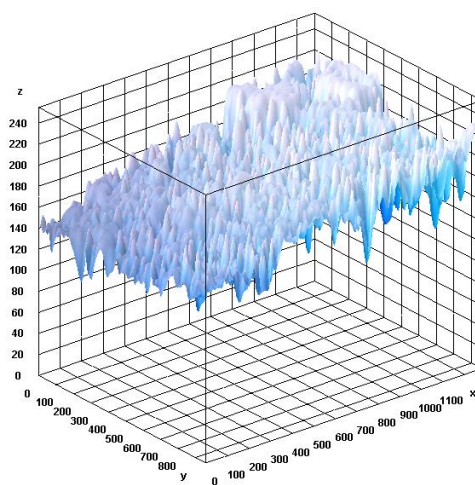
С помощью преобразования Фурье проведена оценка однородности белковой матрицы в образцах плавленого сыра (рисунок 11).

Таблица 2 – Значимость различий в размере жировых глобул образцов сыра

Показатель	Значение
Параметрический тест (<i>t</i> -критерий Уэлча)	
<i>t</i> -статистика	6,07
Степени свободы (<i>df</i>)	117,6
<i>p-value</i>	< 0,0001
Размер эффекта (<i>d</i> Козна)	0,86 (большой)
Непараметрический тест (<i>U</i> -критерий Манна – Уитни)	
<i>U</i> -статистика	400
<i>p-value</i>	< 0,0001
Однофакторный анализ (ANOVA)	
<i>F</i> -статистика	36,89
<i>p-value</i>	< 0,0001



a



б

Рисунок 11 – Однородность белковой матрицы в образцах плавленого сыра:
a – без наполнителей (контроль); *б* – с коллагеном (опыт)

В контрольном образце отмечена неоднородная поверхность, в образце с ГК – уменьшение перепадов высоты и высокая плотность пиков за счет уплотнения белковой матрицы, мелкие впадины указывают на снижение пористости.

ГК действует как многофункциональный модификатор структуры плавленого пастообразного сыра, обеспечивая формирование гибридной казеин-коллагеновой матрицы с повышенной прочностью поперечных связей, коллоидную стабилизацию жировой эмульсии через механизмы DLVO (Дерягина – Ландау – Фервея – Овербека) и стерического отталкивания, а также через контроль активности воды за счет гидратации (рисунок 12).



Рисунок 12 – Влияние ГК на свойства плавленого пастообразного сыра

Установлено, что сыр с ГК в значительно большей степени обладает вязкостными и адгезионными свойствами по сравнению с контролем. Включение ГК в рецептуру сыра увеличивает сопротивление деформации (рисунок 13): для образца с ГК оно на 48 % выше контроля, вязкость возросла на 40 %. Отмечено отсутствие пиков предела прочности, что свидетельствует о том, что образец с ГК сохраняет пластичность (важно для пастообразных сыров). Подтверждена статистическая значимость различий в реологических свойствах образцов. Внесение ГК влияет на потребительские достоинства плавленого сыра: вязкие свойства преобладают над упругими, сыр остается пластичным (важно для пастообразных сыров), рост вязкости способствует стабильности продукта при нагреве (важно для горячих блюд с сыром). ГК перспективен для продуктов, требующих высокой адгезии и пластичности: пастообразные сыры, сыры для соусов.

Таким образом, установлено, что ГК является многофункциональным ингредиентом, перспективным для сыродельной отрасли, практические рекомендации по его использованию даны на рисунке 14.

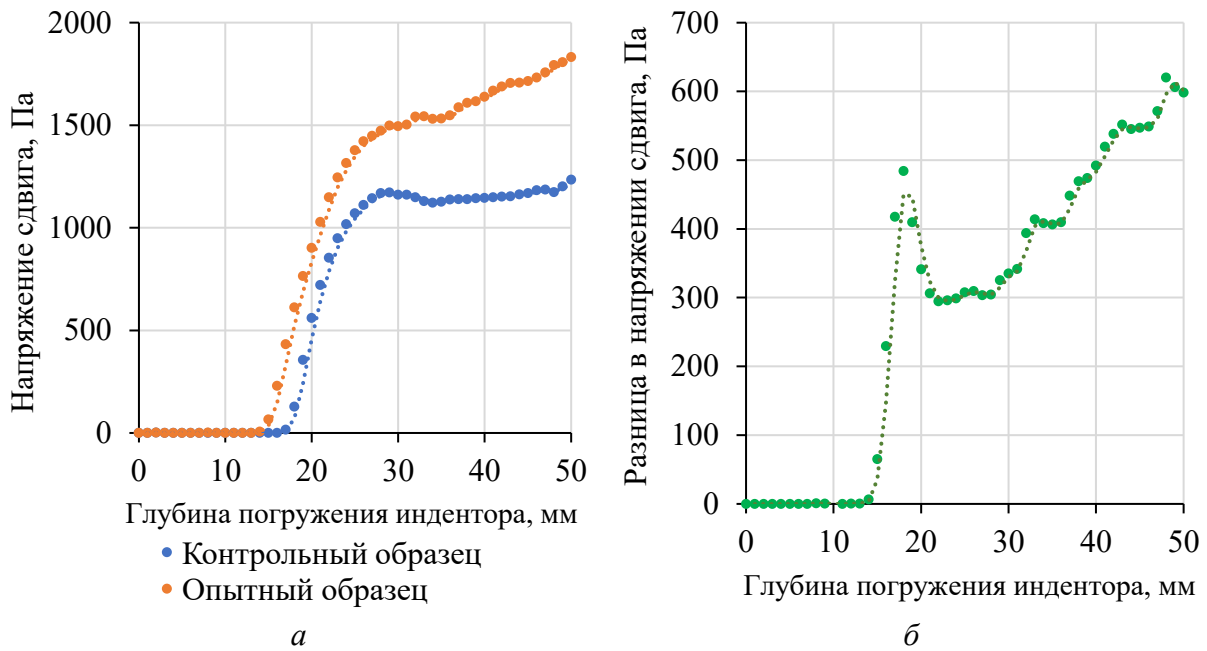


Рисунок 13 – Реограммы плавленого сыра:
 а – зависимость напряжения сдвига от глубины погружения индентора;
 б – различия между образцами



Рисунок 14 – Практические рекомендации

Разработано два варианта (в зависимости от массовой доли жира в сухом веществе – 55 % или 60 %) рецептур плавленого пастообразного сыра «Сырте» с ГК, лецитином и отрубями. Технологическая схема приведена на рисунке 15.

Технологический процесс	Параметры и показатели
Подбор сырья для плавления Камеры для хранения и созревания	$t = -4 \dots -8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ либо $t = 10 \text{--}12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{pH сыра} = 5,7 \text{--}5,3 \text{ ед.}$
Предварительная обработка молочного сыра Машина для снятия парафина и мойки сыра	$t_{\text{воды для парафина}} = 90 \text{--}95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_{\text{воды для ополаскивания}} = 40 \text{--}45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_{\text{воды для замачивания}} = 40 \text{--}45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{замачивания}} = 1,5 \text{--}2,0 \text{ ч}$ $t_{\text{сыворожки для дефростации}} = 18 \text{--}20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_{\text{воздуха для дефростации}} = 18 \text{--}20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 8–15 ч $M_{\text{масла}} = 2 \text{--}3 \text{ кг}$
Измельчение сырья Волчок, вальцовка, ванна-накопитель	$M_{\text{сыра}} = \text{до } 1 \text{ кг}$
Подготовка наполнителей Сушильный шкаф, сосуды из термостойких материалов	$t_1 = t_3 = 40 \text{--}50 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_2 = 85 \text{--}90 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_{\text{выдержки}} = 8 \text{--}10 \text{ мин}$ $t_{\text{воздуха}} = 200 \text{--}250 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_{\text{выдержки}} = 10 \text{--}15 \text{ мин}$ $t_{\text{смеси}} = 80 \text{--}85 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_{\text{выдержки}} = 5 \text{--}7 \text{ мин}$
Подбор и приготовление солей-плавителей Весы, сосуды из химически стойких материалов	$M_{\text{сухой соли}} = \text{до } 2 \text{ кг}/100 \text{ кг}$ $V_{20\% \text{ раствора соли}} = 8,4 \text{ л}/100 \text{ кг}$ $t_{\text{нагрева раствора}} = 80 \text{--}90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_{\text{охлаждения раствора}} = 18 \text{--}20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Составление сырной смеси Загрузочный ковш	В соответствии с рецептурой
Плавление сырной смеси Аппарат для плавления сырной смеси	$t_{\text{плавления } 1} = 65 \text{--}70 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{плавления } 2} = 85 \text{--}90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{плавления}} = 15 \text{--}20 \text{ мин}$, в том числе 5–7 мин при $t_{\text{плавления } 2}$
Фасование и охлаждение Автомат фасовочно-упаковочный, холодильная камера	$t_{\text{сырной массы}} = 70 \text{--}80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_{\text{воздуха при охлаждении}} = -4 \dots -6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\tau_{\text{охлаждения}} \text{ от } 30 \text{ мин до } 12 \text{--}16 \text{ ч}$ $t_{\text{охлажденного сыра}} = 8 \text{--}15 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 15 – Технологическая схема производства плавленого пастообразного сыра «Сырте»

Плавленому пастообразному сыру «Сырте» дана комплексная оценка – изучены органолептические, физико-химические и микробиологические показатели (таблица 3), установлены регламентируемые показатели качества.

При соблюдении режима хранения (температура 4–8 °С, относительная влажность воздуха не более 85 %) срок годности сыра «Сырте» составляет 30 сут (потребительская упаковка – полимерные стаканчики).

На сыр «Сырте» разработан и утвержден комплект НД – СТО 02067824-006-2023 и Технологическая инструкция к СТО, предложенные решения апробированы и внедрены на сыродельном предприятии – ООО «Сибирское подворье» (Алтайский край, г. Барнаул).

Таблица 3 – Характеристики плавленого пастообразного сыра «Сырте»

Показатель	М. д. жира в сухом веществе согласно НД	
	55 %	60 %
Органолептические характеристики		
Вкус и запах	Сырный, кисломолочный	Сырный, сливочный, пресноватый
Консистенция	Нежная, пластичная. Однородная по всей массе	Нежная, кремообразная. Однородная по всей массе
Вид на разрезе	Рисунок отсутствует, видны частицы отрубей	
Цвет	Светло-желтый	
Физико-химические характеристики		
М. д. жира в сухом веществе, %	55,0±0,5	60,0±0,8
М. д. влаги, %	52,0±0,3	50,0±0,5
М. д. пищевой соли, %	0,31±0,05	0,28±0,05
Активная кислотность, ед. рН	6,0±0,3	5,4±0,2
Микробиологические характеристики		
КМАФАнМ, КОЕ/г	2,4·10 ³	2,2·10 ³
БГКП в 0,1 г сыра	Не обнаружено	Не обнаружено
Дрожжи, КОЕ/г	Не обнаружены	Не обнаружены
Плесени, КОЕ/г	19	Не обнаружены

Внесение наполнителей (ГК, лецитин, отруби) сопровождается снижением в рецептуре массы сычужного полутвердого сыра, что позволяет сэкономить около 7% дорогостоящего молочного сырья. Срок годности нового сыра «Сырте» – типичный для плавленых сыров, не требует дополнительных инвестиций в упаковку и логистику.

Заключение

1. По результатам аналитического обзора установлено, что большинство имеющихся в Российской Федерации цифровых инструментов для сыроделия ориентированы на образовательные цели, а специализированное программное обеспечение для технологического проектирования отсутствует. Нейросетевые технологии в мировом сыроделии применяются ограниченно, для решения точечных локальных задач. Перспективным подходом является создание комплексных цифровых решений для предиктивной аналитики на основе информационной системы (база данных рецептов и программа управления), используемой также в качестве набора данных для обучения нейронных сетей.

2. Разработана информационная система «Рецептуры плавленых сыров», включающая открытую для редактирования базу данных (869 рецептов) и программу управления ею. ИС позволяет автоматизировать выбор рецептов по различным критериям и их сочетаниям (пищевая ценность, состав,

вид сыра), осуществлять интеллектуальную замену ингредиентов на основе химического состава. Логическая и физическая модели базы данных позволяют адаптировать ИС к рецептурам любых пищевых систем.

3. Разработана, обучена и валидирована нейросеть «Пищевые системы» (архитектура 8-64-64-1, функция активации ReLu, оптимизатор Adam). Установлены параметры машинного обучения, обеспечивающие достоверность прогноза не ниже 80 %: объем обучающей выборки – не менее 200 рецептов, количество батчей – 10, итераций – 10 % от исходного набора данных, циклов обучения – не менее 40. Доказана стабильность модели обучения (выход *MAE* на плато после 40-го цикла обучения и на протяжении 5 000 эпох). На модельной линейке из 14 образцов плавленых пастообразных сыров (за пределами обучающей выборки) с наполнителями из разных групп сырья проведена валидация нейросетевой модели: достоверность прогноза 86–97 %, средняя теоретическая ошибка 7,18 %, средняя фактическая ошибка 5,3 %.

4. На основе предиктивной аналитики нейросети «Пищевые системы» выбрана и оптимизирована рецептура плавленого пастообразного сыра с гидролизированным коллагеном, лецитином подсолнечника и пшеничными отрубями. Методами математического моделирования (полный трехфакторный эксперимент) получена регрессионная модель, описывающая влияние дозировок наполнителей на органолептическую оценку, установлено приоритетное влияние коллагена. Определены оптимальные диапазоны внесения: гидролизированный коллаген – 3,0–3,5 %, лецитин подсолнечника – 2,5–3,0 %, пшеничные отруби – 1,0–1,5 %.

5. Проведено комплексное исследование свойств плавленого пастообразного сыра «Сырте» с гидролизированным коллагеном, лецитином подсолнечника и пшеничными отрубями. Установлено, что внесение коллагена обогащает аминокислотный профиль (появление гидроксипролина, увеличение глицина на 128,6 %, гистидина на 24,3 %, аланина на 19,6 %, пролина на 18,4 %), улучшает микроструктуру (уменьшение среднего размера жировых глобул на 44 %, снижение пористости на 20 %), повышает реологические характеристики (увеличение вязкости на 40 %, сопротивления деформации на 48 % при сохранении пластичности). Определены регламентируемые показатели качества, обоснован срок годности (30 сут при температуре 4–8 °С). Разработан и утвержден комплект нормативной документации (СТО 02067824-006-2023, Технологическая инструкция). Предложенные решения апробированы и внедрены в производство на ООО «Сибирское подворье» (г. Барнаул).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи, индексируемые в базах цитирования Web of Science/Scopus

1. Мусина, О.Н. Роль коллагена в формировании микроструктуры и реологических свойств плавленого сыра / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Техника и технология пищевых производств. – 2025. – Т. 55, № 3. – С. 659–672.

2. Musina, O. Studying the features of the use of neural networks and machine learning in the design of food systems / O. Musina, **E. Nagornykh** // BIO Web of Conferences. – 2023. – Vol. 71. – Art. 01084.

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК

3. Мусина, О.Н. Исследование возможности расширения ассортимента обогащенных плавленых сыров / О.Н. Мусина, Д.А. Усатюк, **Е.М. Нагорных** // Ползуновский вестник. – 2022. – Т. 1, № 4. – С. 121–125.

4. Мусина, О.Н. Тенденции в производстве плавленых сыров / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Сыроделие и маслоделие. – 2022. – № 2. – С. 8–9.

5. Мусина, О.Н. Цифровые инструменты в молочной отрасли. анализ зарегистрированных баз данных / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Молочная промышленность. – 2023. – № 2. – С. 58–59.

6. Мусина, О.Н. Плавленые сыры и сыры с наполнителями: анализ активности в защите разработок / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Сыроделие и маслоделие. – 2023. – № 2. – С. 47–48.

7. Мусина, О.Н. Влияние коллагена на структурно-механические характеристики плавленого сыра / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 112–118.

8. Мусина, О.Н. Исследование возможности использования гидролизованного коллагена в технологии плавленого сыра / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных**, Д.А. Усатюк, Н.И. Бондаренко // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 15–21.

9. **Нагорных, Е.М.** Цифровой сервис технолога: проектирование новых рецептур плавленых сыров / Е.М. Нагорных, О.Н. Мусина // Ползуновский вестник. – 2026. – № 2. – С. 14–19.

Прочие публикации

10. Musina, O.N. Collagen in processed cheese technology / O.N. Musina, **E.M. Nagornykh** // Journal of Nutritional Health & Food Engineering. – 2023. – Vol. 13, № 1. – P. 49–51.

11. Мусина, О.Н. Разработка программы для управления электронным справочником «Плавленые сыры: отечественные патентные документы» / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Аграрная наука – сельскохозяйственному производству Евразии: сб. науч. докл. XXVI Междунар. науч.-практ. форума (Улаанбаатар, 6–7 окт. 2023 г.). – Улаанбаатар: МААС, 2023. – С. 656–659.

12. Мусина, О.Н. Разработка программы для управления электронным справочником рецептур плавленых сыров / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Колданбалы биотехнологияның өзекті мәселелері = Актуальные проблемы прикладной биотех-

нологии : материалы междунар. науч.-практ. конф. (Павлодар, 24 нояб. 2023 г.). – Павлодар : Торайгыров университеті, 2023. – С. 59–64.

13. **Нагорных, Е.М.** Совершенствование качества плавленых сыров / Е.М. Нагорных, О.Н. Мусина // Пищевые технологии и биотехнологии : сб. материалов XVIII Всерос. конф. с междунар. участием (Казань, 18–21 апр. 2023 г.). – Казань : КНИТУ, 2023. – С. 650–654.

14. **Нагорных, Е.М.** Разработка базы данных о плавленых сырах на основе отечественных патентных документов / Е.М. Нагорных // Актуальные проблемы прикладной биотехнологии и инженерии : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. (Оренбург, 21 июня 2023 г.) – Оренбург : ОГУ, 2023. – С. 120–123.

15. **Нагорных, Е.М.** Проектирование рецептур обогащенных плавленых сыров с использованием современного цифрового инструментария / Е.М. Нагорных, О.Н. Мусина // Пищевые инновации и биотехнологии : сб. тез. XI Всерос. (нац.) науч. конф. (Кемерово, 18 мая 2023 г.). – Кемерово : КемГУ, 2023. – С. 184–186.

16. Мусина, О.Н. Информационно-советующая система для проектирования пищевых систем на примере рецептур плавленых сыров / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Актуальная биотехнология. – 2023. – № 1. – С. 38–41.

17. Мусина, О.Н. Новый плавленый сыр «СырМе» / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных**, Н.И. Бондаренко // Актуальная биотехнология. – 2023. – № 3. – С. 32.

18. Мусина, О.Н. Возможности цифровизации при переработке молока на примере зарегистрированных компьютерных программ / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. (Барнаул, 26–27 окт. 2022 г.). – Барнаул : АлтГТУ, 2022. – С. 55–60.

19. Мусина, О.Н. Ретроспективный количественный анализ отечественных разработок в сфере плавленых сыров / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции : сб. материалов I Междунар. науч.-практ. конф. (Барнаул, 20 дек. 2022 г.). – Барнаул : Алтайский ГАУ, 2023. – С. 90–95.

20. Мусина, О.Н. Разработка базы данных рецептур плавленых сыров / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. (Барнаул, 25–26 окт. 2023 г.). – Барнаул : АлтГТУ, 2023. – С. 73–75.

21. Мусина, О.Н. Новые возможности повышения качества плавленого сыра / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Бийск, 24–26 мая 2023 г.). – Барнаул : АлтГТУ, 2023. – С. 338–341.

22. Мусина, О.Н. Исследование особенностей микроструктуры и аминокислотного состава обогащенного плавленого сыра / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных** // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. (Барнаул, 25–26 окт. 2023 г.). – Барнаул : АлтГТУ, 2023. – С. 71–73.

23. **Нагорных, Е.М.** Анализ ассортимента плавленых пастообразных сыров производителей Алтайского края и продукции среднего ценового сегмента федеральных брендов на примере Сырбогатов, Hochland и Viola / Е.М. Нагорных // Качество продукции в АПК: контроль, управление, повышение, планирование : сб.

материалов III Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. (Курск, 1 апр. 2026 г.). – Курск : Курский ГАУ, 2026. – С. 144–148.

Результаты интеллектуальной деятельности

24. Свидетельство № 2023620806 о гос. регистрации базы данных. Рецептуры плавленных сыров : № 2023620806 : заявл. 22.02.2023 : опубл. 06.03.2023 / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных**.

25. Свидетельство № 2023618007 о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программа для управления электронным справочником рецептов плавленных сыров : № 2023616639 : заявл. 04.04.2023 : опубл. 18.04.2023 / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных**.

26. Свидетельство № 2023684297 о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программа для обучения нейросети «Пищевые системы» : № 2023683285 : заявл. 03.11.2023 : опубл. 14.11.2023 / О.Н. Мусина, **Е.М. Нагорных**.

Подписано в печать 03.07.2026.

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