

*На правах рукописи*



НИКИТИНА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ИНТЕГРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕСС  
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПИЩЕВЫХ  
ПРОДУКТОВ ЗАДАННОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ**

Специальность 05.13.06 – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в пищевой промышленности)  
Специальность 05.18.04 – технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «ФНЦ пищевых систем имени В. М. Горбатова» РАН.

**Научные консультанты:** доктор технических наук, профессор, академик РАН, **Лисицын Андрей Борисович**  
доктор технических наук, профессор, академик РАН, **Чернуха Ирина Михайловна**

**Официальные  
оппоненты:**

**Красуля Ольга Николаевна**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева», профессор кафедры «Технология хранения и переработки продуктов животноводства»  
**Просеков Александр Юрьевич**

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», ректор

**Пашенко Федор Федорович**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова» Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории № 40 «Интеллектуальных систем управления и моделирования»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет инженерных технологий" (ФГБОУ ВО "ВГУИТ"), город Воронеж

Защита состоится «09» декабря 2021 года в 10 часов 00 минут на заседании Диссертационного Совета Д 212.148.02 на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет пищевых производств» по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д.33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «МГУПП» и на сайте <http://www.mgupp.ru>.

Отзывы на автореферат и диссертацию отправлять по адресу: 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11. ФГБОУ ВО «МГУПП»

Автореферат разослан «02» ноября 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.148.02,  
доктор технических наук, профессор



М.В. Жиров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Состояние питания – один из важнейших факторов, определяющих здоровье и сохранение генофонда нации. В России в 76% случаев причинами смерти оказываются неинфекционные заболевания, среди которых болезни системы кровообращения (56,7%), новообразования (14,4%), болезни органов дыхания (3,7%) и сахарный диабет (СД) (1,5%). Ряд заболеваний связаны с недостаточностью или избытком определенных компонентов в ежедневном рационе питания человека. Около половины случаев смертности в возрасте до 70 лет в той или степени связаны с неправильным питанием. Одной из главных предпосылок сохранения здоровья человека является его оптимальный рацион питания, содержащий необходимые для организма аминокислоты и жирные кислоты, витамины и различные микроэлементы. Именно при достижении оптимальной структуры питания обеспечиваются высокая работоспособность и первичная профилактика многих заболеваний, повышается иммунная резистентность и усиливается защита организма от воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды. Решение вопроса адекватного (здорового) питания, соответствующего потребностям и возможностям организма человека и сбалансированного по всем показателям пищевой и биологической ценности, связано с созданием современных систем поддержки принятия решений (СППР). В состав СППР входят Big Data (большие массивы баз данных и знаний о предметной области). В них содержится информация, отражающая выбор индивидуальных (персонализированных) рационов и режимов питания с учетом возрастных факторов, физиологического состояния, медико-биологических требований, региональных условий, особенностей потребления пищи, а также источника нарушения иммунного статуса. Сложность принятия оптимальных решений обуславливается множеством факторов. В первую очередь, вероятностным разбросом характеристик и свойств исходных компонентов биологического сырья. Во-вторых, индивидуальностью физиологических особенностей организма, требующих в каждом конкретном случае индивидуального выбора и коррекции моделей рационов с учетом структурных соотношений и ограничений на компонентном, элементном и моноструктурном уровнях. В-третьих, сочетаемостью продуктов в одном рационе, и проявлением различных эффектов комбинации, таких, как синергизм и антагонизм.

В пункте 11 Постановления Президиума РАН № 178 от 27.11.2018 «Об актуальных проблемах оптимизации питания населения России: роль науки» отмечено, что необходимо формирование нового научного направления «цифровая нутрициология», предусматривающего цифровую трансформацию данных о физиологических потребностях человека в пищевых и биологически активных веществах и энергии, химическом составе основных пищевых продуктов, а также создание ЭВМ программ для разработки персонализированных рекомендаций по оптимальному питанию.

Применение высоких технологий позволит не только оценить фактическое питание (получить «паспорт здоровья»), но и сформировать индивидуально подобранный рацион с учетом физиологических показателей, физической и психологической нагрузки, наличия хронических заболеваний, экологических условий, привычек и образа жизни; осуществлять контроль и наблюдение за всеми жизненными циклами моделирования пищевого продукта с применением технологии «цифрового двойника»; осуществлять контроль незаявленных компонентов в сырье с использованием нейросетевых технологий.

**Степень разработанности темы:** В настоящее время хорошо изучены математические основы решения задач рецептурной оптимизации. Большой вклад в развитии теории моделирования продуктов питания внесли российский ученые: Бражников А.М., Рогов И.А., Липатов Н.Н. (мл.), Лисицын А.Б., Ивашкин Ю.А., Красуля О.Н., Краснов А.В., Николаева С.В., Мусина О.Н., Просеков А.Ю. и т.д.; методов системного анализа, моделирования – Кафаров В.В., Гордеев Л.С., Мешалкин В.П., Дорохов И.Н., Пащенко Ф.Ф., Протопопов И.И. и др.; разработки состава и технологии продуктов детского,

школьного, диетического, геродиетического, функционального и специализированных продуктов питания – Устинова А.В., Юдина С.Б., Тихомирова Н.А., Токаев Э.С., Титов Е.И., Чернуха И.М., Кочеткова А.А., Дыдыкин А.С., Gibbons H, Harland J.I., Joost H.G., Pratico G, Sadeghi L., Celis-Morales C., Livingstone K.M., Ferguson L.R., Ordovás J.M., Longo V.D. и др.

Однако, оптимальная рецептура пищевого продукта не гарантирует превращения в процессе технологической обработки в устойчивую систему с требуемыми структурно-механическими, функционально-технологическими показателями. Приобретение пищевой композицией отдельных структурных форм (консистенция, внешний вид, связанность, текстура и т.п.) обусловлено особенностями протекания коллоидно-химических процессов по типу «белок-белок», «белок-вода», «белок-жир», «вода-белок-жир».

Решение индивидуально подобранного рациона здорового питания с учетом множества параметров физиологического состояния, альтернатив и критериев требует системного анализа и формализации накопленных знаний, данных, сведений в области разработки продуктов и рационов питания и применения высоких технологий.

**Цель и задачи исследования** Целью диссертационной работы является определение направлений цифровой трансформации, теоретическое обоснование создания и применения человекомашинных систем и процессов при решении задач пищевых систем, включая формирование заданного состава продуктов и рационов питания, а также возможности цифровизации методов контроля качества, отличающихся высоким риском субъективного решения.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- анализ и систематизация наукоемких технологий в формировании продуктов питания с целью оценки их интероперабельности и возможности алгоритмизации;
- теоретическое обоснование формирования специализированных проблемно-ориентированных баз данных;
- разработка аналитического и программно-технического инструментария с учетом предметных областей их использования и современных методов обработки массивов информации, направленных на повышение эффективности управленческих процессов, протекающими в системе.
- составление концептуальных схем группирования пищевых продуктов и блюд по различным признакам с применением методов и алгоритмов кластерного анализа;
- разработка пошагового алгоритма создания «цифровых двойников» - имитационных моделей продуктов общего и специализированного питания и технологических процессов;
- создание имитационной модели ЖКТ для моделирования, прогнозирования и изучения превращений пищевых компонентов с учетом особенностей состава продукта, специфики его воздействия и особенностей пищеварения индивидуума;
- апробация разработанных инструментов применительно к объекту исследования.

Задачи, поставленные в рамках исследования, будут решаться на основе методов математического моделирования, методов анализа данных и машинного обучения, теории принятия решений, методов объектно-ориентированного анализа и программирования, теории баз данных.

### **Научная новизна**

Определены направления цифровизации, создания и применения человекомашинных систем с рациональным разделением функций (вычислительные - машина, принятие решений - человек) связанные с цифровой трансформацией «моделей» питания (автоматизация процессов с минимизацией участия человека), созданием новых продуктов и рационов, современных решений в управлении качеством продукции.

Разработаны концептуальные схемы группирования пищевых продуктов и блюд по различным признакам с применением методов и алгоритмов кластерного анализа. Кластеризация продуктов по различным категориям позволяет формировать взаимозаменяемые списки блюд с размерами порций или списки разрешенных и

неразрешенных продуктов с точки зрения различных заболеваний и индивидуальных особенностей метаболизма.

Разработан пошаговый алгоритм создания «цифровых двойников» - имитационных моделей пищевого продукта для анализа пищевой, биологической и энергетической ценности и др. характеристик продукта перед запуском его в производство. Применение виртуальной имитационной модели позволит в режиме реального времени реагировать на изменения в физико-химическом составе используемого сырья или замене основного, или вспомогательного сырья, и в соответствии с этим корректировать рецептуру для получения продукта с заданным химическим составом и гарантированным качеством.

Предложены структурно-параметрическое описание и агентно-ориентированная модель пищеварительной системы человека, отражающая динамику усваивания элементов пищевой и биологической ценности продуктов. Биохимические процессы в подсистемах желудочно-кишечного тракта описываются субстрат-ферментативными реакциями расщепления элементов пищевой ценности и позволяют оптимизировать компонентный состав и структуру рациона питания человека с учетом его физиологического состояния.

Оригинальность и научная обоснованность подходов отражена в 115 публикациях, из которых 25 опубликованы в рецензируемых международных базах данных (Scopus и WoS).

**Теоретическая значимость.** Систематизированы, обобщены, адаптированы к пищевым продуктам и детализированы механизмы физиологического расщепления нутриентов в организме с использованием субстрат-ферментативных реакций Михаэлиса-Ментона. Показана возможность математического описания при оценке совместимости пищевых продуктов с физиологическими возможностями человека.

Доказана интреоперабельность и возможность алгоритмизации этапов технологического процесса производства пищевых продуктов и блюд; подтверждена эффективность предложенных подходов в сравнительных экспериментах с использованием традиционных методов.

#### **Практическая значимость**

Разработаны следующие программные обеспечения: «Программа по сбору и статистической обработке сенсорных данных» (Свидетельство Роспатент № 2017663406 от 01.12.2017); «Компьютерная программа по статистической обработке экспериментальных данных» (Свидетельство Роспатент № 2017664268 от 19.12.2017); «Расчет нутриентной адекватности состава поликомпонентных мясных продуктов (Свидетельство Роспатент № 2015660124 от 22.09.2015); «Подсистема статистического обеспечения биологических исследований» SSS BIO (Subsystem Statistical Support for Biological Research) (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016613478 от 28.03.2016); «Конструктор рецептов» (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016616925 от 22.06.2016).

Разработана база данных «Пищевые продукты» (Свидетельство Роспатент № 2015620557 от 30.03.2015)

Разработан электронный учебник «Микроструктура мяса и мясных продуктов» (Свидетельство Роспатент № 2020620238 от 10.02.2020).

Получен патент на «Способ производства функционального продукта» (Патент на изобретение RU 2536952 С1, 27.12.2014. Заявка № 2013126936/10 от 13.06.2013).

Разработано автоматизированное рабочее место дегустатора, обеспечивающее поддержку и объективизацию принимаемых им решений, где обработка информации выполняется разработанной «Программой по сбору и статистической обработке сенсорных данных».

Результаты работы используются при проведении лекционных и практических занятий магистров в рамках учебного процесса по направлению подготовки «Высокотехнологичные производства пищевых продуктов функционального и специализированного назначения» ФГБОУ ВО МГУПП.

### **Положения, выносимые на защиту**

Методология создания «цифровых двойников» пищевых продуктов питания.

Мультиагентная модель химико-физиологических процессов в желудочно-кишечном тракте человека для оценки биосовместимости основных пищевых веществ.

Научно-обоснованные подходы к разработке концептуальных схем группирования пищевых продуктов и блюд по различным признакам с применением методов и алгоритмов кластерного анализа.

Структурирование массивов данных (медико-биологические требования к питанию детерминированных групп потребителей, характеристики диетических столов, знания о компонентах пищи и их роли в профилактике и лечении алиментарных заболеваний) и разработка реляционных баз данных.

Концепция моделирования биологической совместимости пищевых продуктов, включенных в рацион индивидуального питания, с текущим состоянием человека и физиологическими процессами пищеварения.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и обоснованность теоретических выводов и практических результатов, полученных в работе, подтверждается корректным использованием методов исследования, результатами апробирования разработанных алгоритмов на общедоступных данных, публикацией научных трудов, а также сравнительным анализом результатов с известными результатами современных исследований и разработок.

Результаты исследований отмечены дипломами, сертификатами и медалями Российской агропромышленной выставки «Золотая осень 2016, 2018», XIX Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед».

Отдельные этапы работ были выполнены при поддержке Российского Научного фонда (грант РНФ № 16-16-10073П); совместно с Фондом инфраструктурных и образовательных программ при разработке дополнительной профессиональной образовательной программы повышения квалификации по теме «Выявление фальсификации состава продуктов молекулярно-генетическими методами» (Договор № 037.18.001/01 от 11.07.2018); в рамках Госзадания по плану научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполняемых в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 – 2020 годы.

**Основные научные положения и ключевые результаты диссертационной работы** доложены и обсуждены на симпозиумах и конференциях различного уровня: конференции Отделения хранения и переработки сельскохозяйственного сырья Россельхозакадемии (Углич, 2010), Всероссийском конгрессе диетологов и нутрициологов «Питание и здоровье» (Москва, 2008), научно-практических конференциях «Цифровая трансформация пищевой и перерабатывающей промышленности» (Москва, 2019), «Цифровая трансформация АПК: особенности в пищевой и перерабатывающей промышленности, казачьих хозяйствах и сельскохозяйственных кооперативах» (Москва, 2019), «Научно-техническое обеспечение эффективности и качества производства продукции АПК» (Ржавки, Московская область, 2019), Российской конференции «Автоматизация пищевой промышленности» INTEKPROM IT-FOOD (Челябинск, 2018), Международной специализированной конференции-выставки «Фабрика будущего» (Москва, 2020), Международных конференциях «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности» ЛЭРЭП (Тула, 2017), «Математические методы в технике и технологии» ММТТ (Минск, Белоруссия, 2017, Санкт-Петербург, 2018, 2019), «Проблемы оптимизации и их приложения» ОРТА (Омск, 2018), «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы», ГИСИС (Солнечногорск, Калининградская область, 2018), «Информационные технологии и нанотехнологии» ITNT (Самара, 2019, 2020), IFAC Conference of Manufacturing Modeling, Management, and Control, MIM (Берлин, Германия, 2019), бюро РАН (2018, Москва), Conference of Open Innovations Association FRUCT (Ярославль, 2020), «Cyber-Physical Systems Design And Modelling» CYBERPHY

(Казань, 2020), International Meat Industry Conference MEATCON-2019 (Kopaonik, Serbia, 2019), 3rd International Conference on Information Processing and Control Engineering IPSA-19 (Москва, 2019).

**Личное участие автора.** Диссертационная работа является обобщением научных исследований, проведенных в 2002-2021 гг. лично автором и при его непосредственном участии в качестве руководителя, или ответственного исполнителя, или исполнителя научно-исследовательских работ.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы отражено в 115 научных работах, в том числе 1 учебнике, 1 учебном пособии, 1 монографии, 41 статье, опубликованных в ведущих российских научных периодических изданиях, включенных в Перечень ВАК при Минобрнауки РФ для публикации результатов диссертационных исследований, а также 25 статьях в изданиях, рецензируемых в международных базах данных (Scopus и WOS); получено 6 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ, 2 свидетельства о регистрации базы данных, один патент РФ.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения и восьми глав, включающих обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы, методологическую часть, результаты собственных исследований, заключение, список литературы и приложения. Основной текст работы изложен на 233 страницах компьютерного текста, содержит 30 таблиц и 60 рисунков. Список литературных источников включает 176 наименования, в том числе 102 – иностранных авторов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

### **Глава 1 Цифровые технологии в агропромышленном комплексе – состояние и перспективы**

В главе рассмотрены основные тенденции и направления цифровой трансформации применительно к формированию рецептур и продуктов здорового питания, применения цифровых технологий в системах поддержки принятия решений при использовании методов исследований с высоким риском субъективизации результата. При разработке рациона питания недостаточно иметь только референтные показатели, «выведенные» в среднем для детерминированной группы пользователей, и сведения о химическом составе пищевых продуктов, блюд и кулинарных изделий. Необходимо обладать знаниями о фенотипе человека, его метаболизме, микробиоме и т.д. Иметь представления о взаимосвязях между болезнями и метаболическими особенностями в организме человека в виде структурно-параметрических моделей питания.

Анализ состояния вопроса позволил обосновать цель и задачи исследования, а также сформулировать концепцию работы, состоящую в обосновании возможности цифровизации технологических и нутрициологических задач с учетом физиологических особенностей человека и пищевой адекватности питания в применении цифровой трансформации путем соединения высоких технологий пищевых систем и здоровья потребителя.

### **Глава 2 IT-решения применительно к частным технологиям**

Рассматриваются возможности применения информационных технологий и цифровых подходов к системной оценке и комплексной поддержке принятия решений при конструировании пищевых рационов и объективизации методов контроля. В качестве объекта рассматривается пищевая система. Под пищевой системой понимается система производства, распространения и потребления пищевых продуктов – от первичного производства до потребителя.

Объектами исследования также являются 1) процессы сбора, анализа и интеллектуальной обработки текущей и экспертной информации по продуктам заданного состава и методам контроля; 2) массивы неструктурированных данных (медико-биологические требования к питанию детерминированных групп потребителей, характеристики диетических столов, знания о компонентах пищи и их роли в профилактике и лечении алиментарных заболеваний).

Систему комплексной поддержки питания мы рассматриваем с позиций процессного подхода как единую цепь с взаимосвязанных операций от выбора сырья и ингредиентов до рациона питания, где структурная оптимизация рациона питания; включение дополнительных продуктов с определенными характеристиками; проектирование индивидуального продукта с расчетом показателей нутриентной адекватности; оценка незаявленных компонентов рассматриваются как управляющее воздействие на процесс (рисунок 1).



Рисунок 1 – Система комплексной информационной поддержки производства пищевого продукта с заданными составом и свойствами

Система комплексной информационной поддержки производства пищевого продукта с заданными составом и свойствами входит в схему исследования (рисунок 2) и показана пунктирной линией, включает в себя группу функциональных модулей (подсистем), объединенных общей программной платформой.

Реализация проекта осуществлялась в программной среде Embarcadero Delphi на языке объектно-ориентированного программирования Delphi, а также на языке программирования R и Python.

Основные этапы работы выполнялись на базе ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, а также на базе проблемной научно-исследовательской лаборатории электрофизических методов обработки пищевых продуктов (ПНИЛЭФМОПП) Московского государственного университета прикладной биотехнологии (ныне Московский государственный университет пищевых производств), на базе кафедры «Телематика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

### Глава 3 Методология и методы экспериментальных исследований

Для составления оптимального рациона питания с учетом «паспорта здоровья» человека, риска заболеваний и статуса желудочно-кишечного тракта используется диалоговый алгоритм (рисунок 3). По описаниям медико-биологического состояния человека, а также биомаркерам формируется параметрическая модель его адекватного питания в виде конкретных параметров, норм и соотношений требуемых пищевых веществ и компонентов в сутки.

**Структурная оптимизация рациона питания**, связанная с изменением соотношений и пропорций между потребляемыми продуктами, осуществляется с применением квадратичных критериев минимального отклонения от эталонной структуры множества показателей нутриентной адекватности. Обобщенный вид критерия:

$$\sum_{k=1}^n (B_k^0 - \sum_{j=1}^m b_{kj} y_j)^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

где  $y_j$  – массовая доля (объем)  $j$ -го продукта в рационе питания;  $b_{kj}$  – удельное содержание  $k$ -го элемента химического состава  $j$ -м продукте;  $B_k^0$  – нормативное содержание  $k$ -го элемента в рационе питания. При ограничениях: 1) по общему объему суточного рациона  $V$ ; 2) по допустимым пределам изменения массовой доли (объема)  $j$ -го продукта в рационе питания.

В качестве критериев или ограничений могут также использоваться критерии переваримости белков; адекватности белкового питания, соответствия химического состава и энергетической ценности питания объему рациона и возрастным потребностям организма. Важными критериями также являются критерии, оценивающие здоровье человека.

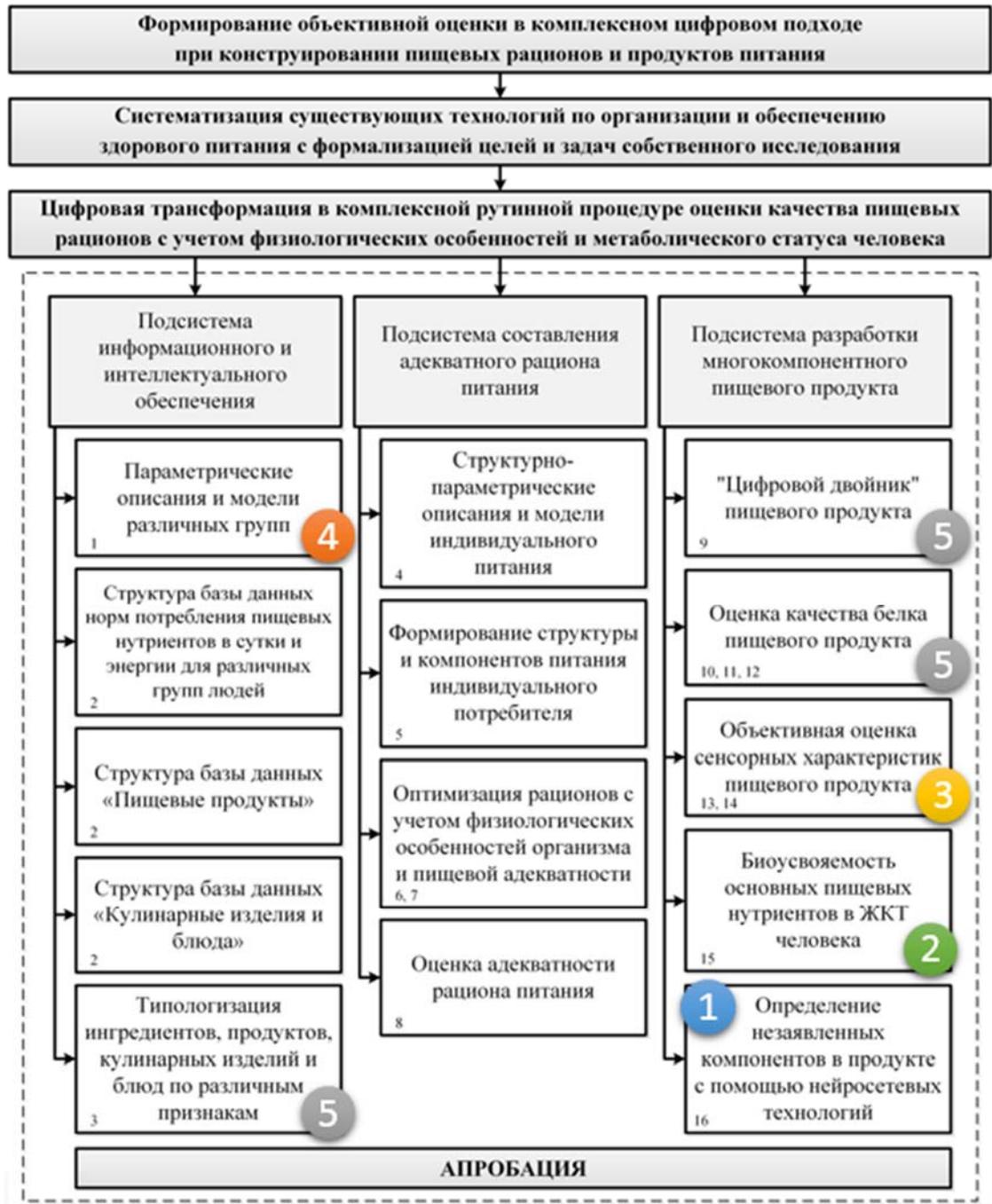


Рисунок 2 – Схема исследования

Минимизацию возможного рассогласования между параметрами нормативного и предлагаемого рационов осуществляется методами многокритериальной оптимизации с

формированием Парето-оптимального множества решений по формализованным выше критериям.

**Оптимизация рациона питания** осуществляется по алгоритму структурной оптимизации (1) и включает последовательное определение дисбаланса по  $k$ -му элементу при ограничениях по общему объему суточного рациона, по допустимым пределам изменения массовой доли (объема)  $j$ -го продукта в рационе питания и его минимизацию (в случае дефицита) путем увеличения до верхнего предела массовой доли одного продукта  $u_j$

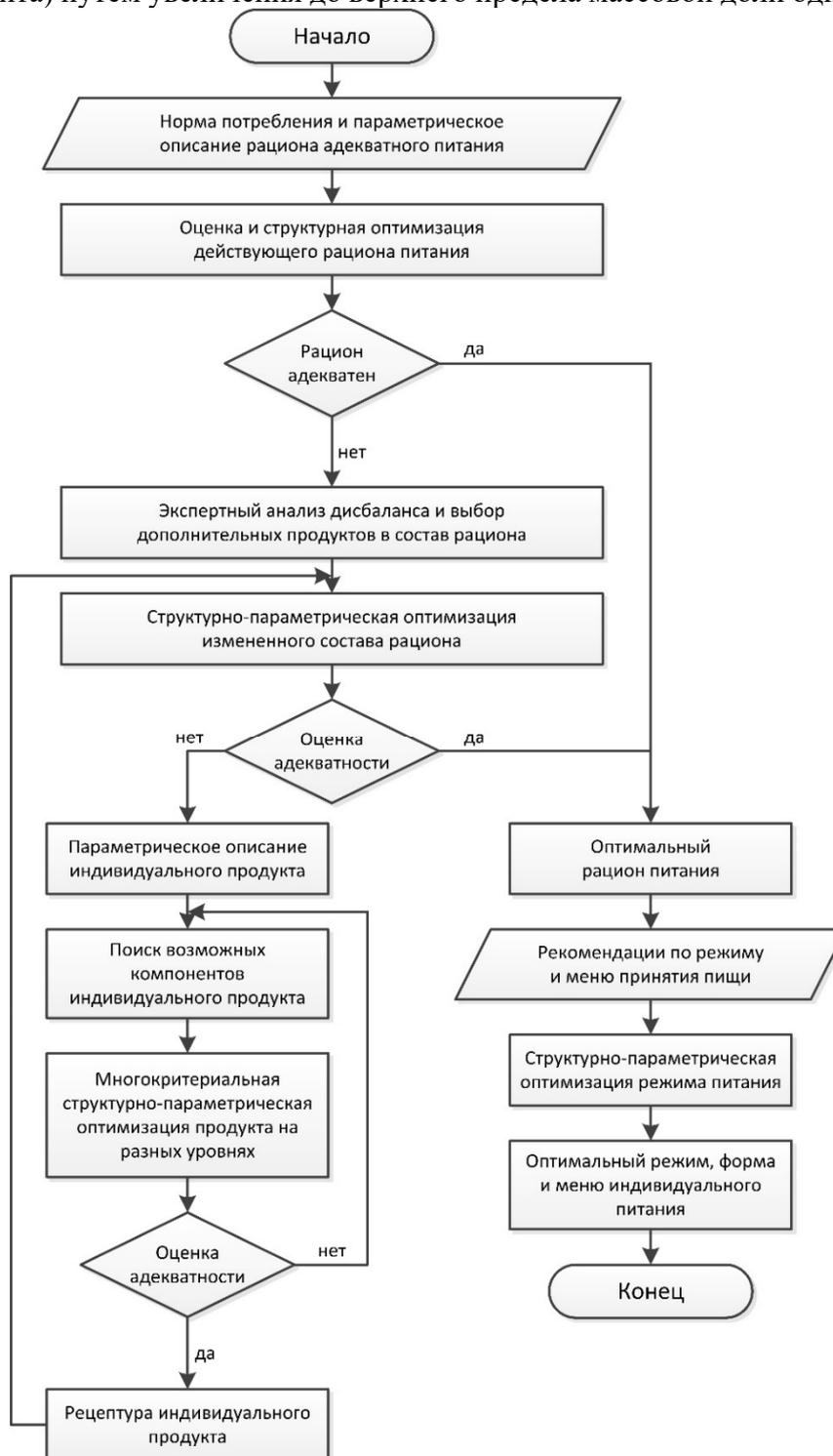


Рисунок 3 – Диалоговый алгоритм структурно-параметрической оптимизации продуктов заданного состава и свойств

с максимальным удельным содержанием  $b_{kl}^{max}$  дефицитного элемента и соответствующего уменьшения до минимума массовой доли другого продукта  $y_r$  с минимальным удельным содержанием  $b_{kr}^{min}$   $k$ -го элемента. В случае избыточности структурный сдвиг следует в противоположном направлении. В результате перераспределения массовых долей выбранной пары продуктов до  $y_l^{max}$  и  $y_r^{min}$  получаем новое улучшенное значение критерия (1). Величина перераспределения массовых долей компонентов выбирается, исходя из ограничения по заданным пределам  $y_l^{max}$  и  $y_r^{min}$ , а также ограничения по общему объему рациона, как

$$\delta = \min\{\Delta y_k, \Delta y_{kmax}, \Delta y_{kmin}\}, \quad (2)$$

где  $\Delta y_{kmax} = y_l^{max} - y_l$  - допустимое увеличение массовой доли  $l$ -го продукта;  $\Delta y_{kmin} = y_p - y_p^{min}$  - допустимое уменьшение массовой доли  $p$ -го продукта.

Новые значения массовых долей определяются, как  $y'_l = y_l + \delta$ ;  $y'_p = y_p - \delta$  процедура повторяется с нахождением следующей пары продуктов для перераспределения их массовых долей до нахождения локального минимума по  $k$ -му элементу. Процедура продолжается до исчерпывания всех возможностей перераспределения массовых долей компонентов с получением в итоге альтернативного варианта рациона с минимальным отклонением  $k$ -го элемента от заданного нормативного значения в структуре ассортимента адекватного питания.

Выбор оптимальной альтернативы из множества найденных Парето-оптимальных решений соответствует минимальному значению критерия адекватности (1) или максимуму функционала качества

$$\Phi(x) = 1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} \left( \frac{x_{ij} - x_{ij}^0}{\Delta x_{ij}^k} \right)} \rightarrow \max \quad (3)$$

где  $n$  - число объединяемых показателей;  $x_{ij}$ ,  $x_{ij}^0$  - фактическое и желаемое значение;  $\Delta x_{ij}^k$  - предельное отклонение от желаемого значения для  $k$ -го уровня качества;  $b_{ij}$  - весовой коэффициент  $j$ -го параметра в  $i$ -ой группе;  $a_i$  - коэффициент значимости групп. оценивающему суммарное остаточное отклонение полученной структуры показателей рациона от нормативного варианта по шкале от 0 до 1.

**Органолептическую оценку** качества продуктов питания определяли методами 1) ранговой корреляции; 2) многофакторного дисперсионного анализа

**Метод ранговой корреляции** применяется для формализации органолептической оценки качества готового продукта и связана с ранжированием каждым экспертом независимо друг от друга количественно неизмеримых факторов по убыванию или возрастанию их влияния на качество продукта. Результаты ранжирования записываются в матрицу рангов  $x_{ij}$ ;  $i=1, m$ ;  $j=1, n$ , указывающих место  $j$ -го параметра среди  $n$  других  $i$ -м экспертом.

**Многофакторный дисперсионный анализ.** Методология дисперсионного анализа была положена в основу разработки программного обеспечения с архитектурой «клиент–сервер» по сбору и статистической обработке сенсорных данных. Общий алгоритм обработки результатов сенсорной оценки включает установление размера выборки из генеральной совокупности и формулирование нулевой ( $H_0$ ) и альтернативной ( $H_1$ ) гипотез; выбор уровня значимости ( $\alpha=0,01$ ; или  $\alpha=0,05$ ; или  $\alpha=0,1$ ) и проведение оценки; сбор данных и вычисление суммарных статистических критериев; принятие или отрицание нулевой ( $H_0$ ) гипотезы и интерпретация результатов.

Влияние фактора оценивается по критерию Фишера-Снедекора при выбранном уровне значимости, не только как отношение межгрупповой дисперсии оценок от взаимосвязанности факторов к внутригрупповой дисперсии от ошибки эксперимента  $F = \frac{MS_{x_1x_2}^2}{MS_E^2}$ , но и как отношения  $F = \frac{MS_{x_1}^2}{MS_E^2}$  и  $F = \frac{MS_{x_2}^2}{MS_E^2}$  факторных дисперсий оценок экспертов к внутригрупповой дисперсии.

**Кластеризацию** проводили методом k-means. Множество элементов векторного пространства разбивается на заранее известное число кластеров  $k$ . Действие алгоритма заключается в минимизации среднеквадратичного отклонения на точках каждого кластера.

**Обучение интеллектуального агента** основано на работе нейронной сети и позволяет обеспечить необходимую точность в оценке влияния каждого параметра на состояние технологической системы и принятие решения в реальном времени.

В восприятии агента выходной сигнал  $i$ -го нейрона скрытого слоя в общем виде имеет вид:

$$y_i^{(2)} = f(\sum_{j=1}^N w_{ij}^{(1)} x_j); \quad i = \overline{1, k} \quad (4)$$

где  $w_{ij}^{(1)}$  – вес связи  $j$ -го нейрона первого слоя с входом  $i$ -го нейрона скрытого слоя

При сигмоидальной функции активации нейронов сигнал на выходе  $i$ -го нейрона скрытого слоя будет иметь вид:

$$y_i = \frac{1}{1 + e^{-\sum_{j=1}^n w_{ij}^{(1)} x_j}} \quad (5)$$

а сигнал на выходе сети будет выражен формулой

$$Y = \frac{1}{1 + \exp(-\sum_{i=1}^k w_i^{(2)} \frac{1}{1 + \exp(-\sum_{j=1}^n w_j^{(1)} x_j)} y_i)} \quad (6)$$

В качестве **алгоритма обучения** агента выбирается градиентный метод обратного распространения ошибки, суть которого заключается в подборе таких значений весов  $w_{ij}^{(1)}$  и  $w_{ij}^{(2)}$  для всех элементов слоев сети, чтобы при заданном входном векторе параметров  $\{x_1, \dots, x_n\}$  получить на выходе, совпадающие с тестовым вектором обучающей пары с приемлемой точностью.

#### **Глава 4 Оценка нутриентной сбалансированности проектируемого продукта питания. Алгоритм принятия решения выбора блюд в рацион питания или компонентов рецептуры с учетом типологизации признаков (кластеризация)**

Детальный анализ разработанных и активно используемых в настоящее время программных продуктов для автоматизации технологических расчетов рецептов пищевых продуктов различных групп и рационов питания показал, что практически все программные продукты 1) используют один критерий оптимизации, как правило стоимостной; 2) являются обычными калькуляторами калорий, рассчитываемых либо по формуле Харриса-Бенедикта, либо Миффлина-Сан Жеора.

Вместе с тем установлено, что определение пищевой ценности (влага, белок, жир, углеводы) не дает полную информацию о качестве белков, что особенно важно для продукции из мяса, являющейся основным источником животного белка в питании человека. Для оценки качественного состава белкового компонента используют коэффициент сопоставимой избыточности (G), различий аминокислотного скора (КРАС), утилитарности (U) и биологической ценности, предложенные Роговым И.А. и Липатовым Н.Н. (мл.) и основанные на принципах Митчелла-Блока.

Для решения поставленной задачи была разработана подсистема проектирования комбинированных продуктов питания, которая обеспечивает цифровую трансформацию таких технологических задач как проектирование рецептов, расчет количественных и качественных показателей проектируемого продукта, а именно расчет общего химического состава, пищевой, биологической и энергетической ценности (зарегистрирована в Государственном реестре программ для ЭВМ, регистрационный номер 2015660124 от 22.09.2015).

Информационной основой системы является база данных химического состава сырья, используемого в производстве комбинированных продуктов. Логическая структура базы данных представлена на рисунке 4. Связь между таблицами построена по принципу «один ко многим».

При работе с базой данных пользователи могут просматривать и редактировать нутриентный состав выбранного продукта, а также 1) редактировать/корректировать сведения о продукте; 2) добавлять новые продукты.

База данных программы включает в себя «Справочник химического состава пищевых продуктов» с систематизированной информацией о 1) количественном содержании незаменимых и заменимых аминокислот; 2) наличии и содержании насыщенных жирных кислот (НЖК), моновенасыщенных жирных кислот (МНЖК), полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК); 3) углеводах, моносахаридах, дисахаридах, гидролизуемых и негидролизуемых полисахаридах; 4) водорастворимых витаминах, в том числе витамине С (аскорбиновая кислота), В<sub>1</sub> (тиамин), В<sub>2</sub>(рибофлавин), В<sub>4</sub>(холин), В<sub>5</sub>(пантотеновая кислота), В<sub>6</sub>, В<sub>9</sub> (фолиевая кислота), В<sub>12</sub> (кобаламин), РР(ниацин), Н(биотин), и жирорастворимых витаминах – А, D, Е; 5) доли макро- и микроэлементов (зарегистрирована в Государственном реестре баз данных, регистрационный номер 2015620557 от 30.03.2015).

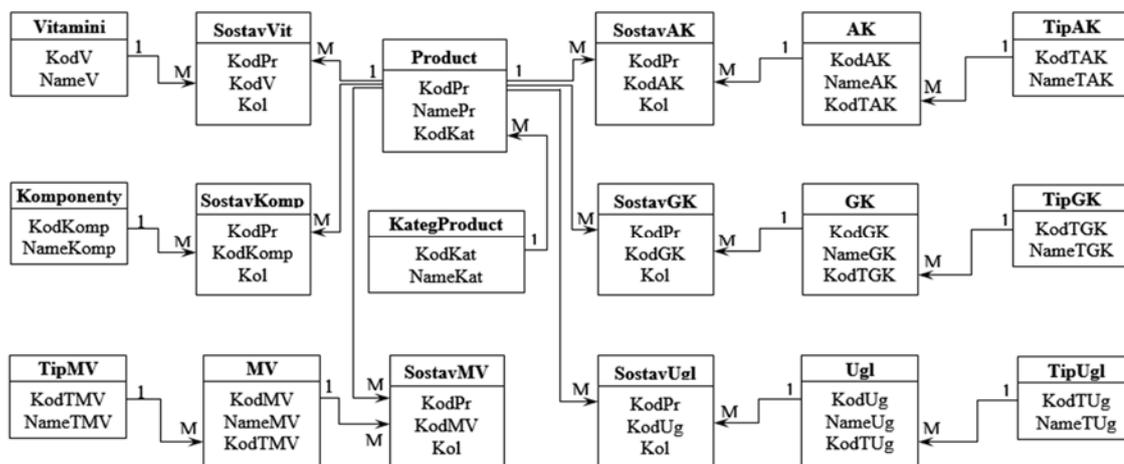


Рисунок 4 – Логическая структура базы данных «Пищевые продукты»

В соответствии с требованиями к ингредиентному и физико-химическому составу мясных продуктов, программа позволяет рассчитать рецептуры с учетом неограниченного числа оценочных факторов.

Наряду с этим база данных является ценным инструментом для анализа, систематизации данных (информации) и получения выборок по определённому дескриптору с графическим и табличным представлением. Кластеризация кулинарных изделий, блюд позволяет формировать списки разрешённых и неразрешённых продуктов с точки зрения различных заболеваний, подобрать ингредиент с целью обогащения продукта конкретным нутриентом или придания необходимых свойств.

#### 4.1. Типологизация продуктов, кулинарных изделий и блюд по различным характеристикам

На рисунке 5 представлен пример кластеризации фрагмента базы данных методом k-means с возможностью группировки одних и тех же продуктов в выборки по различным показателям. В зависимости от показателя блюдо может входить в разные кластеры (рисунок 5). Так блюдо «Щи зелёные» по разным показателям входит в 1) по содержанию кальция (Ca = 26 мг) в кластер с высоким содержанием кальция; 2) по содержанию калия (K = 228 мг) в кластер с умеренным (средним) содержанием калия; 3) по содержанию моно- и дисахаридов (2 г) в кластер с низким содержанием.

Наряду с графическим представлением информации (дендрограмма) формируются сводная таблица с детализацией сведений (количество наименований, среднее и экстремальные (максимум и минимум) значения в каждом кластере. Так, в анализируемых блюдах по признаку «Содержание кальция» сформировалось 3 кластера (таблица 1).

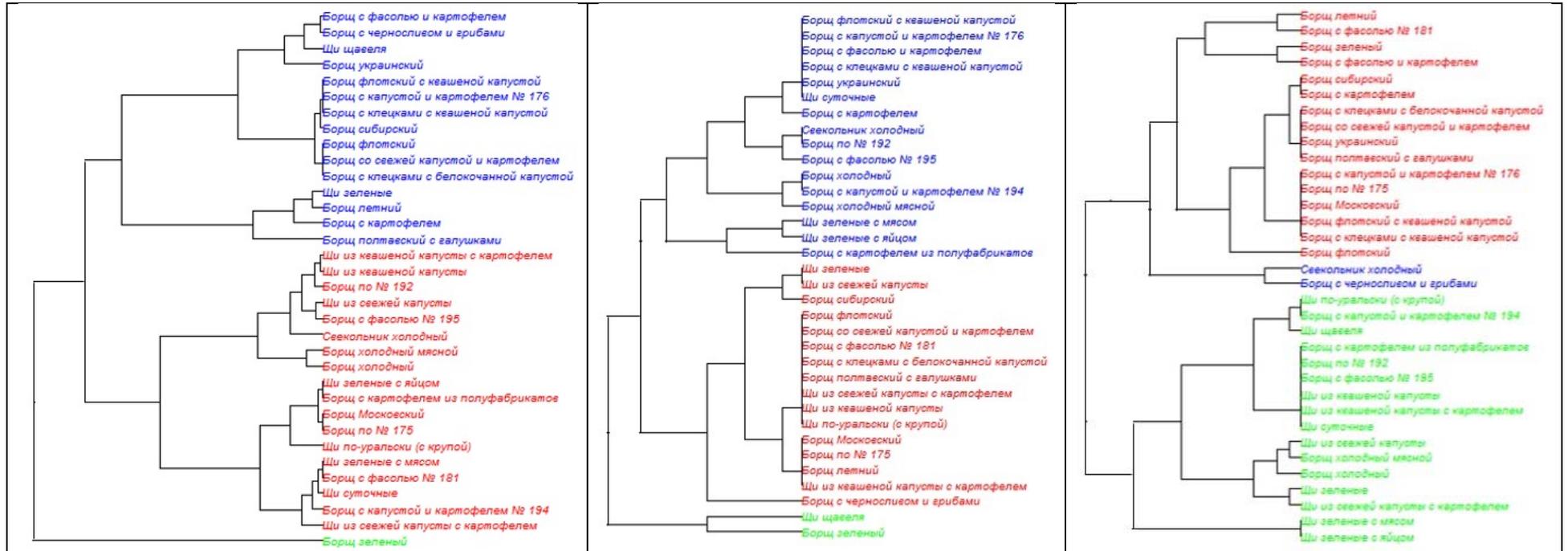


Рисунок 5 – Кластеризация фрагмента группы «Супы»

по признаку «Содержание калия»: (среднее значение по кластеру 24,8 мг, диапазон варьирования от 22 до 43 мг)

по признаку «Содержание кальция»: (среднее значение по кластеру 203,8 мг, диапазон варьирования от 172 до 248 мг)

по признаку «Содержание моно- и дисахаридов»: (среднее значение по кластеру 1,5 г, диапазон варьирования от 0 до 2,4 г)

В первый кластер вышло 7 наименований кулинарного блюда «Борщ», «Щи» с диапазоном варьирования от 17 мг до 21 мг и средним значением 18,9 мг. Во второй кластер было включено 24 наименования кулинарных блюд «Борщ», «Щи» с диапазоном варьирования от 22 мг до 42 мг и средним значением 24,8 мг. В третий кластер – 3 наименования кулинарных блюд «Борщ», «Щи» с диапазоном варьирования от 11 мг до 15 мг и средним значением 13,3 мг.

Детализацию о кулинарных блюдах, входящих в данный кластер, можем получить при нажатии на соответствующий кластер, например, на кластер № 1.

Таблица 1 – Результат кластеризации (детальная информация)

Кластеры	Количество по полю Супы	Среднее по полю Са, мг	Максимум по полю Са, мг	Минимум по полю Са, мг
<b>1</b>	<b>7</b>	<b>18,9</b>	<b>21,0</b>	<b>17,0</b>
Борщ № 192*	1	20,0	20,0	20,0
Борщ с капустой и картофелем № 194	1	17,0	17,0	17,0
Борщ с картофелем	1	21,0	21,0	21,0
Борщ с фасолью № 195	1	19,0	19,0	19,0
Борщ холодный	1	17,0	17,0	17,0
Борщ холодный мясной	1	18,0	18,0	18,0
Свекольник холодный	1	20,0	20,0	20,0
<b>2</b>	<b>24</b>	<b>24,8</b>	<b>42,0</b>	<b>22,0</b>
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>13,3</b>	<b>15,0</b>	<b>11,0</b>

\*Наличие технологической карты (ТК) блюда, отражающая рецептуру и основные пищевые характеристики данного блюда. В ТК показывается норма по расходу ингредиентов на изготовление блюда брутто и нетто (в расчёте на одну или несколько порций, на один или несколько килограмм), общий выход

Таким образом, возможен подбор блюд для питания людей с заболеваниями, при которых необходимо учитывать содержание кальция (Са) в диете.

На рисунке 6 (а, б) показаны ТК «Борщ с капустой свежей и картофелем» и «Борщ сибирский с фрикадельками».

Технологическая карта:  
**БОРЩ С КАПУСТОЙ СВЕЖЕЙ И КАРТОФЕЛЕМ**  
Борщ с капустой свежей и картофелем  
Номер по сборнику рецептов № 49/87

№№	Наименование продуктов	Норма расхода продуктов на 100 порций		Вес готового продукта в граммах
		брутто, кг	вес нетто, кг	
1	Свекла	5,0	4,8	
2	Капуста	2,5	2,3	
3	Картофель	2,7	2,5	
4	Морковь пассированная	0,687	0,687	6,8
5	Лук пассированный	0,747	0,747	7,4
6	Томат-паста	0,3	0,3	
7	Сахар-песок	0,25	0,25	
8	Лимонная кислота	0,012	0,012	
9	Сметана	0,5	0,5	
10	Специи (соль)	0,05	0,05	
11	Масло сливочное	0,2	0,2	
12	Вода	12,5	12,5	
Выход одной порции в граммах				250

Свеклу нарезают соломкой и тушат с добавлением томат-пасты, лимонной кислоты, масла сливочного и небольшого количества воды.  
В кипящую воду кладут нарезанные дольками или ломтиками картофель, нашинкованную капусту, доводят до кипения, добавляют тушеную свеклу, пассированные морковь, лук и варят борщ 10-15 минут.  
За 5-10 минут до окончания варки в борщ добавляют сахар, соль, заправляют прокипяченной сметаной

а)

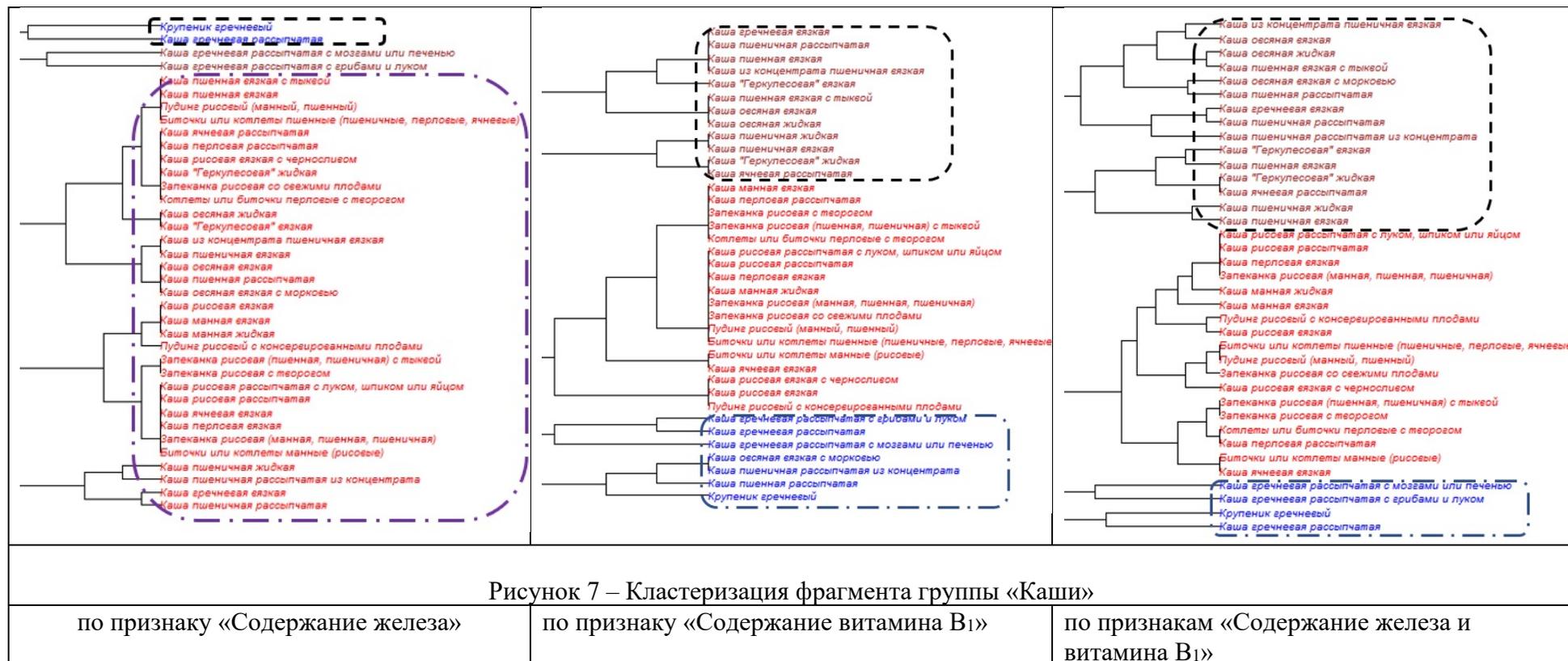
Технологическая карта:  
**БОРЩ СИБИРСКИЙ С ФРИКАДЕЛЬКАМИ**  
Борщ сибирский с фрикадельками  
Номер по сборнику рецептов № 51/87

№№	Наименование продуктов	Норма расхода продуктов на 100 порций		Вес готового продукта в граммах
		брутто, кг	вес нетто, кг	
1	Свекла	2,0	1,9	
2	Капуста	2,5	2,0	
3	Картофель	3,0	3,0	
4	Морковь пассированная	0,687	0,687	6,8
5	Лук пассированный	0,747	0,747	7,4
6	Томат-паста	0,3	0,3	
7	Чеснок	0,125	0,1	
8	Сахар-песок	0,25	0,25	
9	Лимонная кислота	0,004	0,004	
10	Сметана	0,5	0,5	5
11	Вода	20,0	20,0	200
12	Масло сливочное	0,2	0,2	2
Выход одной порции в граммах				250
<b>Фрикадельки</b>				
1	Говядина	-	2,3	23
2	Лук репчатый	0,25	0,2	2
3	Вода	0,2	0,2	2
4	Яйцо (штука)	4	-	4
Выход одной порции в граммах				20

Свеклу нарезают соломкой и тушат с добавлением томат-пасты, лимонной кислоты, масла сливочного и небольшого количества воды.  
В кипящую воду кладут нарезанные дольками или ломтиками картофель, нашинкованную капусту, доводят до кипения, добавляют тушеную свеклу, пассированные морковь, лук и варят борщ 10-15 минут.  
За 5-10 минут до окончания варки в борщ добавляют сахар, соль, заправляют прокипяченной сметаной.  
Для приготовления фрикаделек говядину пропускают через мясорубку 2-3 раза. Для приготовления фарша добавляют лук, сырые яйца, воду, соль и хорошо размешивают. Сформованные шарики весом 8-10 г припускают в бульоне до готовности, кладут в борщ при отпуске.

б)

Рисунок 6 – Технологические карты: а) технологическая карта «Борщ с капустой свежей и картофелем»; б) технологическая карта «Борщ сибирский с фрикадельками»

Таблица 2 – Результат кластеризации по полям «Каша» и «Содержание железа и витамина В<sub>1</sub>»

Кластеры	Количество по полю Каша	Среднее по полю Fe, мг.	Минимум по полю Fe, мг.	Максимум по полю Fe, мг.	Среднее по полю В <sub>1</sub> , мг.	Минимум по полю В <sub>1</sub> , мг.	Максимум по полю В <sub>1</sub> , мг.
1	15	1,03	0,60	1,70	0,08	0,05	0,11
2	4	3,38	2,30	4,40	0,14	0,12	0,16
3	18	0,45	0,20	0,70	0,02	0,01	0,04

Кластеризацию возможно проводить по нескольким признакам. На рисунке 7 представлен пример кластеризации фрагмента базы данных по двум показателям. Результат кластеризации по двум признакам представлен в таблице 2.

Так, например, при разработке рациона питания для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний, располагая общими научно-обоснованные принципами для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний и конкретизированными медико-биологическими требованиями, проведена кластеризация и получен перечень продуктов и блюд по категориям (салаты, первые, вторые блюда, гарнир и др.), которые могут быть использованы в проектируемом рационе питания.

В результате машинного (имитационного) эксперимента были получены альтернативные варианты рационов для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний, один из которых представлен на рисунке 8 с учетом выбранных факторов: студенты, в возрасте до 25 лет, большую часть времени проводят в вузе, и пр.

Завтрак	Белки, г	Жиры, г	Углеводы, г	Эн.цен., ккал	ПВ, %	Витамины							Минеральные вещества					Жирные кислоты		
						А, мкг	С, мг	В <sub>1</sub> , мг	В <sub>2</sub> , мг	В <sub>6</sub> , мг	РР, мг	Е, мг	Са, мг	Fe, мг	Р, мг	Mg, мг	К, мкг	НЖК	МНЖК	ПНЖК
1. Кабачки, фаршированные овощами	3,90	17,80	10,70	218,60	2,70	20,00	3,90	0,09	0,05	0,13	1,20	6,50	136,00	7,00	83,00	14,00	4,78	6,51	4,18	0,43
2. Печенье, обогащенное лецитином	2,52	0,66	16,11	72,90	0,00	0,00	0,00	0,06	0,09	0,03	1,62	0,00	24,42	0,99	0,00	0,00	0,00	0,11	0,09	0,37
3. Сок персиковый	0,60	0,00	33,00	134,40	1	0,00	12,00	0,08	0,04	0,10	1,20	1,60	10,00	0,40	30,00	24,00	4,00	0,00	0,00	0,00
<b>Итого:</b>	<b>7,02</b>	<b>18,46</b>	<b>59,81</b>	<b>425,90</b>	<b>3,70</b>	<b>20,00</b>	<b>15,90</b>	<b>0,23</b>	<b>0,18</b>	<b>0,26</b>	<b>4,02</b>	<b>8,10</b>	<b>170,42</b>	<b>8,39</b>	<b>113,00</b>	<b>38,00</b>	<b>8,78</b>	<b>6,62</b>	<b>4,27</b>	<b>0,80</b>
Обед	Белки, г	Жиры, г	Углеводы, г	Эн.цен., ккал	ПВ, %	Витамины							Минеральные вещества					Жирные кислоты		
						А, мкг	С, мг	В <sub>1</sub> , мг	В <sub>2</sub> , мг	В <sub>6</sub> , мг	РР, мг	Е, мг	Са, мг	Fe, мг	Р, мг	Mg, мг	К, мкг	НЖК	МНЖК	ПНЖК
1. Салат из редиса	2,50	5,00	2,90	66,60	1,00	50,00	13,00	0,10	0,02	0,09	0,10	0,30	56,00	1,00	61,00	25,00	5,98	1,99	2,83	8,74
2. Суп-пюре из шпината	5,70	6,00	12,00	124,00	1,80	30,00	20,40	0,30	0,12	0,09	0,90	2,40	183,00	12,60	312,00	99,00	4,26	3,15	1,65	0,09
3. Мясное тушеное с черносливом	17,60	12,30	33,70	316,00	4,50	0,00	3,20	1,10	0,07	0,31	2,80	0,18	27,40	1,70	99,13	13,02	5,94	6,40	6,01	0,43
4. Макароны отварные	5,40	0,60	25,00	127,00	1,80	0,00	0,00	0,02	0,06	0,23	0,60	0,80	10,00	0,90	36,00	9,00	2,07	6,23	3,36	0,71
5. Хлебобулочное изделие "Тонус"	7,20	0,54	25,20	129,60	11,40	0,00	0,00	0,30	0,50	0,03	4,30	0,00	26,40	7,02	342,00	87,60	0,00	0,11	0,09	0,37
6. Кисель из кураги	0,80	0,00	25,80	106,40	3,60	0,00	0,40	0,04	0,02	0,00	0,40	1,00	32,00	0,60	26,00	16,00	2,00	0,00	0,00	0,00
<b>Итого:</b>	<b>39,20</b>	<b>24,44</b>	<b>124,60</b>	<b>869,60</b>	<b>24,10</b>	<b>80,00</b>	<b>37,00</b>	<b>1,86</b>	<b>0,79</b>	<b>0,75</b>	<b>9,10</b>	<b>4,68</b>	<b>334,80</b>	<b>23,82</b>	<b>876,13</b>	<b>249,62</b>	<b>20,25</b>	<b>17,88</b>	<b>13,94</b>	<b>10,34</b>
<b>ВСЕГО:</b>	<b>46,22</b>	<b>42,90</b>	<b>184,41</b>	<b>1295,50</b>	<b>27,80</b>	<b>100,00</b>	<b>52,90</b>	<b>2,09</b>	<b>0,97</b>	<b>1,01</b>	<b>13,12</b>	<b>12,78</b>	<b>505,22</b>	<b>32,21</b>	<b>989,13</b>	<b>287,62</b>	<b>29,03</b>	<b>24,50</b>	<b>18,21</b>	<b>11,13</b>
<b>Соотношение</b>						<b>Соотношение</b>														
	<b>белок</b>	<b>жир</b>	<b>углеводы</b>															<b>НЖК</b>	<b>МНЖК</b>	<b>ПНЖК</b>
	<b>1,08</b>	<b>1,00</b>	<b>4,30</b>															<b>1,35</b>	<b>1,00</b>	<b>0,61</b>

Рисунок 8 - Рацион питания для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний, рекомендуемый для студенческой столовой и рассчитанный на время пребывания студента в вузе (2/3 от суточной потребности организма)

Таким образом, база данных является ценным инструментом для анализа, систематизации данных (информации) и получения выборок по определённому дескриптору. Получив в процессе компьютерного моделирования рецептуру продукта, возможно произвести расчет дополнительных показателей, например, характеризующих качественные характеристики белкового компонента.

#### 4.2 Расчет нутриентной сбалансированности поликомпонентных продуктов

На примере качественной оценки сбалансированности аминокислот в эмульгированном мясном продукте (сардельки) рассмотрим работу компьютерной подсистемы. Исходные данные, используемые при расчете, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Рецептура эмульгированного мясного продукта комбинированного состава

Наименование сырья и ингредиентов	Рецептуры, %	
	Контроль	Опыт
Говядина жилованная 2 сорта	48	35
Свинина полужирная	30	23
Свинина жилованная жирная	20	20

Крахмал	2	2
Соевый белок	-	4
Вода (на гидратацию) соевого белка	-	16
ИТОГО:	100	100

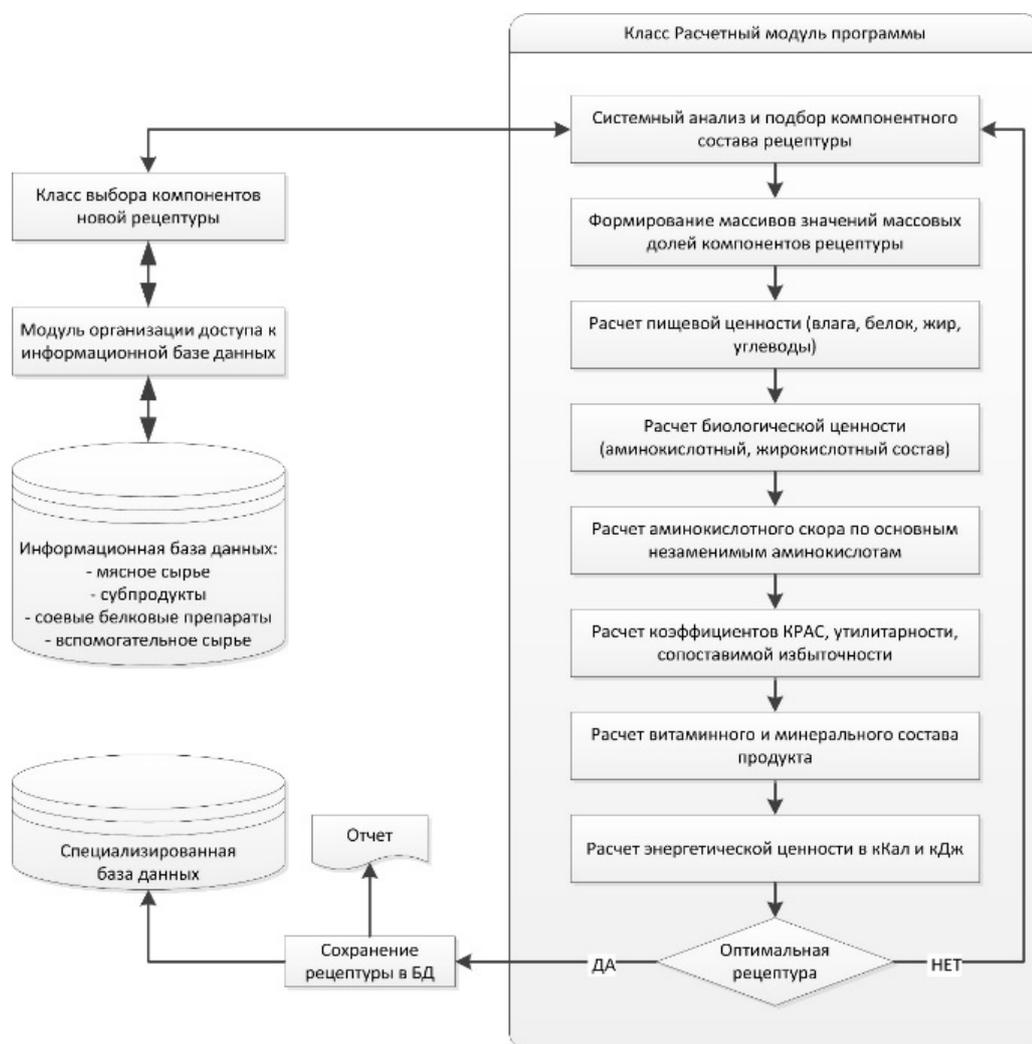


Рисунок 9 – Функциональная схема обобщенного алгоритма Расчетного модуля

На рисунке 9 представлен алгоритм расчетного модуля компьютерной системы, заключающийся в выборе из базы данных компонентов по признакам: химический состав, функциональные свойства, способные при варьировании их содержания в рецептуре наиболее существенно влиять на баланс жир: белок, структурно-механические свойства получаемой системы, органолептические показатели готового продукта (с применением кластеризации или без) и последующей формализации массовых долей каждого компонента или диапазон варьирования в рецептуре комбинированного мясного продукта.

В результате работы Расчетного модуля система выдает в экранной форме (рисунок 10 а, б) следующую информацию: массовые доли влаги, белка, жира, углеводов, аминокислотный скор незаменимых аминокислот, коэффициенты КРАС, утилитарности, сопоставимой избыточности, биологическая и энергетическая ценность проектируемого продукта (контроль и опыт) и другие показатели.

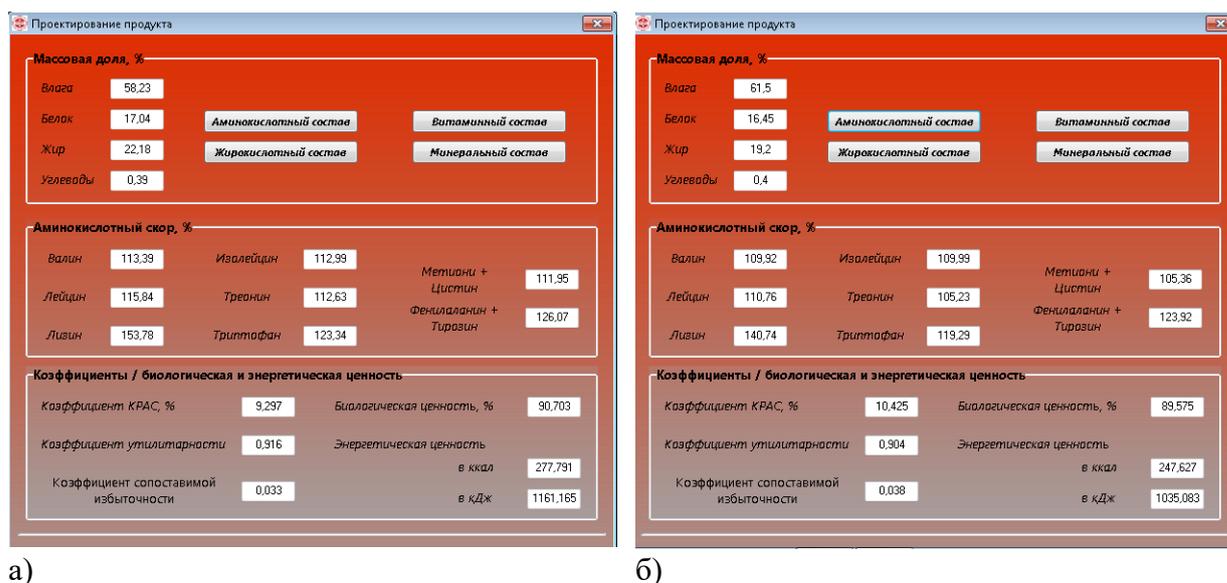


Рисунок 10 – Окно проектирования: а-контроль, б-опыт

Как видно из рисунка 9 а, б пользователь также может дополнительно получить информацию об аминокислотном, жирнокислотном, витаминном и минеральном составе продукта. Для этого необходимо нажать на соответствующие кнопки. В таблице 4 представлен аминокислотный состав мясного комбинированного продукта.

Таблица 4 – Сравнительные данные аминокислотного состава эмульгированного мясного продукта комбинированного состава, по среднему значению

Показатели	Контроль (расчетные данные)	Контроль (экспериментальные данные)	Опыт (расчетные данные)	Опыт (экспериментальные данные)	Эталон Белок ФАО/ВОЗ, % к белку
Незаменимые аминокислоты, г/100 г белка					
Валин	5,67	5,60	5,50	5,43	5,00
Лейцин	8,11	7,73	7,75	7,39	7,00
Лизин	8,46	6,54	7,74	5,98	5,50
Изолейцин	4,52	4,34	4,40	4,22	4,00
Треонин	4,51	4,42	4,21	4,13	4,00
Триптофан	1,23	1,21	1,19	1,17	1,00
Метионин+Цистин	3,92	3,88	3,69	3,66	3,50
Фенилаланин+Тирозин	7,56	7,39	7,44	7,28	6,00

На примере сравнения исследования аминокислотного состава расчетных и экспериментальных данных получены адекватные показатели в пределах статистической погрешности. Использование программы расчета нутриентной адекватности состава поликомпонентных мясных продуктов позволяет осуществлять проектирование и оптимизацию рецептов мясных продуктов без осуществления трудоемких и дорогостоящих операций на производстве при проведении контрольных (опытных) выработок продукции. При этом оптимизация рецептов осуществляется не только по химическому составу, но и с прогнозным расчетом аминокислотного, жирнокислотного, витаминного и минерального состава. Программа также позволяет рассчитывать биологическую и энергетическую ценность мясного продукта при использовании более дешевого сырья и ингредиентов при снижении содержания мясного белка.

Наряду с этим программа рассчитывает не только широко используемые в практике показатели (КРАС, коэффициент утилитарности, биологическая ценность), но и определяет индекс незаменимых аминокислот (ИНАК), рассчитывает показатель Карпаца-Линдера-

Варги, показатель аминокислотного соответствия белка в геродиетическом продукте, предложенный Юдиной С.Б. с соавторами.

На примере пяти мясорастительных композиций для геродиетического питания (таблица 5) рассмотрены перечисленные показатели (таблица 6).

Таблица 5 – Рецептурный состав мясорастительных композиций

Ингредиенты	Рецептурная композиция геродиетической направленности				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Говядина 1 с.	30	40	-	-	30
Конина	-	-	50	50	-
Мясная обрезь говяжья	40	-	-	-	40
Мясо голов	-	20	-	-	-
Крупа кукурузная	19,4	-	-	-	19,95
Толокно овсяное	8,35	-	1,6	-	-
Геркулес	-	-	-	-	8,55
Крупа рисовая	-	-	-	6	-
Гречиха	-	8	-	-	-
Пшено	-	-	-	14	-
Яичный порошок	-	-	6,4	-	-
Яйцо куриное	-	-	-	20	-
Капуста белокочанная	-	-	32	-	-
Морковь красная	2,25	32	10	10	1,5

Таблица 6 – Качественные показатели белка и аминокислотного состава

Ингредиенты	Рецептурная композиция геродиетической направленности				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Незаменимые аминокислоты, г/100 г белка					
Изолейцин	4,15	3,76	4,35	4,38	4,06
Лейцин	8,65	7,32	7,06	7,74	8,62
Лизин	6,31	7,03	6,67	6,68	6,38
Метионин+Цистин	3,56	3,35	3,64	3,81	3,62
Фенилаланин+Тирозин	6,97	6,22	6,67	6,98	7,09
Треонин	3,61	3,43	3,07	3,21	3,72
Триптофан	0,94	0,93	0,96	1,04	0,96
Валин	5,39	4,99	4,88	4,93	5,36
Лимитирующая аминокислота (скор)	Треонин	Треонин	Треонин	Треонин	Треонин
КРАС, %	16,25	14,79	25,30	25,95	14,30
БЦ, %	83,75	85,21	74,70	74,05	85,70
Коэффициент утилитарности, доли ед.	0,82	0,83	0,74	0,75	0,84
Индекс незаменимых аминокислот (ИНАК), доли ед.	1,06	1,00	1,01	1,05	1,07
К (аминокислотное соответствие белка в геродиетическом продукте), доли ед.	0,63	0,55	0,73	0,73	0,61

Согласно набору общепринятых показателей, предложенным Роговым И.А. и Липатовым Н.Н. (мл.), рецептуры 2 и 5 наиболее оптимальны (биологическая ценность в этих рецептурах приблизительно равна 85 %). Однако, для продукта геродиетической направленности показано целесообразность показателя аминокислотного соответствия белка (Юдина С.Б. с соавторами, 1999), накладываемый на соотношение массовых долей таких аминокислот, как метионин, цистин, триптофан, лизин, а также с учетом роли изолейцина, лейцина, фенилаланина и тирозина, как геронтологических конкурентов триптофана. Поэтому оптимальными являются рецептуры 3 и 4.

### **Глава 5 Проектирование пищевых продуктов персонализированного питания с применением технологии «цифровых двойников»**

Для разработки «умных» пищевых продуктов, оказывающих функциональное воздействие на организм человека, нивелирующих риски возникновения заболевания, необходимо учитывать множество различных факторов (физико-химических, структурно-механических, функционально-технологических и т.д.). «Разыгрывание» (имитация) всех возможных структурных соотношений и ограничений возможно только с применением виртуальной модели продукта.

Термин цифровой двойник имеет множество определений. Для «цифрового двойника» пищевого продукта актуально, объективно и реалистично определение – «использование цифровой копии физической системы для оптимизации в реальном времени» (Söderberg et al., 2017)

В главе описан подход к построению «цифрового двойника» пищевого продукта на примере *мясного продукта антисклеротического действия*.

*Первый этап* связан с анализом сырья.

При проектировании мясного продукта, предназначенного для диетического питания с целью снижения риска развития и профилактики гиперлипидемий и атеросклероза составлена параметрическая модель продукта (таблица 7). К критическим свойствам, однозначно определяющим возможность использования сырья для профилактики атеросклероза, является наличие (присутствие) тканеспецифичных пептидов, в том числе биомаркеров Apo 1 или пре Apo A 1 (Kotenkova et al, 2015). Существенные свойства определяют пищевую ценность продукта (содержание белка не менее 18 % и содержание жира не выше 15 %), а также структурно-механические и функционально-технологические свойства разрабатываемого продукта. Второстепенные свойства оценивают органолептические показатели разрабатываемого продукта, их значимость (весовой приоритет) определяют с использованием метода анализа иерархий

Таблица 7 - Параметрическая модель мясного продукта антисклеротического действия

Группа свойств	№	Наименование параметра
Критические свойства	1	Содержание тканеспецифичных пептидов
	2	Содержание Apo 1 или Содержание пре-Apo A-1
Существенные свойства	3	Содержание белка: аминокислотный состав – полноценный, неполноценный
	4	Содержание жира: насыщенные жирные кислоты, ненасыщенные жирные кислоты
	5	Содержание золы: макроэлементы, микроэлементы
	6	Содержание витаминов: водорастворимых, жирорастворимых
	7	Содержание воды: свободная, прочно связанная
	8	Содержание углеводов: усвояемые, неусвояемые

Малосущественные свойства	9	Энергетическая ценность: степень биологического окисления
	10	Структурно-механические свойства
	11	Внешний вид
	12	Консистенция
	13	Вкус
	14	Запах
	15	Цвет
	16	Сочность

В результате работы оператора с базой данных получаем перечень сырьевых компонентов животного и растительного происхождения, которые могут быть использованы в рецептуре разрабатываемого продукта с учетом граничных условиях (применяем кластеризацию). Исходя из начальных условий для мясного сырья – содержание белка не менее 18 %; содержание жира не более 15 %; присутствие тканеспецифичных пептидов с молекулярными массами  $809,4 \pm 1,0$ ;  $776,5 \pm 1,0$ ;  $765,6 \pm 1,0$ ;  $739,2 \pm 1,0$ ;  $710,8 \pm 1,0$ ;  $229,2 \pm 1,0$ ;  $162,1 \pm 1,0$ ;  $156,0 \pm 1,0$ ;  $148,1 \pm 1,0$ ;  $140,2 \pm 1,0$  и  $133,1 \pm 1,0$  кДа; присутствие Апо 1 (участвует в формировании липопротеинов высокой плотности) или присутствие пре-Апо А-1 (участвует в подавлении окислительного стресса) – были выбраны в качестве основного сырья: свиная аорта, сердце свиное.

Ориентируясь на медико-биологические требования к данной группе людей при анализе данных особое внимание обращали на такие аминокислоты, как триптофан, лизин, метионин+цистин. Жирнокислотный состав оценивали по соотношению насыщенных, мононенасыщенных и полиненасыщенных жирных кислот, а также содержание линолевой кислоты.

*Второй этап* связан с математическим моделированием комбинированного пищевого продукта и решением задачи структурной и рецептурной оптимизации.

В процессе моделирования определяется диапазон варьирования массовой доли каждого ингредиента рецептуры таким образом, чтобы получаемый продукт нивелировал патологические процессы и снижал риск развития гиперлипидемий и атеросклероза, а также не мог отрицательно воздействовать на органолептические свойства готового продукта (на данном шаге также определяется целевая функция).

Варьируя структурными соотношениями рецептурных составляющих с учетом заданных ограничений, мы видим, как изменяется пищевая и биологическая ценности продукта, отношение между белком и жиром и т.д.

Известно, что мясное сырье многокомпонентно, изменчиво по составу и свойствам, что может приводить к значительным колебаниям в качестве готовой продукции. В связи с этим особенно важное значение приобретает знание функционально-технологических свойств (ФТС) различных видов основного сырья и их компонентов, понимание роли вспомогательных материалов и характера изменения ФТС под воздействием внешних факторов.

*Третий этап* связан с проектированием структурных форм пищевого продукта. Оптимальная рецептура пищевого продукта на I этапе не гарантирует превращения в процессе технологической обработки в устойчивую систему с требуемыми структурно-механическими, функционально-технологическими показателями. Таким образом, для реализации второго этапа необходимо располагать сведениями о фактических значениях ФТС основного сырья, вспомогательных ингредиентов, кинетике протекания биохимических и коллоидно-химических процессов (в первую очередь – структурирования) в многокомпонентных пищевых системах, аналитическими и эмпирическими зависимостями, характеризующими основные закономерности поведения гетерогенных дисперсных систем при варьировании физико-химических факторов.

Составлен банк математических моделей, характеризующих функционально-технологические свойства многокомпонентного продукта: 1) водосвязывающей способности; 2) жиросвязывающей способности; 3) водоудерживающей способности; 4) предельного напряжения сдвига; 5) динамической вязкости; 6) плотности; 7) показателя активной кислотности и т.д.

В базах данных о пищевых продуктах должна содержаться информация о функционально-технологических свойствах сырья животного и растительного происхождения.

Оценка эффективности разработанного пищевого продукта возможна лишь при анализе многочисленных разнородных показателей. Множество показателей удобно обобщать (свертывать) в единый количественный безразмерный показатель (*функционал качества*). Анализ и проверка оптимальности различных структурных вариантов осуществляется на основе комплексной имитационной модели пищевого продукта, т.е. «цифрового двойника».

Таким образом, «Цифровой двойник» пищевого продукта представляет собой виртуальную модель этого продукта, а именно его математическую модель (имитационную модель), сочетающую в себе все многообразие факторов от химического состава, функционально-технологических свойств до органолептических показателей.

Используя «цифровой двойник» пищевого продукта перед запуском его в производство, можно проанализировать пищевую, биологическую и энергетическую ценность и др. характеристики продукта. Виртуальная имитационная модель позволит в режиме реально времени реагировать на изменения в физико-химическом составе используемого сырья или замене основного, или вспомогательного сырья, и в соответствии с этим корректировать рецептуру для получения продукта с заданным химическим составом и гарантированным качеством.

Наряду с этим, «цифровой двойник» позволяет посмотреть результат технологической операции (процесса), увидеть, что будет при разных температурных режимах. Известно, что в процессе производства мясных изделий наиболее критичным в получении гарантированного качества является этап тепловой обработки. На примере расчета термограмм тепловой обработки мясных изделий разработан «цифровой двойник» технологической операции варки вареной колбасы. Для этого используем математическую модель, описывающую нестационарное поле температур – параболическое уравнение теплопроводности Фурье, в цилиндрических координатах с переменными коэффициентами, с заданными начальными условиями (начальное поле температур в продукте перед очередным этапом обработки):

$$\frac{dU(r,t)}{dt} = a \frac{d^2U(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU(r,t)}{dr} \quad 0 < r < R, \quad 0 < t < t_k \quad (7)$$

Начальные условия (температура продукта до начала термообработки):

$$U(r,t) = U_0 = \text{const} \quad t = 0 \quad 0 < r < R \quad (8)$$

Граничные условия (на боковой поверхности изделия):

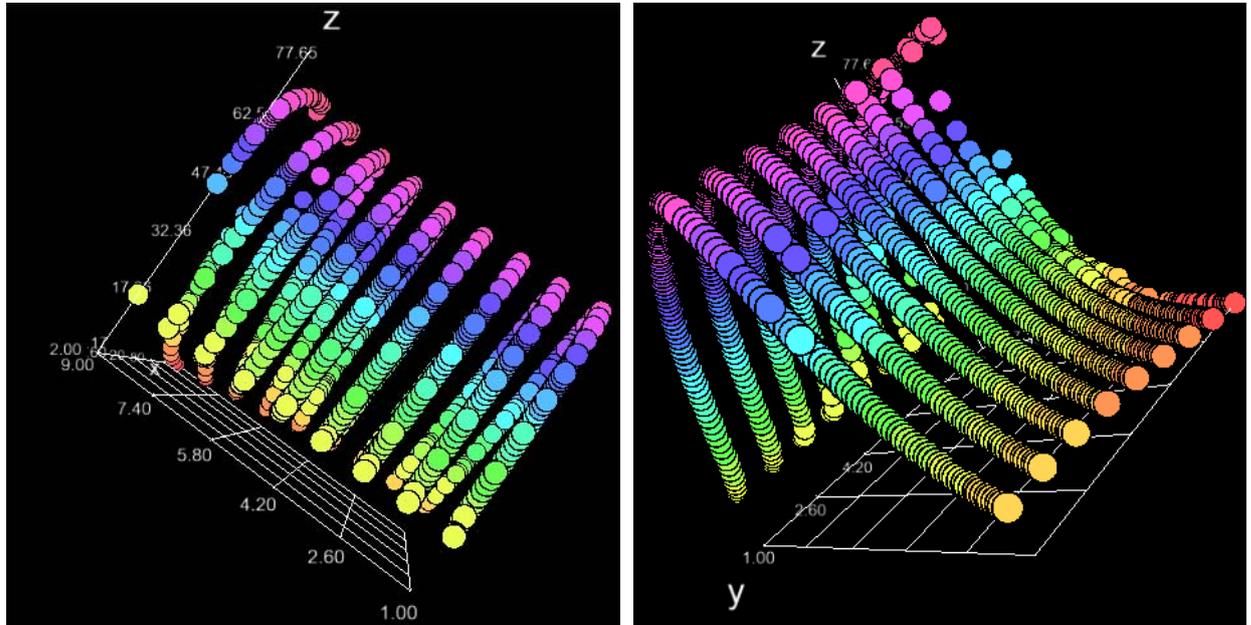
$$\frac{dU(r,t)}{dr} = S U_{cp}(t) - U(R,t), \quad S = \frac{\alpha}{\lambda}, \quad r = R, \quad 0 < t < t_k \quad (9)$$

Условия симметрии геометрии и нагрева в центре батона

$$\frac{dU(0,t)}{dr} = 0, \quad U(0,t), \quad r = 0, \quad 0 < t < t_k \quad (10)$$

где  $U$  – текущая температура продукта;  $U_0$  – начальная температура продукта;  $U_{cp}$  – температура греющей среды;  $U_k$  – конечная температура продукта;  $R$  – внешний радиус изделия;  $r$  – радиальная координата;  $a$  – коэффициент теплопередачи;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

В результате решения в среде Jupyter Notebook на языке программирования R мы получили 3D-модель распределения температур в течение технологического процесса и построения поля температур внутренних точек внутри батона вареной колбасы (рисунок 11 а, б). В качестве исходных данных взяты коэффициент температуропроводности  $a=0.0015$ ; коэффициент теплоотдачи  $\alpha=0.004$ ; коэффициент теплопроводности  $\lambda=0.004$ ; начальная температура  $U_0=15$ ; продолжительность процесса  $T_m=14400$  с. (или 240 мин, или 4 часа); шаг разбиения по времени  $l=30$  с.; радиус батона  $r=3$ ; число точек разбиения по радиусу  $n=6$ .



а)

б)

Рисунок 11 – 3D-модель распределения температур в течение технологической операции варки вареной колбасы (а, б – разный угол просмотра)

$Z$  – время;  $X$  – радиус батона;  $Y$  – время.

Поле температур показывает распределение температуры по времени ( $t$ ), как на поверхности колбасного изделия, так и внутри. Визуализация позволяет посмотреть «Поле температур» под любым углом (картинку можно поворачивать), и оценивать степень прогрева батона в любой точке, что очень важно при выборе нового термического оборудования. Наряду с визуализацией выдаются табличные значения распределения температуры по времени протекания технологического процесса.

Применение математического аппарата при проведении научно-исследовательских работ способствует не только более глубокому изучению процесса, установлению закономерностей и прогнозированию результатов, но и усилению объективизации процесса принятия обоснованных решений.

## Глава 6 Анализ видеозображений с применением нейросетевых технологий

Анализ гистологических срезов требует высокой квалификации специалиста, что приводит к риску субъективизации результата. Показана возможность цифровизации процесса качественной и количественной оценки гистологических препаратов. Использование искусственной нейронной сети (ИНС) дает возможность устранить наиболее сложную часть разрешения проблемной ситуации – формализацию задачи и построение математического представления путем обучения сети на экспериментальных данных, т.е. удастся избежать «идеализации» полученных результатов.

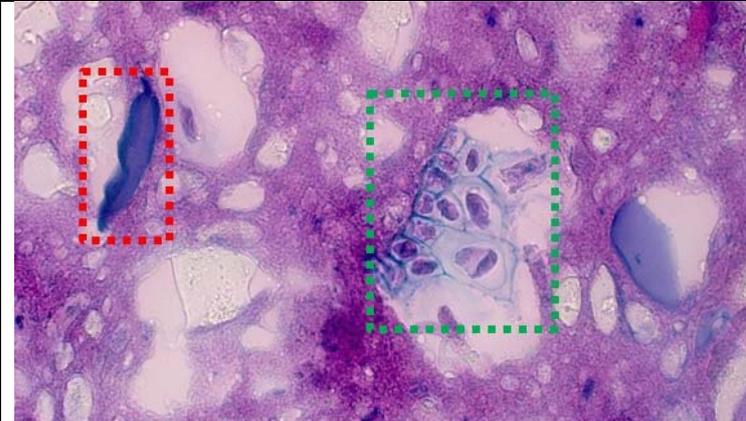
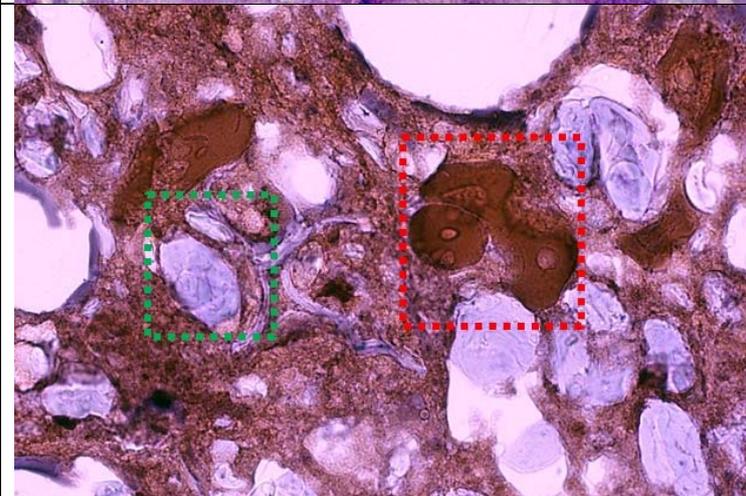
**6.1. Применение технологии машинного обучения к методам контроля (на примере анализа гистологических срезов)**

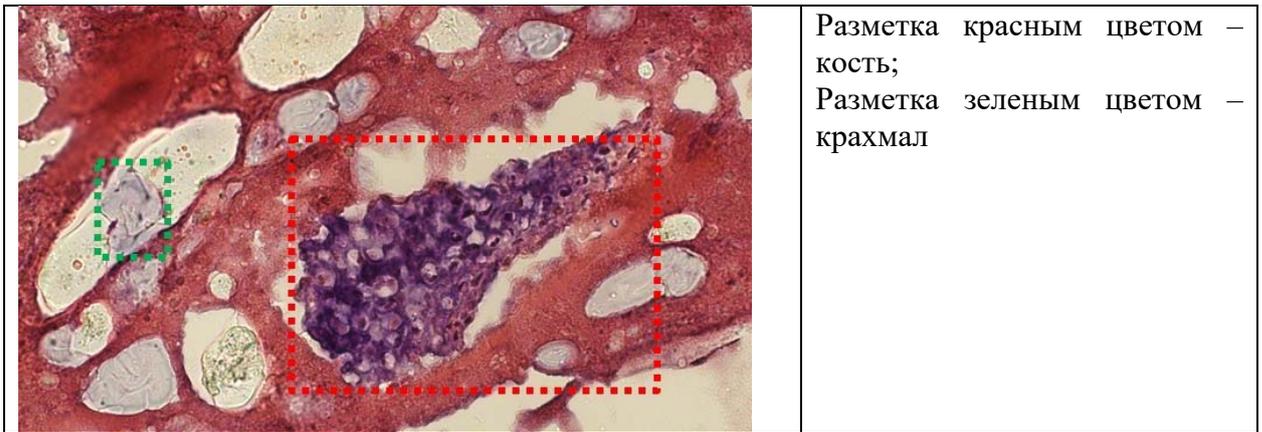
Идентификация состояния сложной мясной системы в реальном времени в условиях неопределенности и риска принятия решения усложняется при недостаточной и нечеткой информации, в качестве решения нами выбран подход интеллектуализации микроструктурного анализа на основе методов искусственного интеллекта с использованием нейросетевых технологий.

Интеллектуальная функция нейросетевого модуля заключается в уточнении и коррекции первоначально установленных характеристик связей между контролируруемыми параметрами состояния и цели, а также распознавании и классификации аномальных ситуаций в системе с накоплением достоверных количественных и качественных оценок, по которым формируется ситуационный классификатор (разметка цифровых снимков гистологических срезов с подробным описанием) и база знаний системы.

Использование алгоритмов машинного обучения требует репрезентативной выборки – DataSet – для тренировки, обучения нейронной сети. Для получения DataSet гистологических срезов мясного сырья, совместно с гистологами были размечены цифровые снимки гистологических срезов. В качестве примера, в таблице 8 представлена разметка незаявленных компонентов в составе вареной колбасы.

Таблица 8 – Разметка незаявленных компонентов на гистологических срезах

	<p>Разметка красным цветом – каррагинан; Разметка зеленым цветом – растительная камедь</p>
	<p>Разметка красным цветом – соевый изолят; Разметка зеленым цветом – крахмал</p>



На основе проведенного системного анализа выделены: 1)  $X$  – входная переменная, изображение среза мясной продукции в формате jpeg; 2)  $Y$  – выходная переменная, результат определения наличия и вида фальсификата, символического типа из заданного множества; 3)  $U$  – векторная переменная, содержащая значения параметров, характеризующих информацию о виде мясной продукции, типам фальсификатов, требования к процедурам обработки изображения и принятия решений (рис. 12).



Рисунок 12 – Схема процесса определения наличия фальсификата

В связи с этим составлены производственные правила идентификации неизвестного объекта на гистологическом препарате. Например, *Если частицы округлые, с отверстиями внутри, имеют гомогенную стенку, форму бублика, гантели или цветка, То – соевый изолированный белок.*

Обучаемая нейронная сеть способна накапливать знания на основе текущих данных и онтологии событий и адаптироваться к ситуации. В качестве обучающего множества используются гистологические препараты с «включениями» и без (контрольный образец), которые необходимо идентифицировать. На каждый вид «включения» представлено не менее 10 вариантов гистологических препаратов. Обучение сети начинается с предъявления очередного изображения из обучающего множества (DataSet) и соответствующей реакции нейронной сети. При этом сигналы проходят последовательно от слоя к слою и на последнем формируются реальные выходные сигналы. Сравнение их с желаемыми значениями позволяет изменять веса связей нейронов в направлении минимизации ошибки для данного образца, который будет использоваться на последующих шагах настройки. Таким образом, обучающее правило позволяет обеспечить настройку весов связей для каждого образца из обучающего множества.

Блок-схема обработки изображений для автоматизации определения наличия фальсификации мяса представлена на рис. 13. На вход подается изображение среза мяса  $X$ , которое далее подвергается обработке для удаления шумов, оптимизации палитры. Последовательное выполнение этапов позволяет получить обоснованное решение о наличии или отсутствии определенных видов фальсификатов мясной продукции.



Рисунок 13 – Блок-схема обработки изображений

## 6.2. Агентные и нейросетевые технологии в ситуационном моделировании технологических систем

Развитие **информационной технологии** идентификации и прогнозирования состояния сложной технологической системы в реальном времени связано с рациональным сочетанием прикладной математической статистики с анализом нечетких данных и самообучения на основе методов искусственного интеллекта, агентных и нейросетевых технологий.

Самообучающиеся **интеллектуальные агенты (ИА)**, способны накапливать знания на основе текущих данных и онтологии событий в процессе взаимодействия с другими агентами и окружающей средой, адаптироваться к ситуации, выбирать стратегию достижения выбранной цели и оценивать степень ее достижения.

Общий алгоритм поведения интеллектуального агента включает идентификацию ситуации, оценку собственного состояния и коррекцию цели с последующей рефлексивной реакцией или осмысленным (интеллектуальным) принятием решения в направлении достижения цели. Критерием интеллектуальности агента является степень полноты и глубины априорных знаний, стратегий обучения и алгоритмов принятия решения в условиях неопределенности, риска и конфликта.

Параметрическое описание агента включает множество целей и базу знаний в определенной области, вектор характеристик его состояния; банк моделей и стратегий поведения, описание внешних связей с агентами и средой.

**Задача обучения агента распознаванию образов** заключается в построении поверхности, разделяющей многомерное пространство на области, соответствующие определенным классам. Построение проводится на основе предъявления некоторого числа объектов (образов), принадлежащих этим классам. Алгебраически обучение связано с построением по показам образов некоторой разделяющей функции  $y = f(X)$ , где  $X$  –  $n$ -мерный вектор, описывающий образ (ситуацию), а  $y$  – величина, определяющая класс, к которому принадлежит образ (рисунок 14).

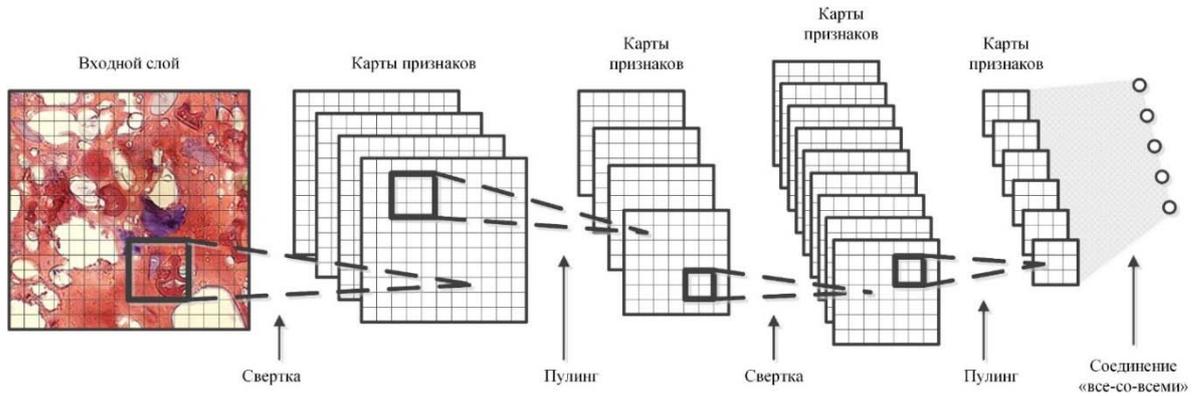


Рисунок 14 – Нейросетевая структура обучения интеллектуального агента

В качестве **алгоритма обучения** агента выбирается градиентный метод обратного распространения ошибки (рисунок 15).

---

#### Алгоритм SAG (Stochastic Average Gradient)

---

**Исходные данные:** выборка  $X^l$ , темп обучения  $h$ , темп забывания  $\lambda$

**Результат:** вектор весов  $w$

1. Инициализировать веса  $w_j, j = \overline{1, n}$
  2. Инициализировать градиенты  $G_i = \nabla F_i(w_i), i = \overline{1, l}$
  3. Инициализировать оценку функционалу  $Q = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l F_i(w)$
  4. **повторять**
  5. выбрать объект  $x_i$  из  $X^l$  случайным образом
  6. вычислить потерю  $\delta_i = F_i(w)$
  7. вычислить градиент  $G_i = \nabla F_i(w)$
  8. сделать градиентный шаг  $w = w - h \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l G_i$
  9. оценить функционал  $\bar{Q} = \lambda \delta_i + (1 - \lambda) \bar{Q}$
  10. **пока** значение  $Q$  и/или веса  $w$  не сойдутся
- 

Рисунок 15 – Алгоритм градиентного метода обратной ошибки

Фрагмент реализации программного кода представлен на рисунке 16.

```

for i in range(max_iters):
    dW = 0 # Resetting the accumulators
    dB = 0
    for j in range(m):
        # 1. Iterate over all examples,
        # 2. Compute gradients of the weights and biases in w_grad and b_grad,
        # 3. Update dW by adding w_grad and dB by adding b_grad,
    W = W - alpha * (dW / m) # Update the weights
    B = B - alpha * (dB / m) # Update the bias
return W, B # Return the updated weights and bias.

```

Рисунок 16 – Листинг кода на Python

График обучения сверточной нейронной сети (CNN) с двумя слоями свертки (Convolutional, C-Layer) и пулинга (подвыборки) (Subsampling, S-Layer), которые чередуются друг за другом, представлен на рисунке 17. Использовалась функция активации ReLU. В качестве обучающего множества использовались гистологические препараты с «включениями» и без (контрольный образец), которые необходимо было идентифицировать. На каждый вид «включения» представлено не менее 10 вариантов гистологических препаратов.

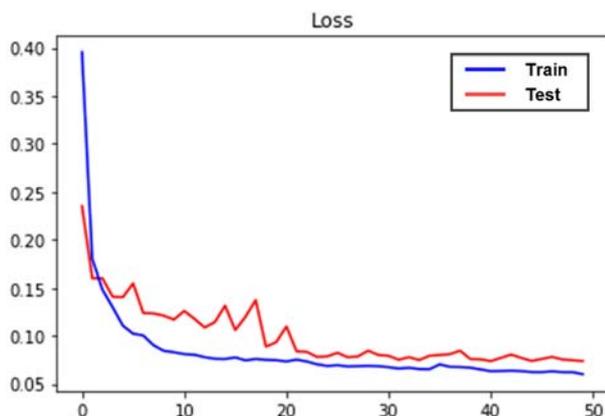


Рисунок 17 – График обучения сверточной нейронной сети (изменение потерь тестовой и обучающейся выборки по эпохам)

Работа алгоритма обучения для настройки нейронной сети показана на двух примерах (таблица 9, 10). На вход подается гистологический срез в цифровом формате, необходимо было определить наличие фальсификата.

Таблица 9 – Сигналы ИНС при подаче тестовой ситуации на ее входы

Номер итерации	Вектор состояния			Вектор выходов			$\ \vec{y}^{(q+1)} - \vec{y}^{(q)}\ $
	$s_{21}^{(q)}$	$s_{22}^{(q)}$	$s_{23}^{(q)}$	$y_{21}^{(q)}$	$y_{22}^{(q)}$	$y_{23}^{(q)}$	
1	6,00	2,00	7,00	4,50	2,00	4,50	-
2	2,55	-0,70	2,55	2,55	0,00	2,55	11,61
3	1,79	-1,53	1,79	1,79	0,00	1,79	1,17
4	1,25	-1,07	1,25	1,25	0,00	1,25	0,57
5	0,87	-0,75	0,87	0,87	0,00	0,87	0,28
6	0,61	-0,52	0,61	0,61	0,00	0,61	0,14
7	0,43	-0,37	0,43	0,43	0,00	0,43	0,07

Как видно из таблицы 9, критерий останова цикла возврата сигнала по обратным связям выполнен после 7-й итерации (желтый цвет в таблице, при значении 0,07). Кроме этого, значения в таблице наглядно показывают, что ИНС не может отдать предпочтение 1-м и 3-м классам уже на 2-й итерации (зеленый цвет в таблице, значения равнозначные). Таким образом в гистологическом срезе обнаружен фальсификат, но нейронная сеть не смогла определить вид фальсификата.

Таблица 10 – Сигналы ИНС при подаче тестовой ситуации на ее входы

Номер итерации	Вектор состояния			Вектор выходов			$\ \vec{y}^{(q+1)} - \vec{y}^{(q)}\ $
	$s_{21}^{(q)}$	$s_{22}^{(q)}$	$s_{23}^{(q)}$	$y_{21}^{(q)}$	$y_{22}^{(q)}$	$y_{23}^{(q)}$	
1	8,00	2,00	3,00	4,50	2,00	3,00	-
2	3,00	-0,25	1,05	3,00	0,00	1,05	10,05
3	2,69	-1,22	0,15	2,69	0,00	0,15	0,91
4	2,64	-0,85	-0,66	2,64	0,00	0,00	0,02

В данном случае критерий останова цикла возврата сигнала по обратным связям выполнен после 4-й итерации (желтый цвет в таблице, при значении 0,02). Положительное выходное значение 1-го нейрона указывает на то, что входной образ следует отнести к 1-му классу (зеленый цвет в таблице). В данном случае нейронная сеть однозначно определила вид фальсификата.

В ходе работы были выявлены узкие места, связанные с качеством гистологического среза, а также с цифровым форматом изображения. Установлено, что для получения более

четкого изображения необходимо делать снимки в инфракрасном диапазоне излучения.

### 6.3. Разработка метода оптимизации аппроксимации полихромного изображения

Для уменьшения объема памяти, занимаемого изображением и упрощения его обработки целесообразно уменьшить количество палитры изображения.

Изображение гистологического препарата, поступающего для обработки, имеет формат JPEG. Используемая цветовая модель – RGB. Цвет каждого пикселя изображения  $X_{ij}$  определяется кортежем целых чисел  $[R_{ij}, G_{ij}, B_{ij}]$  в диапазоне  $[0...255]$ . Эти числа являются определяющими.

Для оценки качества использована операция вычисления суммарного (абсолютного) модуля отклонения:

$$\Delta Q = \sum_{i=0}^W \sum_{j=0}^H |R_{ij}^X - R_{ij}^P| + |G_{ij}^X - G_{ij}^P| + |B_{ij}^X - B_{ij}^P| \quad (11)$$

где  $R_{ij}^X, G_{ij}^X, B_{ij}^X$  – определяющие числа пикселя исходного изображения;

$R_{ij}^P, G_{ij}^P, B_{ij}^P$  – определяющие числа одного из значений вектора P.

Критерий содержит функции взятия модуля, поэтому нельзя гарантировать его дифференцируемость в смысле Фреше, а также непрерывность. Следовательно, использовать градиентные методы поиска экстремума невозможно. Применение методов полного перебора, процедур минимизации нулевого уровня не позволяют гарантировать нахождение оптимального значения, так как задача относится к числу NP-полных, т.е. с экспоненциально возрастающие уровнем сложности. Поэтому целесообразно применение эвристических методов, к которым, в частности, относятся генетические алгоритмы.

#### 6.3.1. Разработка генетического алгоритма оптимизации аппроксимации полихромного изображения

Алгоритм решает оптимизационную задачу поиска и позволяет сформировать оптимальную особь (палитру изображения). Каждая особь состоит из двух хромосом. При этом *Alpha-хромосома* соответствует начальному приближению цветов фальсификата, установленному гистологами. *Beta-хромосома* соответствует цветам, полученным в ходе алгоритма без учета начального приближения. Каждая хромосома, состоит из генов, которые определяют генотип особи. В предложенном алгоритме каждый ген содержит трехмерный вектор, содержащий числа в диапазоне от 0 до 255, которые соответствуют составляющим цвета в формате RGB. Результатом каждой итерации генетического алгоритма является популяция, являющая набором особей.

Основные этапы генетического алгоритма.

1. Первым этапом алгоритма является **формирование начальной популяции**, содержащей  $N_1$  особей. Для формирования *alpha-хромосомы*  $N_{\alpha}$  раз случайным образом выбирается цвет начального приближения фальсификата, т.е. один из цветов, который указан гистологом, как предположительный цвет фальсификации.

Для формирования *beta-хромосомы* могут использоваться два подхода. В первом случае  $N_{\beta}$  раз случайным образом выбирается элемент определяющей матрицы, т.е. цвет соответствующего пикселя, и его значение присваивается одному из генов *beta-хромосомы*. Во втором случае для каждого гена *beta-хромосомы* выбирается случайный цвет.

2. На втором этапе осуществляется **селекция** для сохранения генотипа лучших особей в каждом из новообразованных поколений и на каждой итерации NS оптимальных особей переносят в следующее поколение. Для этого введен следующий оператор селекции:

$$O_s(I) = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w (P_{ij} - C(P_{ij})), \quad C(P_{ij}) = \min(P_{ij} - C_k) \quad (12)$$

где  $I$  – особь;  $h$  – высота определяющей матрицы;  $w$  – ширина определяющей матрицы;  $P_{ij}$  – элемент определяющей матрицы;  $C(P_{ij})$  – ближайший к  $P_{ij}$  цвет из палитры;  $C_k$  – цвет палитры.

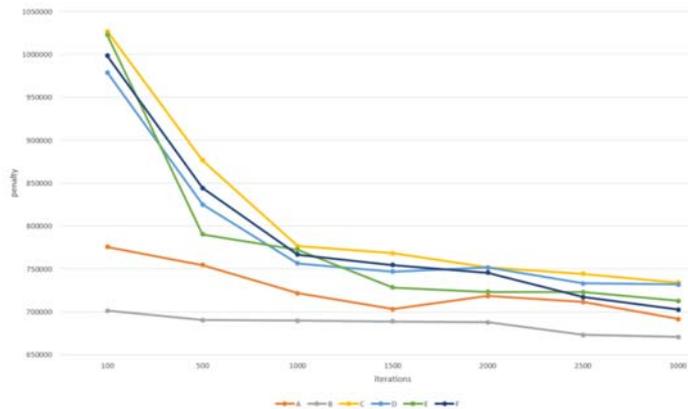
Таким образом особь  $I_i$  «оптимальнее» особи  $I_k$ , если  $O_s(I_i) < O_s(I_k)$ . Оставшееся место в новом поколении равно  $N_I - N_S$  заполняется особями, полученными в результате скрещивания и мутации.

3. Результатом операции **скрещивания** двух особей  $O_c(I_1, I_2)$  является их потомок, содержащий признаки обоих родителей. Процесс скрещивания происходит следующим образом: у первого родителя  $I_1$  выбираются случайные участки *alpha-хромосомы* и *beta-хромосомы*. Этот участок переходит в потомка, а оставшееся место заполняется соответствующими генами второго родителя  $I_2$ .

4. Для сходимости алгоритма и предотвращение преждевременной стабилизации предлагается ввести оператор **мутации**  $O_M(I)$ . Данный оператор заменяет в *alpha-хромосоме*  $N_{Malpha}$  значений генов на другие из начального приближения фальсификации и в *beta-хромосоме*  $N_{Mbeta}$  значений генов на другой случайно выбранный цвет.

5. **Условием остановки** алгоритма является прохождение заданного количества итераций  $N_{imax}$ . Результатом работы алгоритма является оптимальная особь, полученная в течении всех итерация алгоритма.

В результате работы алгоритма для каждого формирования начальной популяции построен график зависимости целевой функции от максимально допустимого времени работы алгоритма (количества итераций). Графики представлены на рис. 18. Выполнено по 10 экспериментов для каждого количества итераций и вычислено среднее значение.



- A. Alpha-хромосома = 1
- B. В Beta-хромосоме используются только цвета изображения
- C. Только цвета изображения
- D. Значения генов выбираются случайно
- E. R=G=B=128
- F. R=G=B=0
- G. R=G=B=255

Рисунок 18 - Зависимость значения целевой функции от количества итераций

По полученным результатам можно сделать следующие выводы: 1) после первой тысячи итераций скорость схождения алгоритма существенно падает, что делает нецелесообразным дальнейшую работу алгоритма; 2) лучшее приближение получено при инициализации начальной популяции цветами, присутствующими на изображении (вариант B), однако скорость сходимости крайне мала, что объясняется небольшой палитрой исходного изображения, т.е. начальная популяция всегда состоит из ограниченного количества цветов. Из-за мутации происходят изменения в генах особи, однако значение целевой функции заданной особи априори больше исходных, т.к. цвета исходной палитры имеют большее приближение.

На рисунках 19, 20 визуальны продемонстрированы результаты алгоритма с указанными выше параметрами (количество  $N_i = 3000$ )

Поскольку график зависимости значения целевой функции от количества итераций показал, что при выборе формирования исходной популяции варианта "B" параметр штрафа наименьший, выбирается данная инициализация. Также по результатам исследования было выбрано количество итераций  $N_i = 1000$ . Четко видны округлые частицы розового цвета с отверстием внутри, красные и сиреневые пучки волокон и округлые частицы, объединенные в крупный агрегат.

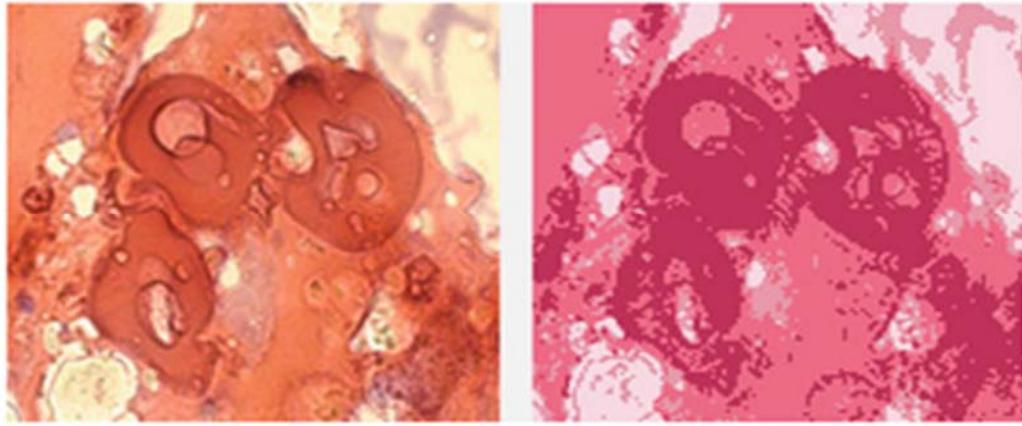


Рисунок 19 – Формирование исходной популяции вариант “С” (штраф = 732030)

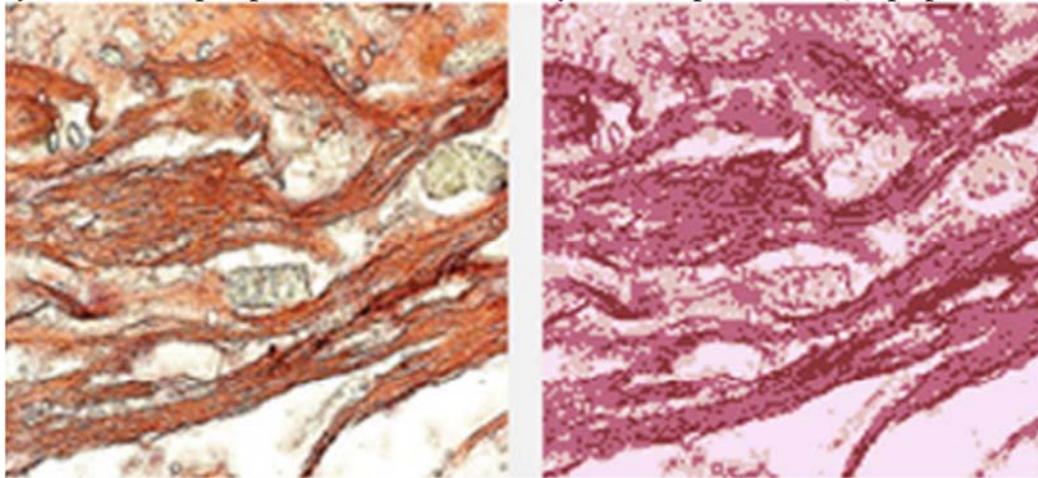


Рисунок 20 – Формирование исходной популяции вариант “F” (штраф = 830288).  
Штраф - функция пригодности для оценки качества аппроксимации полихромного изображения

Использование нейросетевых технологий для контроля состава пищевых продуктов к обработке и интерпретации информации облегчает и ускоряет процесс принятия решений. Это значительно ускорит процесс выявления фальсификаций и повысит объективность полученных результатов.

## **Глава 7 Применение методологии имитационного моделирования для описания процессов биоусвояемости рационов питания**

Для оптимизации рационов и режимов адекватного питания человека применимо структурно-параметрическое описание и агентно-ориентированная модель его пищеварительной системы, отражающая динамику усваивания элементов пищевой и биологической ценности продуктов. Биохимические процессы в подсистемах желудочно-кишечного тракта описываются субстрат-ферментативными реакциями расщепления элементов пищевой ценности и позволяют оптимизировать компонентный состав и структуру рациона питания человека с учетом его физиологического состояния.

### **7.1. Параметрическое описание и математическое моделирование пищеварительной системы**

Биохимический состав поступающих с пищей веществ систематизирован в структурно-параметрической модели (СПМ) пищеварительной системы, отражающей в матричной форме функциональные связи показателей состояния между собой и факторами  $X_{21} - X_{27}$  биохимического воздействия среды  $Y$ . Состав может быть описан любым числом показателей. Нами приняты следующие: в желудке человека,  $X_1 - X_5$ ; тонком кишечнике,  $X_6 - X_{16}$ ; в крови, лимфе и депо  $X_{17} - X_{20}$  (рисунок 21).

		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19	x20	x21	x22	x23	x24	x25	x26	x27	x28	x29	x30	x31	x32				
Желудок	Белки	x1	•																			•															
	Жиры (триглицериды)	x2		•																			•														
	Углеводы (полисахариды)	x3			•																			•													
	Денатурированные белки	x4				•																		•													
	Пептиды	x5					•																	•													
Тонкий кишечник	Денатурированные белки	x6					•																•														
	Пептиды	x7						•																•													
	Дипептиды и аминокислоты	x8							•															•													
	Жиры (триглицериды)	x9								•														•													
	Эмульгированные жиры	x10									•													•													
	Моноглицериды	x11										•												•													
	Жирные кислоты	x12											•											•													
	Углеводы (полисахариды)	x13												•										•													
	Олигосахариды	x14													•									•													
	Дисахариды	x15														•								•													
Глюкоза	x16															•							•														
Лимфа, Дето, кровь	Аминокислоты	x17																•					•														
	Жирные кислоты	x18																	•					•													
	Триглицериды	x19																		•					•												
	Глюкоза	x20																			•					•											
Биохимическая среда ЖКТ	Соляная кислота, у1	x21																					•														
	Пепсин (огены), у2	x22																						•													
	Бикарбонаты поджелудочного сока, у3	x23																							•												
	Протеолитические ферменты п.с., у4	x24																								•											
	Липаза, у5	x25																									•										
	Трипсиноген, у6	x26																										•									
	Альфа-амилаза, у7	x27																											•								
	Олигосахаридаза, у8	x28																												•							
	Дисахаридаза, у9	x29																													•						
Параметры рациона	Белок, w1	x30																																	•		
	Жир, w2	x31																																	•		
	Углеводы, w3	x32																																	•		

Рисунок 21 – Фрагмент структурно-параметрической модели желудочно-кишечного тракта человека

В полном варианте СПМ адекватного питания человека вдоль главной диагонали размещаются переменные состояния  $X_1 \div X_{20}$  трех основных блоков пищеварительной системы, блок компонентов  $Y_1 \div Y_{16}$  химического состава биохимической среды ЖКТ и блок физико-химических показателей рациона питания.

Недиагональные клетки заполняются характеристиками связи между  $i$ -м и  $j$ -м параметрами и в случае их независимости остаются пустыми.

С переходом к отклонениям параметров состояния ЖКТ от установленных норм на базе СПМ строится **ситуационная модель аномального состояния человека**, определяющая требования к его рациону адекватного питания. Тогда отклонения параметров, расположенных вдоль главной диагонали СПМ, в конечных разностях представляются суммой составляющих в системе алгебраических уравнений:

$$\Delta X_i = \sum_j^N w_{ij} \cdot f_{ij} \cdot \Delta X_j; \quad i = 1, 20 \quad (13)$$

где  $f_{ij}$  – функция влияния  $j$ -го фактора воздействия (ферментов, механизмов перемещения веществ) на  $i$ -й параметр состояния;  $w_{ij}$  – знаковая функция.

Процесс пищеварения заключается в гидролизе пищевых веществ (субстратов) под действием ферментов по ходу желудочно-кишечного тракта и может быть описан системой субстрат-ферментативных реакций Михаэлиса-Ментона

$$\begin{cases} \frac{d[S]}{dt} = -k_1[E][S] + k_{-1}([E_0] - [E]), \\ \frac{d[E]}{dt} = -k_1[E][S] + (k_{-1} + k_2)([E_0] - [E]), \\ \frac{d[P]}{dt} = k_2([E_0] - [E]); \end{cases} \quad (14)$$

где  $k_1, k_{-1}, k_2$  – коэффициенты скорости субстрат-ферментативной реакции,  $[S]$ ,  $[E]$ ,  $[P]$  – соответственно, количество субстрата, фермента и продукта в молях,  $[E_0]$  – начальное содержание фермента.

Система дифференциальных уравнений (14) описывает расщепление основных биохимических элементов пищи (белки, жиры и углеводы) на более простые ингредиенты, перемещающиеся в тонкий кишечник и всасывающиеся в кровь, лимфу и депо.

В процессе реакций комплекс  $SE$  с субстратом  $S$  и ферментом  $E$  распадается с образованием продукта реакции  $P$  и свободного фермента  $E$ .

В соответствии с уравнением (13) при отклонении от нормы показателей среды ЖКТ или биохимического анализа крови можно определить отклонения параметров состояния пищеварительной системы и рациона питания человека. В качестве демонстрации возможностей алгоритмизации этого сложного процесса взяты отдельные элементы переваривания. Так, например, в соответствии с СПМ (рисунок 21), динамику денатурации белка  $X_1$  в желудке под действием соляной кислоты  $X_{21}$  и далее образования пептидов  $X_5$  в результате реакции денатурированного белка  $X_4$  с пепсином  $X_{22}$  можно описать с учетом знака как:

$$\Delta x_1 = -f_{1,21} \cdot \Delta x_{21} \quad (15)$$

$$\Delta x_4 = \Delta x_1 - f_{4,22} \cdot \Delta x_{22}$$

Воздействие пепсина на пептиды уменьшает их концентрацию в желудке:

$$\Delta x_5 = \Delta x_4 - f_{5,22} \cdot \Delta x_{22} \quad (16)$$

При поступлении в **тонкий кишечник** денатурированные белки  $X_6$  и пептиды  $X_7$  подвергаются гидролизу протеолитическими ферментами, обозначенными  $X_{24}$  и  $X_{26}$ , до аминокислот.

Тогда уравнения изменения концентрации денатурированного белка и пептидов в тонком кишечнике будут иметь вид:

$$\Delta x_6 = -f_{6,24} \cdot \Delta x_{24} - f_{6,26} \cdot \Delta x_{26} \quad (17)$$

$$\Delta x_7 = \Delta x_5 + \Delta x_6 - f_{7,24} \cdot \Delta x_{24} \quad (18)$$

где  $\Delta X_{24}$ ,  $\Delta X_{26}$  – изменение концентрации протеолитических ферментов поджелудочного сока и трипсиногена в тонкой кишке.

В результате гидролиза пептидов под действием комплекса пищеварительных ферментов изменяется содержание дипептидов и аминокислот  $\Delta X_8$ :

$$\Delta x_8 = \Delta x_7 + f_{8,23} \cdot \Delta x_{23} + f_{8,25} \cdot \Delta x_{25} + f_{8,26} \cdot \Delta x_{26} + f_{8,27} \cdot \Delta x_{27} \quad (19)$$

Накопленные в тонком кишечнике продукты ферментализации попадают **в кровь, лимфу и депо**:

$$\Delta x_{17} = f_{17,21} \cdot \Delta x_{21} - f_{17,22} \cdot \Delta x_{22} \quad (20)$$

Характеристики  $f_{ij}$  влияния  $j$ -го фактора на  $i$ -й в (13)-(18) определяются экспертным путем по 10-ти балльной шкале с учетом активности ферментов и транспортных механизмов, а также кинетики химических реакций и переноса вещества.

Аналогично составляются математические модели динамики расщепления жиров, углеводов и других нутриентов по блокам СПМ желудочно-кишечного тракта.

Отклонение содержания поступающих в кровь, лимфу и депо показателей  $X_{17}$  -  $X_{20}$  (рисунок 21) от установленных норм являются сигналом для коррекции состава и структуры исходного рациона питания по содержанию в нем элементов пищевой ценности  $X_{30}$  -  $X_{32}$  и других элементов химсостава.

## 7.2. Разработка мультиагентной имитационной модели пищеварительной системы

Структурно-параметрическая модель пищеварительной системы человека (рисунок 21) с динамикой изменения ее состояния, описываемой системами конечно-разностных алгебраических уравнений (8) и субстрат-ферментативными дифференциальными уравнениями (9), положены в основу разработки агентно-ориентированной имитационной модели пищеварительной системы и адекватного питания человека, реализованной в универсальной имитационной системе Simplex 3.

Разработанная структурная схема мультиагентной модели (рисунок 22) включает два компонента ЖКТ – Ag.Stomach (агент-желудок) и Ag.Small\_intestine (агент-тонкий кишечник); накопительные агенты, воспроизводящие поступление ингредиентов биологической ценности в соответствующие среды организма – lymph (лимфа), blood (кровь) и depot (депо); а также компоненты Control\_system (управляющая биосреда) и Ration of food (рацион питания).

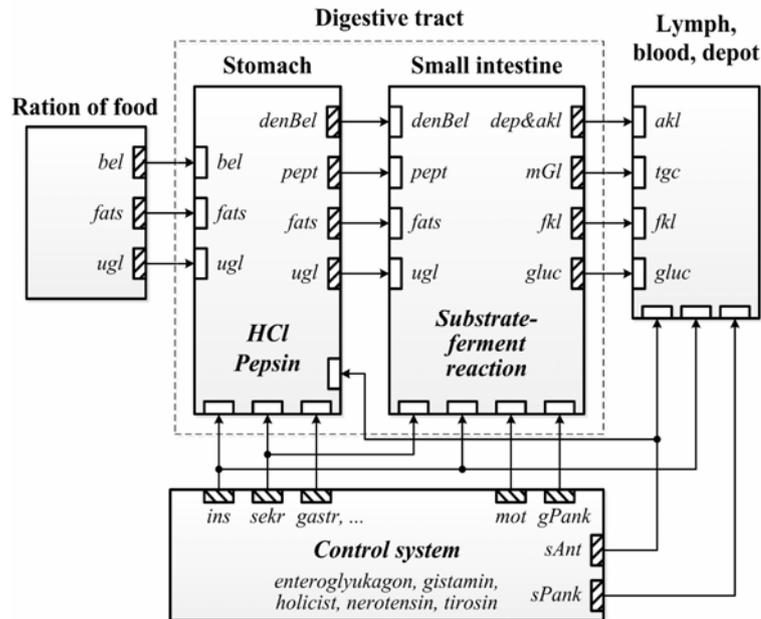


Рисунок 22 – Укрупненная структурная схема мультиагентной модели пищеварительной системы

*bel* – белок, *fats* – жиры, *ugl* – углеводы, *HCl* – соляная кислота, *Pepsin* – пепсин, *denBel* – денатурированные белки, *pept* – пептиды, *gluc* – глюкоза, *fkl* – жирные кислоты, *mGl* – моноглицериды, *dep* – депептидаза, *akl* – аминокислоты, *tgc* – триглицерид, *ins* – инсулин, *sAnt* – соматостатин антральный, *sPank* – соматостатин панкреатический, *mot* – мотилин, *sekr* – секретин, *gastr* – гастрин, *gPank* – глюкагон панкреатический, *Substrate-ferment reaction* – субстрат-ферментативные реакции, *Stomach* – желудок, *Small intestine* – тонкий кишечник, *Lymph, blood, depot* – лимфа, кровь, депо, *Ration of food* – рацион питания, *Control system* – управляющая система.

**Результаты имитации** изменения состояния агентов *Stomach* и *Smallint* в системе *Simplex3* в соответствии с описанием их субстрат-ферментативной динамики приведены на рисунках 23 – 25. Для заданной начальной концентрации: белков –  $X_1 = 0.10$ ; жиров (триглицеридов) –  $X_2 = 0.02$ ; углеводов (полисахаридов) –  $X_3 = 0.03$  в соответствии с описанием динамики поведения и времени протекания процесса в конкретном случае можно наблюдать изменения концентрации белков  $X_1$ , жиров (триглицеридов)  $X_2$ , и углеводов (полисахаридов)  $X_3$  в процессе пищеварения в желудке.

Как видно из рисунка 23, в желудке наблюдается снижение концентрации **белкового субстрата**  $X_1$ , который переходит в денатурированную форму и/или эвакуируется из желудка. Одновременно с этим падает концентрация жиров  $X_2$  и углеводов  $X_3$ , т.к. в процессе пищеварения они расщепляются до более простых веществ, поддерживающих жизнедеятельность организма.

Кривые изменения концентрации пептидов  $X_7$ , дипептидов и аминокислот  $X_8$  и жиров (триглицеридов)  $X_9$  в тонком кишечнике показаны на рисунке 24. Кривые показывают, что при белковой пище в тонкой кишке происходит повышение активности жиров  $X_9$ , вслед за чем следует увеличение пептидов  $X_7$ , которое, в свою очередь, с некоторой задержкой сопровождается возрастанием концентрации дипептидов и аминокислот  $X_8$ .

На рисунке 25 представлены графики изменения концентрации эмульгированных жиров  $X_9$ , жирных кислот  $X_{10}$  и углеводов (полисахаридов)  $X_{13}$  в тонком кишечнике. Наблюдается прогрессивное снижение концентрации эмульгированных жиров  $X_9$ , переходящих в жирные кислоты и эвакуируемых из тонкой кишки.

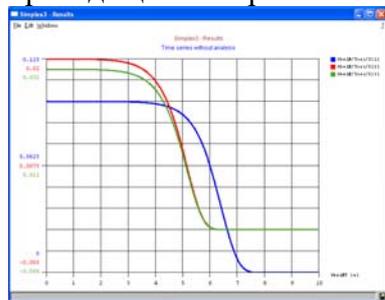


Рисунок 23 – Изменение концентрации белков  $X_1$ , жиров (триглицеридов)  $X_2$  и углеводов (полисахаридов)  $X_3$  в желудке в процессе пищеварения

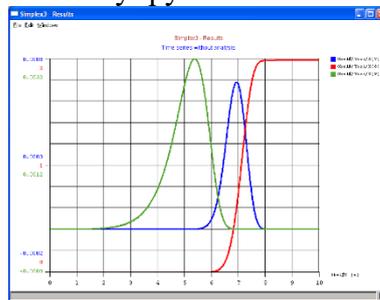


Рисунок 24 – Изменение концентрации пептидов  $X_7$ , дипептидов и аминокислот  $X_8$  и жиров (триглицеридов)  $X_9$  в тонком кишечнике

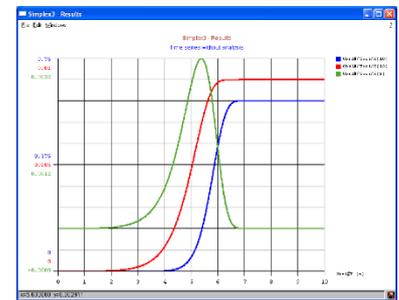


Рисунок 25 – Изменение концентрации эмульгированных жиров  $X_9$ , жирных кислот  $X_{10}$  и углеводов (полисахаридов)  $X_{13}$  в тонком кишечнике

Таким образом, приведенные фрагменты реализации модели желудочно-кишечного тракта человека с использованием языка моделирования в универсальной имитационной системе Simplex 3 показывают возможности виртуального изучения влияния различных показателей пищевой ценности продукта питания на скорость пищеварения и процесс расщепления сложных компонентов (белков, жиров и углеводов) до моноструктурных элементов в зависимости от различных факторов состояния и воздействия.

Разработанная мультиагентная модель позволяет получить результат в течение 1 с. по сравнению с аппаратом искусственного желудка Покровского А.А. и Ертанова И.Д. (продолжительность 1-2 дня) при погрешности менее 1,5%.

## Глава 8 Возможность интероперабельности процедуры органолептической оценки

В процессе дегустационной оценки участие принимают специалисты–дегустаторы, оценка которых может привносить субъективизм в общий результат. А также для выявления и выведения из состава группы дегустатора не компетентного, не заинтересованного, не объективного, обладающего невысокой вкусовой чувствительностью, с повышенной чувствительностью к горькому вкусу, хинину и т.д. Для предотвращения этого риска нами создана информационная технология экспертной обработки сенсорных оценок пищевых продуктов, отличающаяся тем, что анализ осуществляется по показателям, неизмеряемым техническими средствами контроля, на основе методов ранговой корреляции и многофакторного дисперсионного анализа в программной реализации компьютерной системы с сетевой архитектурой «клиент–сервер».

Разработанный программный комплекс состоит из двух подсистем: программного обеспечения сервера и пользователя – клиента (зарегистрирован в Государственном реестре программ для ЭВМ, регистрационный номер 2017663406 от 01.12.2017). Программная подсистема «клиент» и передает запросы к подсистеме «сервер», где они обрабатываются и передаются на компьютер пользователя.

Функциональная структура системы включает шесть модулей, осуществляющих (1) ввод параметров оценки и (2) оценка дескрипторов продукта; (3) создание набора данных для анализа; (4) формирование сенсорного профиля; (5) сравнение с эталоном; и (6) помощь (пользователю и администратору).

Перечень параметров (рисунок 26), определяемый целью дегустации, включает:

- количество дегустируемых образцов и оцениваемых дескрипторов;
- тип шкалы (структурированная или неструктурированная). При выборе структурированной шкалы можно использовать на выбор либо пятибалльную, либо девятибалльную шкалу;
- наименование оцениваемых дескрипторов;
- папка для сохранения файлов с результатами дегустации (формат – \*.txt);
- инструкция для дегустационной комиссии.

На примере оценки согласованности дегустаторов на рисунке 27 представлена таблица результатов двухфакторного дисперсионного анализа по дескриптору – «запах копчения». Была проведена оценка трех продуктов шестью дегустаторами.

Рисунок 26 – Модуль 1 – ввод параметров оценки

В качестве нулевой гипотезы системой выдвигается: – продукты не влияют на дескриптор вкуса «запах копчения», а альтернативной – продукты влияют на дескриптор вкуса «запах копчения». Для их проверки использовался точный критерий Фишера на уровне значимости  $\alpha=0,05$ . Из данных на рисунке 23, расчетное значение F-критерия фактора «Продукты»  $F \approx 19,85$ , а критическая область образуется правосторонним интервалом  $(4,46; +\infty)$ . Так как  $F$  попадает в критическую область, то нулевая гипотеза отвергается и принимается альтернативная гипотеза, т.е. фактор «Продукты» влияет на дескриптор вкуса «запах копчения».

Источник вариаций	SS	df	MS	F	P-значение	F-критическое
Продукты	17,2	2	8,6	19,846154	,000791085	4,4589701
Дегустаторы	1,7333333	4	0,43333333	1	0,46090535	3,8378534
Погрешность	3,4666667	8	0,43333333			

Анализ результатов: продукты различаются по данному дескриптору  
оценки дегустаторов согласованы

Рисунок 27 – Результаты проверки согласованности дегустаторов по дескриптору «запах копчения»

Здесь:  $SS$  – дисперсия;  $df$  – степень свободы;  $MS$  – несмещенные оценки;  $F$  – расчетный критерий Фишера;  $P$ -значение – функция F-распределения;  $F$ -критическое – табличное значение критерия Фишера.

Аналогично производится оценка по второму фактору – «дегустаторы» с нулевой гипотезой – дегустаторы не влияют на дескриптор вкуса «запах копчения» и альтернативной – дегустаторы влияют на дескриптор вкуса «запах копчения».

Числовые значения на рисунке 27 показывают, что расчетный показатель F-критерия фактора «Дегустаторы»  $F=1$ , а критическая область образуется правосторонним интервалом  $(3,84; +\infty)$ . Так как  $F$  не попадает в критическую область, то нулевая гипотеза принимается, т.е. влияние фактора «Дегустаторы» на дескриптор вкуса «запах копчения» не подтвердилось.

Выборочный коэффициент детерминации

$$\bar{\rho}_{x_1^2} = \frac{SS_{x_1}}{SS_{x_1} + SS_{x_2} + SS_E} = \frac{17,2}{17,2 + 1,73 + 3,47} \approx 0,77 \quad (21)$$

где  $SS_{x_1}$ ,  $SS_{x_2}$  – факторные дисперсии «Продукты» и «Дегустаторы»;  $SS_E$  – остаточная дисперсия

показывает, что 77% общей выборочной вариации качества дескриптора («запах копчения») связано с влиянием на него вида продукции.

В приведенном на рисунке 27 примере  $P$ -значение для факторов «Продукты» и «Дегустаторы» определяется значениями  $F$ ;  $df$  и  $MS$  данного фактора в соответствующих строках таблицы и имеет значения 0,00079 и 0,46 соответственно.

Согласно критерию Фишера–Снедекора, если  $P$ -значение меньше 0,05 ( $P < 0,05$ ), то данные не согласуются. На основании расчета, анализа и сопоставления система делает вывод «Продукты различаются по данному дескриптору, оценки дегустаторов согласованны».

В случае согласованной и достоверной оценки программа позволяет построить сенсорный профиль (профилограмму) оцениваемой характеристики продукта (рисунок 28) с количеством осей оценок интенсивности равным количеству определенных дескрипторов.

При несогласованной оценке существует несколько вариантов: 1) отбросить несогласованные результаты, и посмотреть результаты только согласованные; 2) визуальное отобразить результаты несогласованной оценки дегустатора по дескрипторам и образцам в виде графика. Второй вариант необходим для более детального анализа несогласованной оценки.

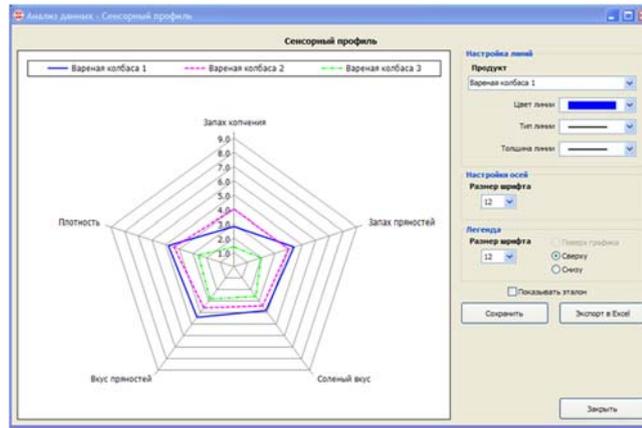


Рисунок 28 – Сенсорный профиль трех образцов вареной колбасы

С помощью аналогичных процедур программа дает возможность определять позицию вырабатываемого на предприятии продукта среди конкурентов на основании сравнения его профиля с профилями продуктов конкурентов или эталона.

Таким образом, разработанная система позволяет собрать и обработать данные дегустационной оценки любого количества продуктов любым числом дегустаторов; сравнить между собой любое число продуктов одной группы, создать «эталонный продукт» для сравнения; выявлять изменения в сенсорных характеристиках продукта при замене пищевых ингредиентов, добавок или пряностей в составе рецептуры, использования новых видов упаковки, изменений технологии и др.

#### Выводы:

1. На основе анализа и структуризации информации определены направления цифровой трансформации процессов формирования заданного состава и свойств продуктов и рационов питания, а также возможность цифровизации методов контроля качества пищевого сырья и продуктов с целью снижения риска субъективного решения.
2. Разработаны структуры 1) база данных «Пищевые продукты» о химическом составе компонентов продуктов и блюд; 2) база знаний о сочетаемом эффекте нутриентов, позволяющие реализовать индивидуальный подбор рациона питания потребителя с учетом особенностей его метаболизма. Осуществлена структуризация информации и занесена в разработанные базы данных. Разработан диалоговый алгоритм структурно-параметрической оптимизации питания независимо от его назначения – общее, функциональное, здоровое, персонализированное.
3. Разработаны концептуальные схемы группирования пищевых продуктов и блюд по различным признакам с применением методов и алгоритмов кластерного анализа для упрощения и объективизации формирования взаимозаменяемых списков блюд с размерами порций или списков разрешенных и неразрешенных продуктов при различных заболеваниях.
4. Разработан пошаговый алгоритм создания «цифровых двойников» - имитационных моделей продуктов общего и специализированного питания. На примерах, разработанных «цифровой двойников» пищевого продукта, технологического и физиологического процессов, показана возможность анализа в режиме реально времени изменений пищевой, биологической и энергетической ценности и др. характеристик продукта. Виртуальная имитационная модель позволяет реагировать на изменения в физико-химическом составе используемого сырья или замене основного, или вспомогательного сырья, и в соответствии с этим корректировать рецептуру для получения продукта с заданным химическим составом и гарантированным качеством.
5. Предложены структурно-параметрическое описание и агентно-ориентированная модель пищеварительной системы человека, отражающая динамику усваивания элементов пищевой и биологической ценности продуктов. Моделирование биохимических

- процессов желудочно-кишечного тракта позволяют оптимизировать компонентный состав и структуру рациона питания человека с учетом его физиологического состояния. Мультиагентная модель позволяет описывать динамику усвоения пищевых продуктов и рационов. Работоспособность изложенной методологии и алгоритма была реализована на ряде вычислительных экспериментов и в результате получили совокупность временных графиков биохимических процессов расщепления и транспортировки биохимических элементов пищевой ценности рациона питания человека, которые позволяют анализировать пищеварительные процессы в ЖКТ в ускоренном масштабе времени при конкретных условиях. Результат получаем в течение 1 с.
6. Разработан аналитический и программно-технический инструментарий с учетом предметных областей их использования и современных методов обработки массивов информации, направленных на повышение эффективности управленческих процессов, протекающими в системе. Разработанная программа по сбору и статистической обработке данных с архитектурой «клиент–сервер» в режиме on-line осуществляет обработку результатов дегустационной комиссии. Максимальный объем информации, обрабатываемый в единицу машинного времени, массив данных размером  $6 \times 15 \times 20$ , где соответственно 6 – количество продуктов, 15 – количество исследуемых дескрипторов, 20 – количество дегустаторов. Данные, получаемые в ходе автоматической обработки, являются максимально объективными и достоверными. Разработанная мультиагентная модель позволяет получить результат в течение 1 с. по сравнению с аппаратом искусственного желудка Покровского А.А. и Ертанова И.Д. (продолжительность 1-2 дня) при погрешности менее 1,5%.
  7. Теоретические разработки апробированы при обучении студентов, аспирантов, на курсах повышения квалификации ФНЦ пищевых систем, а также при проведении органолептических оценок пищевых продуктов. Разработаны рационы питания студентов и школьников совместно с Московским фондом содействия санитарно-эпидемиологическим благополучием населения.

#### Список работ, опубликованных по материалам диссертации:

##### Книги

1. Лисицын, А.Б. Конструирование многокомпонентных продуктов питания / А.Б. Лисицын, И.М. Чернуха, **М.А. Никитина**. – М.: МГУПП, 2021. – 176 с. ISBN: 978-5-9920-0364-2
2. Коноваленко, Л.Ю. Цифровая трансформация пищевой и перерабатывающей промышленности: монография / Л.Ю. Коноваленко, Н.П. Мишуров, И.Г. Голубев, **М.А. Никитина**, С.А. Бредихин. – М.: ФГБНУ "Росинформагротех", 2020. – 80 с. ISBN: 978-5-7367-1573-2
3. Бородин, А.В. Информационные технологии производств по переработке биосырья: учебное пособие / А.В. Бородин, М.А. Никитина. – М.: МГУПП, 2008. – 262 с. ISBN 978-58168-179-8

##### Статьи в изданиях, рецензируемых в международных базах данных (Scopus и WOS)

4. **Nikitina, M.A.** Cluster analysis for databases typologization characteristics / M.A. Nikitina, I.M. Chernukha, Ya.M. Uzakov, D.E. Nurmukhanbetova // News of the national academy of Science Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences (**Q3**). – 2021. – Т. 446. – № 2. – pp. 114-121. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.42>
5. **Nikitina, M.A.** Application of Digital Technologies in the Development of a Ration for Feeding Animals / M.A. Nikitina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, FarEconCon. – 2021. – Vol. 666. - article number 052079. doi:10.1088/1755-1315/666/5/052079
6. Bolshakov, A. Intelligent System for Determining the Presence of Falsification in Meat Products Based on Histological Methods / A. Bolshakov, **M. Nikitina**, R. Kalimullina // Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Studies in Systems, Decision and Control. – 2021. - Vol. 333. - pp. 179-201. DOI: 10.1007/978-3-030-63563-3\_15.
7. Lisitsyn, A. Russian methodology for designing multicomponent foods in retrospect / A. Lisitsyn, I. Chernukha, **M. Nikitina** // Foods and Raw Materials (**Q4**). – 2020. – Т. 8. – № 1. – Pp. 2-11. DOI: 10.21603/2308-4057-2020-1-2-11
8. **Nikitina, M.** Agent-Based Situational Modeling and Identification Technological Systems in Conditions of Uncertainty / M. Nikitina, Y. Ivashkin // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1156 AISC. – pp. 109-119. DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9\_12
9. **Nikitina, M.A.** Personalized nutrition and “digital twins” of food / M.A. Nikitina, I.M. Chernukha // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences (**Q3**). – 2020. – Vol. 14. – Pp. 264-270. <https://doi.org/10.5219/1312>
10. Kapovsky, B.R. Intelligent control system for minced meat production / B.R. Kapovsky, A.N. Zakharov, **M.A. Nikitina** // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences (**Q3**). – 2020. – Vol. 14. – Pp. 750-758. <https://doi.org/10.5219/1342>

11. **Nikitina, M.A.** Identifying States of Complex Technological and Biotechnological Systems under Uncertainty Conditions / M.A. Nikitina // Codit'2020, Prague, Czech Republic, June 29 - July 2, 2020. – 2020. – Pp. 825-830. doi: 10.1109/CoDIT49905.2020.9263885
12. **Nikitina, M.A.** Studying growth kinetics of microbial populations using information technology. Solving the Cauchy problem / M.A. Nikitina, I.M. Chernukha // Bio Web Conferences (Plamic-2020) <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202302004>
13. **Nikitina, M.A.** Structural-Parametric Modeling in Human Healthy Nutrition System / M.A. Nikitina // VI International Conference on Information Technology and Nanotechnology, 2020. – Vol. 2667. – pp. 219-224
14. **Nikitina, M.A.** Methodological Basics of Yoghurt Formula Development for the Far North Population / M.A. Nikitina, G.V. Semenov, I.S. Krasnova // CoMeSySo 2020, AISC 1295. – 2020. – Pp. 845–850. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-63319-6\\_78](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63319-6_78).
15. Ivashkin, Y.A. Agent-oriented modeling and optimization of material flows of multi-assortment production / Y.A. Ivashkin, **M.A. Nikitina** // 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2019; Berlin; Germany; 28 August 2019 до 30 August 2019. – 2019. Vol. 52. – Is. 13. – pp. 660-664. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.109
16. Bruevich, N.A. Information technology in the mobile application of analysis and correction of the diet of individual healthy nutrition / N.A. Bruevich, Y.A. Ivashkin, **M.A. Nikitina** // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019. – 2019. – Pp. 8706763. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706763
17. **Nikitina, M.A.** Expert system of food sensory evaluation for mobile and tablet / M.A. Nikitina, Y.A. Ivashkin // CEUR Workshop Proceedings. DS-ITNT 2019 - Proceedings of the Data Science Session at the 5th International Conference on Information Technology and Nanotechnology. – 2019. – pp. 332-339.
18. **Nikitina, M.A.** Artificial neural network technologies as a tool to histological preparation analysis / M.A. Nikitina, I.M. Chernukha, V.A. Pchelkina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 60. Cep. "60th International Meat Industry Conference, MEATCON 2019" – 2019. – pp. 012087. DOI: 10.1088/1755-1315/333/1/012087
19. Kapovsky, B.R., The modelling of the crushing of meat raw materials for making management decisions in the production of emulsified meat products / B.R. Kapovsky, A.N. Zakharov, **M.A. Nikitina** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – pp. 012003. DOI: 10.1088/1757-899X/630/1/012003
20. **Nikitina, M.A.** Principal approaches to design and optimization of a diet for targeted consumer groups / M.A. Nikitina, I.M. Chernukha, D.E. Nurmukhanbetova D.E. // News of the national academy of Science Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences (Q3). – 2019. – T. 1. – № 433. – pp. 231-241. DOI: 10.32014/2019.2518-170X.28
21. Meshalkin, V.P. Computer-aided multiagent model of chemico-physiological processes in the human gastrointestinal tract as a living biochemical system / V.P. Meshalkin, Yu.A. Ivashkin, **M.A. Nikitina** // Doklady Chemistry (Q3). – 2019. – T. 484. – № 1. – pp. 29-32. DOI: 10.1134/S0012500819010087
22. Ivashkin, Y.A. Modeling of the human digestive system in the diet structural optimization / Y.A. Ivashkin, **M.A. Nikitina** // RPC 2018 - Proceedings of the 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. 3. – 2018. – pp. 8482156. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482156
23. Ivashkin, Y.A. Neural network and agent technologies in the structural-parametric modeling of technological systems / Y.A. Ivashkin, I.G. Blagoveschensky, **M.A. Nikitina** // CEUR Workshop Proceedings. Cep. "OPTA-SCL 2018 - Proceedings of the School-Seminar on Optimization Problems and their Applications" 2018. – pp. 169-180.
24. Nikitin, I.A. Comprehensive assessment of fruit jelly with an improved carbohydrate profile based on unconventional plant raw materials / I.A. Nikitin, **M.A. Nikitina**, N. Allilueva, A.Y. Krivosheev // Foods and Raw Materials (Q4). – 2019. – T. 7. – № 1. – Pp. 26-34. DOI: 10.21603/2308-4057-2019-1-26-34
25. Voskanyan, O.S. Modeling of the vegetable oil blends composition / O.S. Voskanyan, I.S. Nikitin, **M.A. Nikitina**, M.V. Kloconos, D.A. Guseva, I.V. Zavalishin // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (Q4). – 2019. – Vol. 10. – Is. 8. – Pp. 142-147. DOI: 10.14569/ijacsa.2019.0100819
26. Ivanova, V.N. Clustering of multidimensional objects in the formation of personalized diets / V.N. Ivanova, I.A. Nikitin, N.A. Zhuchenko, **M.A. Nikitina**, Y.I. Sidorenko, V.I. Karpov, I.V. Zavalishin // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (Q4). – 2019. – Vol. 10. – Is. 2. – Pp. 45-50. DOI: 10.14569/ijacsa.2019.0100206
27. **Nikitina, M.A.** Application of the hierarchy analysis method at the Foodstuffs quality evaluation / M.A. Nikitina, I.A. Nikitin, N.G. Semenkina, I.V. Zavalishin, A.V. Goncharov // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (Q4). – 2018. – Vol. 9. – Is. 5. – Pp. 51-59. DOI: 10.14569/IJACSA.2018.090507
28. **Nikitina, M.A.** Applying Simulation Method in Formulation of Gluten-Free Cookies / M.A. Nikitina, I.A. Nikitin, V. Kulakov // 2017 Seminar on systems analysis (ITM Web of Conferences). – 2017. – Vol. 10 - UNSP 01008. DOI: 10.1051/itmconf/20171001008
- Статьи в журналах, рекомендованных ВАК**
29. **Никитина, М.А.** Интеллектуальная основа для индивидуальных рационов питания / М.А. Никитина, И.М. Чернуха И.М. // Все о мясе. – 2020. – № 4. – С. 17-24. DOI: 10.21323/2071-2499-2020-4-17-24
30. Lisitsyn, A.B. A system approach to simulation of individual food products / A.B. Lisitsyn, I.M. Chernukha, **M.A. Nikitina** // Theory and Practice of Meat Processing. – 2020. – Т. 5. – № 3. – С. 12-17. DOI: <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2020-5-3-12-17>
31. Кузнецова, О.А. Фабрика будущего: роботы в мясной промышленности / О.А. Кузнецова, **M.A. Никитина**, А.Н. Захаров // Все о мясе. – 2020. – № 2. – С. 16-21. DOI: 10.21323/2071-2499-2020-2-16-20
32. **Nikitina, M.A.** About a "digital twin" of a food product / M.A. Nikitina, I.M. Chernukha, A.B. Lisitsyn // Theory and Practice of Meat Processing. – 2020. – Т. 5. – № 1. – С. 4-8. DOI: 10.21323/2414-438X-2020-5-1-4-8

33. **Никитина, М.А.** Цифровые технологии - инновационные решения для сельского хозяйства / М.А. Никитина, Д.Н. Осянин, И.В. Петрунина // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – Т. 67. – № 1 (38). – С. 127-132. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-1-127-132
34. Мешалкин, В.П. Компьютерная мультиагентная модель химико-физиологических процессов в желудочно-кишечном тракте человека как в живой биохимической системе / В.П. Мешалкин, Ю.А. Ивашкин, **М.А. Никитина** // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 484. – № 3. – С. 303-306. DOI: 10.31857/S0869-56524843303-306
35. **Никитина, М.А.** Интеллектуальные решения при анализе видеоизображений // М.А. Никитина, И.М. Чернуха, В.А. Пчёлкина В.А. // Все о мясе. – 2019. – № 4. – С. 52-56. DOI: 10.21323/2071-2499-2019-4-52-56
36. **Никитина, М.А.** Применение метода анализа иерархии при оценке качества продуктов питания // М.А. Никитина, И.М. Чернуха И.М. // Все о мясе. – 2019. – № 5. – С. 38-40. DOI: 10.21323/2071-2499-2019-5-38-40
37. **Никитина, М.А.** Нейросетевые технологии в анализе гистологических препаратов / М.А. Никитина, В.А. Пчелкина, И.М. Чернуха // Контроль качества продукции. – 2019. – № 3. – С. 17-24.
38. Lisitsyn, A.V. Development of a personalized meat product using structural-parametric modeling / A.V. Lisitsyn, I.M. Chernukha, **M.A. Nikitina** // Theory and Practice of Meat Processing. – 2019. – Т. 4. – № 3. – С. 11-18. DOI: 10.21323/2414-438X-2019-4-3-11-18
39. Ивашкин, Ю.А. Концепция биологической совместимости в оптимизации рациона питания человека / Ю.А. Ивашкин, **М.А. Никитина** // Наукоемкие технологии. – 2018. – Т. 19. – № 3. – С. 33-45.
40. **Никитина, М.А.** Методологическое обеспечение и разработка программы обработки сенсорных данных, полученных с помощью профильно-дескрипторного анализа // М.А. Никитина, Т.Г. Кузнецова, А.А. Лазарев, А.Н. Захаров // Пищевая промышленность. – 2018. – № 5. – С. 68-73.
41. **Никитина, М.А.** Оценка качества животного белка / М.А. Никитина, С.В. Зверев // Все о мясе. – 2018. – № 1. – С. 50-55. DOI: 10.21323/2071-2499-2018-1-50-55
42. Жаринов, А.И. Оценка качества разработанного функционального мясного продукта для детей младшего школьного возраста / А.И. Жаринов, М.Ю. Попова, **М.А. Никитина**, О.К. Деревицкая // Все о мясе. – 2018. – № 2. – С. 50-54. DOI: 10.21323/2071-2499-2018-2-48-52
43. **Никитина, М.А.** Технологические решения интеллектуальной обработки данных в пищевой промышленности / М.А. Никитина, В.А. Пчелкина, О.А. Кузнецова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2018. – Т. 80. – № 2 (76). – С. 256-263. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-2-256-263
44. **Никитина, М.А.** Многокритериальная оптимизация рецептурного состава продукта / М.А. Никитина, И.М. Чернуха // Теория и практика переработки мяса. – 2018. – Т. 3. – № 3. – С. 89-98. DOI: 10.21323/2414-438X-2018-3-3-89-98
45. **Никитина, М.А.** Расчет нутриентной сбалансированности поликомпонентных мясных продуктов с использованием информационных технологий / М.А. Никитина, А.Н. Захаров // Российская сельскохозяйственная наука. – 2018. – № 5. – С. 68-72. DOI: 10.31857/S250026270000650-0
46. **Никитина, М.А.** Многофакторное планирование экспериментов при разработке новых мясных продуктов / М.А. Никитина, В.Б. Крылова, А.Н. Захаров, О.Н. Новикова // Все о мясе. – 2017. – № 4. – С. 54-58.
47. **Никитина, М.А.** Разработка программы для обработки результатов дегустационных оценок профильно-дескрипторным методом / М.А. Никитина, Т.Г. Кузнецова, А.А. Лазарев, А.Н. Захаров // Все о мясе. – 2017. – № 6. – С. 34-36.
48. Кузнецова, Т.Г. Повышение объективности результатов органолептической оценки продукции. разработка программы для анализа сенсорных данных / Т.Г. Кузнецова, А.А. Лазарев, **М.А. Никитина** // Мясная индустрия. – 2017. – № 11. – С. 34-36.
49. **Никитина, М.А.** Оценка органолептических показателей качества мясной продукции статистическими методами / М.А. Никитина, А.Н. Захаров, Е.О. Щербинина // Мясная индустрия. – 2017. – № 5. – С. 50-52.
50. Зверев, С. Оценка качества белка бобовых культур / С. Зверев, **М. Никитина** // Комбикорма. – 2017. – № 4. – С. 37-41.
51. Лисицын, А.Б. Оценка качества белка с использованием компьютерных технологий / А.Б. Лисицын, **М.А. Никитина**, Е.Б. Сусь // Пищевая промышленность. – 2016. – № 1. – С. 26-29.
52. Лисицын, А.Б. Моделирование качества мясной продукции / А.Б. Лисицын, **М.А. Никитина**, А.Н. Захаров, Е.Б. Сусь, В.В. Насонова // Пищевая промышленность. – 2016. – № 10. – С. 50-54.
53. **Никитина, М.А.** Применение методов планирования эксперимента в технологических исследованиях / М.А. Никитина, Е.Б. Сусь, В.Б. Крылова // Все о мясе. – 2016. – № 1. – С. 14-17.
54. **Никитина, М.А.** Системный подход и структурно-параметрическая модель рациона кормления сельскохозяйственных животных / М.А. Никитина // Все о мясе. – 2016. – № 3. – С. 36-40.
55. Лисицын, А.Б. Методы и подходы к прогнозированию в мясной промышленности / А.Б. Лисицын, **М.А. Никитина**, А.Н. Захаров, Е.О. Щербинина // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2016. – № 4 (70). – С. 261-267. DOI: 10.20914/2310-1202-2016-4-261-267
56. Лисицын, А.Б. Компьютерные технологии для оценки качества мясного фарша в зависимости от количества добавленных белковых ингредиентов / А.Б. Лисицын, А.Н. Захаров, **М.А. Никитина**, Е.Б. Сусь, В.В. Насонова // Пищевая промышленность. – 2015. – № 10. – С. 38-41.
57. **Никитина, М.А.** Информационная система проектирования пищевых продуктов / М.А. Никитина, Е.Б. Сусь // Все о мясе. – 2015. – № 1. – С. 36-39.
58. **Никитина, М.А.** Статистическое обеспечение биологических исследований с использованием компьютерных технологий / М.А. Никитина, Е.Б. Сусь // Все о мясе. – 2015. – № 2. – С. 31-34.

59. **Никитина, М.А.** Программная поддержка гостовских рецептов мясных и мясосодержащих продуктов / М.А. Никитина, Е.Б. Сусь // Мясная индустрия. – 2015. – № 1. – С. 30-32.
60. **Никитина, М.А.** Информационные технологии в разработке многокомпонентных мясных продуктов с учетом биологической ценности / М.А. Никитина, Е.Б. Сусь, Д.В. Завгороднева // Все о мясе. – 2014. – № 4. – С. 48-51.
61. **Никитина, М.А.** Компьютерная система расчета нутриентной адекватности / М.А. Никитина, Е.Б. Сусь // Мясная индустрия. – 2014. – № 12. – С. 25-27.
62. Титова, М.Е. Разработка белкового модуля для продуктов функционального питания с применением системы компьютерной оценки / М.Е. Титова, **М.А. Никитина**, Н.А. Тихомирова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2013. – № 7. – С. 41-45.
63. Жаринов, А.И. Разработка рецептуры хромсодержащего мясного продукта для диабетиков / А.И. Жаринов, М.Ю. Попова, **М.А. Никитина** // Мясная индустрия. – 2011. – № 7. – С. 25-28.
64. Жаринов, А.И. Разработка мясного геродиетического продукта, обогащенного кальцием / А.И. Жаринов, М.Ю. Попова, **М.А. Никитина**, Э.К. Арабян // Все о мясе. – 2008. – № 5. – С. 17-22.
65. Титов, Е.И. Аналитические исследования структуры питания студентов / Е.И. Титов, Л.Ф. Митасева, И.В. Глазкова, **М.А. Никитина** // Пищевая промышленность. – 2007. – № 1. – С. 30-31.
66. Ивашкин, Ю.А. Моделирование и оптимизация адекватного питания с учетом индивидуальных медико-биологических требований / Ю.А. Ивашкин, **М.А. Никитина**, Д.А. Щур // Хранение и переработка сельхозсырья. 2007. № 2. С. 71-74.
67. Тихомирова, Н.А. Разработка функциональных кисломолочных напитков на основе компьютерной экспертной системы адекватного питания / Н.А. Тихомирова, Ю.А. Ивашкин, **М.А. Никитина**, В.В. Васильев // Вестник Международной академии холода. – 2006. – № 3. – С. 41-44.
68. Жаринов, А.И. Разработка пищевых продуктов для профилактики железодефицитной анемии / А.И. Жаринов, М.Ю. Попова, **М.А. Никитина**, Е.Б. Аграновская // Все о мясе. – 2006. – № 3. – С. 21-25.
69. Тихомирова, Н.А. Кефир для функционального питания / Н.А. Тихомирова, Ю.А. Ивашкин, **М.А. Никитина**, В.В. Васильев // Молочная промышленность. – 2005. – № 1. – С. 71-72.
- Материалы симпозиумов, конгрессов, конференций**
70. **Никитина, М.А.** Имитационное моделирование материальных потоков производственной системы / М.А. Никитина // Инновационные технологии обработки и хранения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов: сборник научных трудов ученых и специалистов к 90-летию ВНИХИ. – Москва. – 2020. – С. 283-289.
71. Бруевич, Н.А. Проектирование систем адекватного питания с использованием технологий машинного обучения / Н.А. Бруевич, **М.А. Никитина** // Технологии информационного общества: сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции. – Москва. – 2020. – С. 417-420.
72. **Nikitina, M.A.** Structural-parametric model of healthy diet / M.A. Nikitina // Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы. В 4-х томах. Под редакцией В.А. Фурсова. – Самара. – 2020. – С. 153-159.
73. **Никитина, М.А.** "Цифровой двойник" - имитационная модель пищевого продукта / М.А. Никитина // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – Казань. – 2020. – Т. 6. – С. 136-140.
74. **Никитина, М.А.** Научные основы разработки продуктов здорового питания с использованием структурно-параметрического моделирования / М.А. Никитина // Научно-техническое обеспечение эффективности и качества производства продукции АПК: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ВНИИПП. – Ржавки. – 2019. – С. 186-191. DOI: 10.30975/978-5-9909889-2-7-2019-1-1-186-191
75. **Никитина, М.А.** Информационные технологии оценки сенсорных характеристик качества пищевых продуктов / М.А. Никитина, Ю.А. Ивашкин // Системный анализ и информационные технологии САИТ-2019: труды Восьмой международной конференции. – Иркутск – 2019. – С. 297-303. DOI: 10.14357/SAIT2019038
76. **Никитина, М.А.** Структура базы данных "пищевые добавки (разрешенные на территории РФ) / М.А. Никитина, А.Н. Захаров // Пищевые ингредиенты России 2019: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург. – 2019. – С. 89-94.
77. Бруевич, Н.А. IT-технологии как инструмент в поддержке принятия решений организации здорового питания / Н.А. Бруевич, **М.А. Никитина**, Ю.А. Ивашкин // Технологии информационного общества: материалы XIII Международной отраслевой научно-технической конференции. – Москва. – 2019. – С. 400-402.
78. **Nikitina, M.A.** The mobile flatbed expert system of food quality sensory assessment / M.A. Nikitina, Y.A. Ivashkin // V международная конференция и молодежная школа "Информационные технологии и нанотехнологии", ИТНТ-2019. – Самара. – 2019. – С. 354-360.
79. **Никитина, М.А.** Компьютерная система сбора и оценки органолептических показателей качества пищевых продуктов / М.А. Никитина, Ю.А. Ивашкин // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – Санкт-Петербург. – 2019. – Т. 1. – С. 73-78.
80. Ивашкин, Ю.А. Мультиагентное моделирование и структурная оптимизация материальных потоков многоассортиментного перерабатывающего производства / Ю.А. Ивашкин, **М.А. Никитина** // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: материалы IV Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием. Под ред. А.В. Колесникова. – Светлогорск. – 2018. – С. 341-348.
81. **Никитина, М.А.** Информационные технологии и статистические методы в управлении качеством продукции / М.А. Никитина // Новые подходы к разработке технологий производства и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы Международной научно-практической конференции. Под общ. ред. И.Ф. Горлова. – 2018. – С. 350-355.

82. Ивашкин, Ю.А. Нейросетевые и агентные технологии в структурно-параметрическом моделировании технологических систем / Ю.А. Ивашкин, И.Г. Благовещенский, **М.А. Никитина** // В книге: Проблемы оптимизации и их приложения. Тезисы докладов VII Международной конференции: памяти профессора А.А. Колоколова. Председатель редколлегии С.В. Белим. Ответственный редактор А.А. Романова. – Омск. – 2018. – С. 54.

83. **Никитина, М.А.** Умные технологии в сенсорной оценке пищевые продукты / М.А. Никитина, А.Н. Захаров, Т.Г. Кузнецова, А.А. Лазарев, А.Б. Лисицын // Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. – Москва. – 2018. – № 1. – С. 178-182.

84. **Никитина, М.А.** Нейросетевые технологии в процессе анализа гистологических препаратов / М.А. Никитина, В.А. Пчелкина, А.Б. Лисицын // Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. – Москва. – 2018. – № 1. – С. 182-186.

85. Ивашкин, Ю.А. Агентные и нейросетевые технологии в ситуационном моделировании технологических систем / Ю.А. Ивашкин, **М.А. Никитина** // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – Санкт-Петербург. – 2018. – Т. 1. – С. 123-128.

86. Ивашкин, Ю.А. Агентно-ориентированное моделирование пищеварительной системы человека / Ю.А. Ивашкин, **М.А. Никитина** // Системный анализ и информационные технологии (САИТ - 2017): сборник трудов Седьмой Международной конференции. – Светлогорск. – 2017. – С. 135-140.

87. **Никитина, М.А.** Инновационные решения в оценке качества белоксодержащих пищевых продуктов / М.А. Никитина // Наука – главный фактор инновационного прорыва в пищевой промышленности: сборник материалов юбилейного форума, посвященного 85-летию со дня основания ФГАНУ "Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности". – Москва. – 2017. – С. 227-230.

88. Ивашкин, Ю.А. Логистика и структурная оптимизация материальных потоков с сетевой структурой в распределительных системах / Ю.А. Ивашкин, **М.А. Никитина** // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК "ЛЭРЭП-11-2017"): сборник научных трудов по материалам XI Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 240-244.

89. **Никитина, М.А.** Системный подход в оценке качества колбасных изделий / М.А. Никитина, А.Н. Захаров // Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологически безопасной сельскохозяйственной и пищевой продукции: сборник материалов II Международной научно-практической конференции. – Краснодар. – 2017. – С. 421-425.

90. **Никитина, М.А.** Роль информационных технологий и статистических методов при разработке мясных продуктов / М.А. Никитина, А.Н. Захаров // Стратегические направления развития АПК стран СНГ: материалы XVI Международной научно-практической конференции: в трех томах. – Барнаул. – 2017. – С. 272-274.

91. **Никитина, М.А.** Система поддержки принятия решения в оценке качества эмульгированных мясных продуктов / М.А. Никитина, А.Н. Захаров // Экологические, генетические, биотехнологические проблемы и их решение при производстве и переработке продукции животноводства: материалы Международной научно-практической конференции (посвященная памяти академика РАН Сизенко Е.И.). – Волгоград. – 2017. – С. 74-79.

92. **Никитина, М.А.** Архитектура компьютерной подсистемы оценки качества рационов питания / М.А. Никитина // Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. – Москва. – 2017. – № 1. – С. 250-252.

93. Ивашкин, Ю.А. Мультиагентная имитационная модель желудочно-кишечного тракта человека / Ю.А. Ивашкин, **М.А. Никитина** // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – Минск. – 2017. – Т. 5. – С. 77-84.

94. **Никитина, М.А.** Информационные технологии в оценке и оптимизации рационов кормления продуктивных животных / М.А. Никитина // Разработка инновационных технологий производства животноводческого сырья и продуктов питания на основе современных биотехнологических методов: материалы Международной научно-практической конференции. ООО «СФЕРА», Поволжский Научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции, Волгоградский государственный технический университет; Под общей редакцией Горлова И.Ф. – 2016. – С. 379-383.

95. **Никитина, М.А.** Компьютерное проектирование оптимального рациона адекватного питания / М.А. Никитина, Ю.А. Ивашкин // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – Тамбов. – 2014. – № 4 (63). – С. 121-123.

#### Публикации в других научных изданиях

96. **Никитина, М.А.** Разработка программного обеспечения для статистической обработки сенсорных данных / М.А. Никитина, А.Н. Захаров // Мясные технологии. – 2019. – № 4 (196). – С. 18-23. DOI: 10.33465/2308-2941-2019-4-18-22

97. Zverev, S.V. Balance of protein supplements according to the criterion of convertible protein / S.V. Zverev, **М.А. Никитина** // Food systems. – 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 16-19. DOI: 10.21323/2618-9771-2019-2-1-16-19

98. **Никитина, М.А.** Цифровые технологии в оценке и анализе результатов дегустации пищевых продуктов / М.А. Никитина, А.Н. Захаров, Т.Г. Кузнецова, А.А. Лазарев // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2018. – № 3. – С. 12-19. DOI: 10.17586/2310-1164-2018-11-3-12-19

99. Титов, Е.И. Математическое моделирование многофункциональных модулей для специализированных мясных продуктов / Е.И. Титов, Е.В. Литвинова, **М.А. Никитина** // Мясные технологии. – 2017. – № 3 (171). – С. 49-51.

100. **Никитина, М.А.** Оценка адекватности рационов питания в информационной технологии их оптимизации / М.А. Никитина // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. – 2017. – Т. 19. – № 1. – С. 126-135.

101. **Никитина, М.А.** Моделирование как метод научного познания сложных мясных систем / М.А. Никитина, А.Н. Захаров, В.В. Насонова, А.Б. Лисицын // Теория и практика переработки мяса. – 2017. – Т. 2. – № 3. – С. 66-78. DOI: 10.21323/2414-438X-2017-2-3-66-78
102. Бородин, А.В. Определение критических контрольных точек по трофологической цепи производства мясных продуктов от поля до потребителя / А.В. Бородин, И.М. Чернуха, **М.А. Никитина** // Теория и практика переработки мяса. – 2017. – Т. 2. – № 1. – С. 69-83. DOI: 10.21323/2414-438X-2017-2-1-69-83
103. **Никитина, М.А.** IT-решения в оценке качества белка / М.А. Никитина, А.Н. Захаров // Мясные технологии. – 2016. – № 11 (167). – С. 21-23.
104. Ивашкин, Ю.А. Информационные технологии оптимизации адекватного питания человека / Ю.А. Ивашкин, М.А. **Никитина** // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. – 2016. – Т. 18. – № 1. – С. 49-60.
105. Лисицын, А.Б. Прогнозирование качества мясных изделий методами математического программирования / А.Б. Лисицын, **М.А. Никитина**, А.Н. Захаров, Е.Б. Сусь, В.В. Насонова, Л.И. Лебедева // Теория и практика переработки мяса. – 2016. – Т. 1. – № 1. – С. 75-90. DOI: 10.21323/2114-441X-2016-1-75-90
106. Ивашкин, Ю.А. Информационные технологии оптимизации адекватного питания человека / Ю.А. Ивашкин, М.А. **Никитина** // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. – 2015. – Т. 18. – С. 49.
107. Жаринов, А.И. Экспериментально-компьютерное моделирование рецептур майонезов, обогащенных йодом / А.И. Жаринов, М.Ю. Попова, **М.А. Никитина**, В.Ю. Маяускайте // Масложировая промышленность. – 2008. – № 1. – С. 34-37.
- Патенты, свидетельства Роспатент о регистрации базы данных, программ для ЭВМ**
108. Лисицын, А.Б. Микроструктура мяса и мясных продуктов / А.Б. Лисицын, В.А. Пчелкина, **М.А. Никитина**, И.М. Чернуха, С.И. Хвьяля // Свидетельство о регистрации базы данных RU 2020620238, 10.02.2020. Заявка № 2020620002 от 13.01.2020.
109. **Никитина, М.А.** Программа по сбору и статистической обработке сенсорных данных / М.А. Никитина, А.Б. Лисицын, Т.Г. Кузнецова, А.А. Лазарев, А.Н. Захаров // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017663406, 01.12.2017. Заявка № 2017660324 от 13.10.2017.
110. **Никитина, М.А.** Компьютерная программа по статистической обработке экспериментальных данных / М.А. Никитина, А.Б. Лисицын, А.Н. Захаров, В.В. Насонова, Е.К. Туниева // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017664268, 19.12.2017. Заявка № 2017660818 от 25.10.2017.
111. **Никитина, М.А.** "Подсистема статистического обеспечения биологических исследований" SSS BIO (Subsystem Statistical Support for Biological Research) / М.А. Никитина, А.Б. Лисицын, А.Н. Захаров, Е.Б. Сусь // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016613478, 28.03.2016. Заявка № 2016610998 от 09.02.2016.
112. **Никитина, М.А.** Конструктор рецептур / М.А. Никитина, А.Б. Лисицын, А.Н. Захаров, Е.Б. Сусь, В.В. Насонова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016616925, 22.06.2016. Заявка № 2016614606 от 05.05.2016.
113. **Никитина, М.А.** Пищевые продукты / М.А. Никитина, А.Б. Лисицын, А.Н. Захаров, Е.Б. Сусь, С.А. Пилюгина, А.С. Дыдыкин, А.В. Устинова // Свидетельство о регистрации базы данных RU 2015620557, 30.03.2015. Заявка № 2015620089 от 12.02.2015.
114. **Никитина, М.А.** Расчет нутриентной адекватности состава поликомпонентных мясных продуктов / М.А. Никитина, А.Б. Лисицын, А.Н. Захаров, Е.Б. Сусь, А.В. Устинова, А.С. Дыдыкин, // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015660124, 22.09.2015. Заявка № 2015610736 от 12.02.2015.
115. Тихомирова, Н.А. Способ производства функционального продукта / Н.А. Тихомирова, М.Е. Титова, **М.А. Никитина**, А.А. Астраханцев // Патент на изобретение RU 2536952 С1, 27.12.2014. Заявка № 2013126936/10 от 13.06.2013.