

*На правах рукописи*

**Архипов Данила Сергеевич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА 3D-ПЕЧАТНОГО  
КОМБИНИРОВАННОГО ПРОДУКТА НА МОЛОЧНОЙ ОСНОВЕ**

4.3.3 Пищевые системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (ФГАНУ «ВНИМИ»)

**Научный руководитель:** **Агаркова Евгения Юрьевна**  
доктор технических наук

**Официальные оппоненты:** **Бредихин Сергей Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ  
ВО «Российский государственный аграрный  
университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

**Захарова Василина Александровна**  
кандидат химических наук, младший научный  
сотрудник, ФГБУН Институт  
элементоорганических соединений  
им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
университет инженерных технологий»

Защита состоится «21» мая 2026 г. в 13 часов 00 минут на заседании объединенного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 24.1.515.01 по научной специальности 4.3.3 Пищевые системы (технические науки) при ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности», по адресу: 115093, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35, корп. 7, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности (ФГАНУ «ВНИМИ») и на официальном сайте ФГАНУ «ВНИМИ» <https://vnimi.org>

С авторефератом можно ознакомиться на официальных сайтах ВАК Минобрнауки РФ <http://vak.ed.gov.ru> и ФГАНУ «ВНИМИ» <https://vnimi.org>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
Совета 24.1.515.01

Т.С. Бычкова

### **Актуальность работы.**

Вопрос снабжения населения качественными пищевыми продуктами является транснациональной проблемой устойчивого развития, не теряющей своей значимости в исторической перспективе. В условиях глобального демографического роста и сопутствующего увеличения нагрузки на агропродовольственные системы наблюдается их качественная трансформация, что выявляет исчерпание возможностей дальнейшего экстенсивного развития существующего технологического уклада в сфере производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Эмпирическим основанием для данного утверждения выступают статистические индикаторы: численность населения, страдающего от хронического недоедания, превышает 700 млн человек, а объемы неиспользованного продовольствия (food loss and waste) приближаются к 1,3 млрд тонн в год. Эта диспропорция в глобальной агропродовольственной системе опосредует существенное антропогенное воздействие на окружающую среду, усугубляя экологический кризис.

Глобальным аспектом в пищевой промышленности является сохранение и поддержание качества и безопасности продукции, а также всех промежуточных ингредиентов при ее производстве. Продовольственная организация (ФАО) Организации Объединенных Наций (ООН) сообщает о более, чем 30% потерь продукции на всех этапах производства и логистики в пищевой промышленности.

Наиболее вероятным решением является переход к персонифицированному питанию. Соответственно актуализируется глобальная задача замены парадигмы питания от производства пищи в промышленных условиях к применению 3D-принтеров. Априори такое развитие технологий предполагает опосредованную замену традиционных ассортиментных линеек и переход к производству компонентов для печати продуктов питания. Своевременное развитие в данном направлении способствует получению не только конкурентоспособной на международном рынке продукции с высокой добавленной стоимостью, но и принципиально видоизменит экспортные позиции в сельскохозяйственном направлении, повысит его эффективность в целом и глобально в перспективе поменяет сырьевой вектор развития страны.

Актуальность данного направления подтверждается активной разработкой в последние годы ряда официальных документов, которые призваны направленно развивать аддитивные технологии в РФ, в частности: Стратегия развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 года (распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 г. №1913-р); Приказ Министерства просвещения РФ от 08.11.2023 г. N 835 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по специальности 15.02.09 Аддитивные технологии»; Приказ Росстандарта от 28.02.2018 г. N 383 «Об организации деятельности технического комитета по стандартизации «Аддитивные технологии» (ТК 182) и др.

Преимуществом аддитивных технологий является возможность создания уникальных и сложных дизайнов форм продуктов, высокая точность печати, использование разнообразных материалов. К недостаткам существующих

пищевых чернил можно отнести ограниченный срок годности, наличие единых систематизированных подходов и узкое область их применения. В настоящее время они используются преимущественно для нанесения логотипов, надписей или декоративных элементов на поверхность пищевых продуктов или нанесения съедобной маркировки. Основной сложностью при создании 3D чернил на молочной основе является создание текучей, и в то же время быстро застывающей структуры, что должно быть обеспечено научно обоснованным подбором компонентов.

Соответственно, концепция работы заключалась в систематизации предметного поля по аддитивным технологиям с позиции адаптации существующих решений в область молочной промышленности; определении перспективных структурно-механических характеристик изделий; разработке технологии молочных чернил и создании 3D-продукта на молочной основе для сегмента HoReCa с применением современного приборного обеспечения.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

Значительный вклад в создание аддитивных технологий, исследование прочностных характеристик материалов, особенностей формирования структуры пищевых систем, маркетинговые исследования рынка внесли отечественные и зарубежные специалисты Гольдштейн Ю. Б., Зобкова З. С., Малинин Н. Н., Работнов Ю. Н., Петров А. Н., Семипятный В. К., Харитонов В. Д., Dou X., Liu Z. B., Ross M. M., Sun, J., Wang Y. H, Zhu S. C. и др.

Множество научно-практических решений, предложенных учеными, стали основой для развития технической и технологической баз для 3D-печати и функционирования компаний Modern Meadow, 3D Systems & Hershey's, Natural Machines, TNO & Barilla, FELIXprinters, Revo Foods и др. на российском и международном рынках.

#### **Цели и задачи диссертационного исследования.**

Целью работы являлось создание аддитивной технологии 3D-продукта на молочной основе для сегмента HoReCa с интегрированной методологией расчета параметров потребительской модели, учитывающей трансформационные особенности структурно-механических свойств сырья и геометрически-конструктивные параметры изделия.

Задачами диссертационной работы являлись:

1. Провести анализ мировых тенденций развития аддитивных технологий, определить базовые принципы получения «пищевых чернил» (ПЧ), принципы управления процессом печати путем корректировки их технологии, изменения G-кода слайсера и перспективных направлений интеграции 3D-технологий в сегменте HoReCa с учетом российских потребительских паттернов.

2. Разработать методологию расчета потребительской модели 3D-продукта, учитывающую геометрическую форму, параметры конструктивного оформления, физико-химические характеристики систем, влияющие на итоговую модель и дизайн напечатанного изделия.

3. Исследовать зависимости свойств 3D-пищевых систем от их состава, в частности, от массовой доли белка с учетом физико-химических и функционально-

технологических свойств печатных систем, определить производственное решение для обеспечения фазового перехода при конструировании основы продукта.

4. Разработать теоретические модели с учетом предельных значений напряжений, при которых произойдет переход материала в пластическое состояние на основе выдвинутых гипотез.

5. Исследовать взаимосвязь механических характеристик от состава образцов пищевых чернил с учетом разработанной теоретической модели, провести сравнение расчетных значений максимальных напряжений, возникающих в сечениях изделия с эмпирическими значениями физических пределов текучести.

6. Разработать модель взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств материала для 3D-печати, позволяющую как рассчитывать оптимальные отношения размера изделия и толщины стенки с учетом коэффициента запаса устойчивости для механических характеристик напряжения, так и выполнять обратное действие.

7. Разработать технологию и исследовать потребительские характеристики готового 3D-продукта с начинкой, оформить документ по стандартизации и осуществить внедрение разработанной технологии на предприятиях HoReCa.

#### **Научная новизна.**

1. Развита концепция трансформации промышленных технологий продуктов питания к производству «пищевых чернил» для 3D-печати в рамках глобальной инициативы перехода к персонализации питания.

2. Разработаны методология проектирования и принцип моделирования 3D-продукта на молочной основе, учитывающий геометрические, конструктивные и физико-химические характеристики готовой продукции, с учетом технологических особенностей сырья, комплексно обеспечивающих получение продукта заданной формы и свойствами.

3. С позиции применимости в аддитивных технологиях предложен алгоритм получения/применения «пищевых чернил» на молочной основе с учетом физико-химических и функционально-технологических свойств молочно-белковых систем пластично-вязкой консистенции.

4. Предложен новый методический подход к оценке прочностных характеристик 3D-продукта расширением области оценочных критериев показателями напряжения сдвига, сжатия и растяжения; доказана его применимость к продукции аддитивных технологий.

#### **Теоретическая и практическая значимость.**

Осуществлено комплексное развитие системы знаний с прикладным потенциалом в области разработок моделей 3D-продуктов, учитывающих геометрические и конструктивные характеристики готовых изделий, физико-химические характеристики систем.

Разработано программное обеспечение (ПО) для моделирования формы и конструктивных особенностей 3D-продуктов.

Разработана композиция «пищевых чернил» на молочной основе пластично-вязкой консистенции, предложены технологические решения для обеспечения стабильной структуры напечатанного 3D-продукта.

Создан алгоритм 3D-печати комбинированного плавленого сыра и разработаны соответствующие команды для корректировки G-кода.

Систематизирован существующий научно-технический материал по аддитивным технологиям, рассмотрена перспектива их применения в производстве пищевых продуктов в рамках качественного перехода к персонализации питания, а также определен потенциал дальнейшего совершенствования процессов производства пищевых 3D-продуктов, объединенный в аналитическом материале «Киберфизическая система пищевой промышленности Х.0. Цифровые и аддитивные технологии».

Разработана технология и документ по стандартизации на продукт – сыр плавленый «ПринтЧиз» (ТУ 10.51.40-111-00419785-2025), осуществлено его внедрение на предприятиях общественного питания и получены положительные отзывы.

#### **Методология и методы исследования.**

Методология работы базировалась на плане исследований, включенных в государственные задания по теме «Совершенствование методологических основ контроля качества процессов и продуктов технологий переработки молока с учетом глобальных изменений, концептуально трансформирующих традиционные основы питания» (шифр FNSS-2022-0004) и по теме «Развить принципы интегральных процессуальных и методологических наукоемких решений для повышения эффективности и экологичности промышленных технологий переработки молока в условиях последовательного ряда переделов» (Шифр FNSS-2025-0003). В процессе проведения экспериментов задействованы стандартизованные и оригинальные методы исследований свойств молочных многокомпонентных систем, включая статистическую обработку полученных данных. Работа выполнена во ФГАНУ «ВНИМИ» на базе Лаборатории технологий молочных продуктов (до января 2026 года «Лаборатория биотехнологии молока и молочных продуктов»).

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

Методология предельного равновесия в проектировании геометрических и конструктивных характеристик 3D-продуктов на молочной основе.

Адаптированный алгоритм 3D-печати продукта с биоинформационным программным обеспечением.

Зависимости формирования структурно-механических и органолептических свойств 3D-печатного продукта от его состава.

Технология плавленого сыра с начинкой, производимого на пищевом 3D-принтере, оформленная в виде технических условий, и результаты внедрения разработанной технологии на предприятиях HoReCa.

#### **Степень достоверности.**

Работа построена на общепризнанных научных принципах и подходах, формализованных соискателем лично. В экспериментальной части работы задействованы современные методы исследований и сертифицированное аналитическое оборудование.

Математически обоснованная многократность проведенных анализов, высокая воспроизводимость и статистическая обработка результатов подтверждают их корректность и соответствие базовым представлениям в предметной области. Достоверность результатов исследований подтверждена 3-5-кратной повторностью проведения экспериментов с последующей статистической обработкой массива данных.

Полученный теоретический и экспериментальный материал в полном объеме опубликован в значимых рецензируемых изданиях.

#### **Личный вклад автора.**

Изложенные в диссертации исследования проведены автором лично в ходе многолетней научной работы. Формулировка научной проблемы, постановка цели и конкретных задач, а также общая структура исследований разработаны самостоятельно. Теоретические выводы и данные экспериментов, представленные в работе, получены, проанализированы и интерпретированы автором. Самостоятельно разработан документ по стандартизации.

#### **Апробация результатов исследований.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на международных и всероссийских конференциях, симпозиумах и конкурсах различного уровня: VII Международный Симпозиум «INNOVATIONS IN LIFE SCIENCES» 21 – 23 мая 2025 г. на базе ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (г. Белгород), Международная научно-практическая конференция «Устойчивое технологическое развитие аграрно-пищевых систем – гарантия продовольственной безопасности», 19-20 июня 2025 г., ГНУ НИИММП, (г. Волгоград), XI Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство» 12 декабря 2025 г. (г. Воронеж), конкурс постерных докладов молодых ученых ФГАНУ «ВНИМИ», проводимый в рамках Заседания бюро Отделения сельскохозяйственных наук РАН на тему: «Направления прорывных исследований по достижению технологического лидерства в производстве пищевых продуктов» 28 ноября 2025 года.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 8 печатных работах, в том числе: 4 статьи в журналах из перечня ВАК, 1 монография, 2 статьи в журналах и материалах конференций, индексируемых РИНЦ (RSCI), 1 программа для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает в себя введение, 3 логически связанных между собою главы, основные результаты и выводы, список сокращений и условных обозначений, список литературы и 4 приложения. Диссертация изложена на 122 страницах, содержит 14 таблиц, 64 рисунка. Библиографический список состоит из 101 источника литературы отечественных и зарубежных авторов.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, аргументирована научная новизна, сформулирована цель и поставлены задачи, показана практическая

значимость, представлены методологические основы работы, достоверность и уровень апробации, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** обозначена проблема обеспечения населения качественными пищевыми продуктами с акцентом на необходимость персонализации рационов питания для сокращения объемов пищевых отходов. Показано преимущество аддитивных технологий для создания уникальных продуктов с высокими потребительскими характеристиками. Обозначены перспективы развития направления 3D-печати на молочной основе, возможные технологические приемы для обеспечения качества молочных печатных 3D-продуктов.

Проанализированы основные ингредиенты, в настоящее время используемые для создания пищевых 3D-продуктов, их свойства и особенности молекулярного строения. Изучен зарубежный и немногочисленный отечественный опыт создания 3D-продуктов с использованием молочных ингредиентов. Показана первоочередная роль реологических свойств при формировании структуры пищевых 3D-печатных изделий. Подробно расписаны свойства наиболее распространенных молочных продуктов для 3D-печати, выявлена превалирующая роль молочного белка в формировании текстуры 3D-изделий.

Проведен теоретический анализ основных свойств «молочных чернил» для 3D-печати, показана важность таких свойств и характеристик как вязкость и модуль упругости. Проанализированы основные факторы, влияющие на 3D-печать молочных систем, в частности активная кислотность и температура. Проведен обзор основных технологий, используемых в пищевой промышленности с точки зрения их преимуществ и недостатков, выявлено что для молочных систем наиболее рациональными способами 3D-печати является экструзионная печать методом послойного напыления.

**Во второй главе** представлены методология, объекты и методы исследований. Схема организации проведения экспериментальных работ представлена на Рисунке 1.

Объектами исследований на разных этапах работы служили молоко-сырьё нормализованное, закваска на чистых культурах *Lactococcus* штамм 711(2) и *Streptococcus thermophilus* штамм КБ из коллекции лаборатории прикладной микробиологии и геномики микроорганизмов ФГАНУ «ВНИМИ», молоко сухое обезжиренное ПАО Молочный Комбинат «Воронежский» (Россия), концентрат сывороточных белков ПАО Молочный Комбинат «Воронежский» (Россия), мед цветочный жидкий компания «Алтайвита» (Россия), соль поваренная, соль-плавитель «Фосфомикс» - 90 (Е 339), ООО «Рассвет» (Россия), 3D-печатные формы.

При выполнении работы применялись стандартизованные методы. Все результаты представлены по данным трех независимых экспериментов как среднее значение. Для обработки полученных данных и построения графиков использовали стандартные статистические методы на базе табличного процессора Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation Inc., США) и программного обеспечения TableCurve 3D (Grafiti LLC Headquarters, США).

В рамках исследования потребительских предпочтений, связанных с применением пищевых 3D-принтеров, было проведено анкетирование с участием 1211 респондентов из 12 стран мира. Целью исследования стало выявление важных факторов, влияющих на определение портрета потенциального потребителя продуктов, созданных с использованием аддитивных технологий.

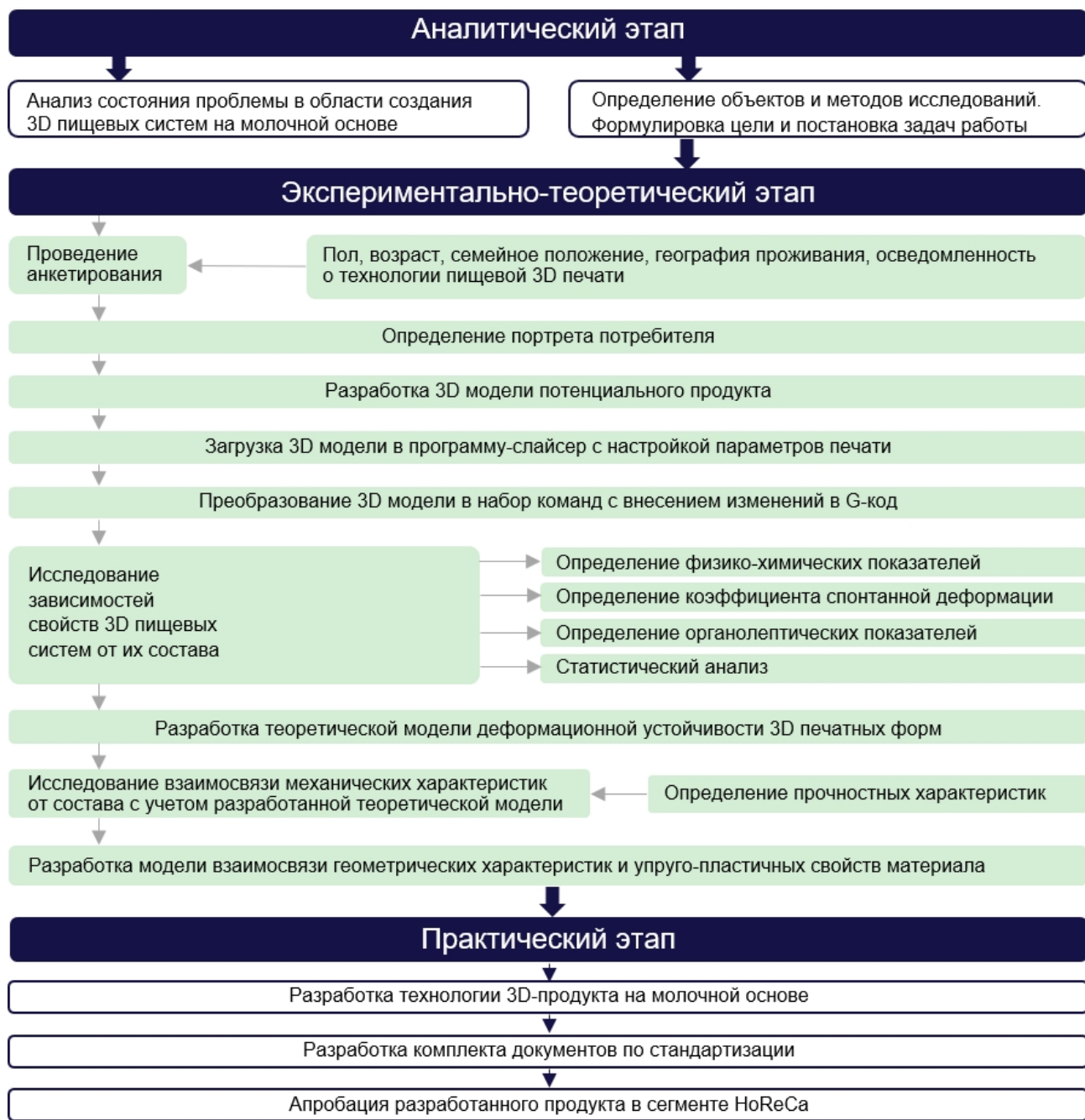


Рисунок 1 – Схема проведения исследований

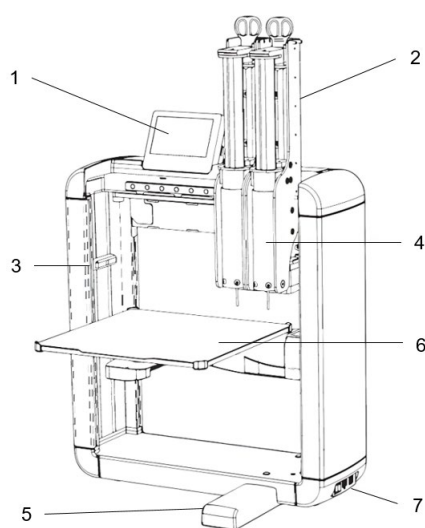
Для оценки перспективности аддитивных технологий в пищевой отрасли был проведен SWOT-анализ, который позволил выявить как сильные (S, strengths) и слабые стороны (W, weaknesses); так и возможности (O, opportunities) и угрозы (T, threats).

В работе использовался пищевой 3D-принтер FELIX Food Switch Head (Рисунок 2), разработанный компанией FELIXprinters (Нидерланды), включающий экструзионный блок с двойным моторизованным поршневым механизмом с возможностью переключения. Перед началом в левый картридж, оснащённый насадкой с диаметром выходного отверстия 2 мм, помещали ПЧ с заданными концентрациями КСБ и СОМ. В правый картридж, оснащённый насадкой с диаметром выходного отверстия 1 мм, помещали мёд.

Во избежание дефектов печати, до начала печати из ПЧ и мёда многократным возвратно-поступательным движением поршней в картриджах были предварительно удалены захваченные при наполнении пузырьки воздуха. Затем встроенными средствами 3D-принтера нагрели с последующей стабилизацией содержимое левого и правого картриджа до температуры 80 и 35 °С, соответственно.

В качестве 3D-продукта печати выступал куб с длиной ребра 20 мм, сформированный гранями из 19 слоёв ПЧ и заполненный мёдом.

В процессе печати работой левого картриджа формировали дно продукта, а также боковые грани высотой 12 слоёв ПЧ. После этого печать продолжали правым картриджем, заполняя мёдом внутренний объём продукта в режиме прямой подачи. Печать заканчивали левым картриджем до завершения процесса.



*1 – экран, 2 – модуль для двух шприцев с  
экструдером, 3 – камера, 4 – держатель для  
шприца с подогревом, 5 – опорный кронштейн,  
6 – стол-платформа с подогревом,  
7 – выключатель/выключатель питания*

Рисунок 2 – Схематическое изображение 3D-принтера FELIX Food Switch Head

Создание 3D-модели было произведено с помощью профессионального программного обеспечения для 3D-моделирования, анимации и визуализации Autodesk 3Ds Max. Принтер оснащен интерфейсами, обеспечивающими полный контроль над процессом печати. Одной из его ключевых особенностей является возможность выбора различных режимов работы, включая доступ к файлам, хранящимся на внешних носителях, таких как USB-накопители, а также управление задачами печати, переданными через беспроводные сети или

сохраненными во внутренней памяти устройства. Возврат в главное меню обеспечивает быстрый переход между основными разделами, что упрощает навигацию.

Испытания прочностных характеристик проводили на универсальной испытательной машине EZ Test мод. EZ-LX-1, «Shimadzu Corporation» (Япония) с максимальной мощностью установленного детектора силы 2 кН, длиной хода траверсы 920 мм с использованием профессионального программного обеспечения «TRAPEZIUM X». Прибор представляет собой устройство высокой точности, обеспечивающее возможность многосторонних испытаний материала на растяжение, сжатие и изгиб. Применительно к исследованию прочностных характеристик 3D-печатных форм была сконструирована камера. Размер отверстий подходит под исследование 3D-изделий с различной площадью поверхностей на сдвиг и сжатие. Для исследования силы материала 3D-изделия на растяжение на принтере изготавливалась нить длиной 5 см и помещалась между зажимами прибора, и далее проводилось измерение согласно методике.

Измерение разрушающего напряжения и относительного удлинения при разрыве проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 14236-81. Для увеличения массива экспериментальных данных проводили испытания с увеличенной повторностью испытаний (20 повторных испытаний каждого образца в продольном и поперечном направлениях). За результат испытаний принимали среднее арифметическое значение, округленное до двух значащих цифр.

**В третьей главе** представлены данные анкетирования позволили выявить важные тенденции в восприятии аддитивных пищевых технологий среди различных групп потребителей. Результаты были использованы при разработке и выборе итоговой формы напечатанного изделия. Большинство респондентов проявили интерес к аддитивным технологиям и определились с предпочтительным вкусом 3D-печатного изделия (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Визуализация потребительских предпочтений

Проведенный SWOT-анализ, несмотря на определенные слабые стороны и угрозы, выявил очевидную перспективность внедрения 3D-печати в пищевые технологии, поскольку количество плюсов в аддитивизации традиционных технологий было выявлено значительно больше, чем минусов.

Непосредственно процесс создания модели происходил в несколько этапов. На первом этапе моделирования была создана заготовка внешнего куба и заданы параметры: длина, ширина и высота равные 2 см. На втором этапе была сформирована внутренняя полость. На заключительном этапе из внешнего куба была выделена область внутреннего куба и получена готовая 3D-модель, преобразованная в набор команд для управления 3D-принтером и загруженная в программу-слайсер Simplify3D с последующей генерацией G-кода. G-код представляет собой набор команд и инструкций, определяющих траекторию перемещения печатающих головок, и позволяет достаточно точно представить форму потенциального изделия (Рисунок 4).

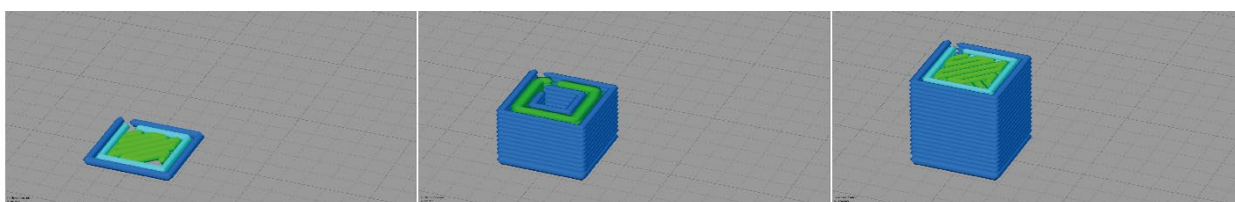


Рисунок 4 – Предварительный просмотр послойной печати изделия

На следующем этапе путем варьирования соотношения основных ингредиентов, входящих в потенциальный продукт, были получены по 6 образцов ПЧ с СЦМ и с СОМ. Они отличались друг от друга по массовым долям жира (Ж), белка (Б) и углеводов (УВ) при равной массовой доле сухих веществ (СВ) в системе, составившей 43,7%. Физико-химические показатели образцов представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические показатели образцов

Номер образца	Массовая доля, % (образцы с СЦМ)			Номер образца	Массовая доля, % (образцы с СОМ)		
	Ж	Б	УВ		Ж	Б	УВ
0	7,4±0,8	24,4±0,3	6,7±0,8	0	5,9±0,8	24,8±0,3	7,2±0,9
1	8,0±0,8	22,8±0,3	7,6±0,9	1	5,7±0,8	23,6±0,3	8,4±1,0
2	8,7±0,8	21,0±0,3	8,7±1,0	2	5,6±0,8	22,0±0,3	9,8±1,2
3	9,3±0,8	19,5±0,3	9,7±1,2	3	5,5±0,8	20,7±0,3	11,0±1,3
4	9,9±0,8	17,9±0,3	10,6±1,3	4	5,3±0,8	19,4±0,3	12,2±1,5
5	10,8±0,8	15,9±0,3	11,9±1,4	5	5,1±0,8	17,7±0,3	13,8±1,7

Для определения влияния состава ПЧ на сохранность геометрической формы 3D-продукта по каждому образцу было определено значение введенного в работе коэффициента спонтанной деформации ( $K_{сд}$ ), выраженного в процентах, как доля слоёв, имеющих визуальные признаки деформации, от их общего количества. Полученные результаты, округленные до целого значения, представлены в Таблице 2.

В результате увеличения массовой доли сухого молока в составе ПЧ был отмечен нелинейный отклик системы в виде значений  $K_{сд}$ . На основании выдвинутой в работе гипотезы о превалирующей роли белка при 3D-печати

пищевых систем на молочной основе можно предположить существование некоторого интервала массовых долей белка в составе ПЧ, в пределах которого значения  $K_{сд}$  находятся в допустимом интервале, соответствующем максимум потребительских свойств 3D-продукта.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы о важной роли белка в процессе формирования структуры 3D-продуктов были определены математические описания взаимосвязи массовой доли белка и значений  $K_{сд}$ . Для ПЧ с СОМ математическое описание имело вид:

$$y = 100 \cdot \exp \left\langle -\exp \left\{ a + \frac{1}{2} \cdot b \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\omega_{pr} - c}{d \cdot \sqrt{2}} \right) \right] \right\} \right\rangle, \quad (1)$$

Таблица 2 – Коэффициент спонтанной деформации и количество поврежденных слоёв

Номер образца	ПЧ с СОМ		ПЧ с СЦМ	
	п, шт.	$K_{сд}$ , %	п, шт.	$K_{сд}$ , %
0	3	15,8	1	5,3
1	2	10,5	1	5,3
2	0	0	0	0
3	8	42,1	9	47,3
4	9	47,3	10	52,6
5	9	47,3	15	78,9

а для ПЧ с СЦМ:

$$y = 100 \cdot \exp \left\langle -\exp \left\{ a + b \cdot \exp \left[ -\ln 2 \cdot \frac{\ln^2 \left( 1 + \frac{(\omega_{pr} - c) \cdot (e^2 - 1)}{d \cdot e} \right)}{\ln^2 e} \right] \right\} \right\rangle, \quad (2)$$

где  $y$  – значение  $K_{сд}$ , %;  $\omega_{pr}$  – массовая доля белка в составе ПЧ, %;  $a$  – эмпирическая константа;  $b, c, d$  и  $e$  – эмпирические коэффициенты.

Полученные математические описания адекватно отражают взаимосвязи независимой и зависимой переменных (Таблица 3).

Таблица 3 – Статистические характеристики математических описаний

Вид ПЧ	Атрибуты	Константа и коэффициенты					Значимость по критерию Фишера ( $P > F$ )	$r^2$
		a	b	c	d	e		
с СОМ	значения	1.1332	-2.8857	19.7597	-1.7251	–	0.01056	0.92828
	значимость по критерию Стьюдента ( $P >  t $ )	0.09503	0.02297	0.00543	0.04192	–		
с СЦМ	значения	-0.2901	1.8679	22.4430	3.5462	1.1634	0.99999	0.00001
	значимость по критерию Стьюдента ( $P >  t $ )	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001		

Модели зависимости  $K_{сд}$  от массовой доли белка, соответствующие полученным математическим описаниям, представлены на Рисунке 5.

Анализ моделей показывает, что имеет место отличие в кинетике  $K_{сд}$  в зависимости от наличия жира в сухом молоке, входящем в состав ПЧ: присутствие

жира изменяло кинетику с сигмоидной, демонстрирующей снижение  $K_{сд}$  с увеличением массовой доли белка, на экстремальную, отличающуюся снижением  $K_{сд}$  только на отдельном локальном интервале. Таким образом предположение и наличия оптимальных диапазонов массовой доли белка в ПЧ, в пределах которого  $K_{сд}$  принимает минимальные значения, находит своё аналитическое подтверждение.

В силу высокой дискретности экспериментальных данных, для определения рациональных диапазонов массовой доли белка в составе ПЧ целесообразным является использования функции желательности Харрингтона. Различия кинетик  $K_{сд}$  при изменении массовой доли белка для ПЧ с СОМ и СЦМ позволяют сделать вывод о неприменимости одного вида функций желательности: для описания ПЧ с СОМ предпочтительнее односторонняя функция, тогда как для ПЧ с СЦМ – двухсторонняя.

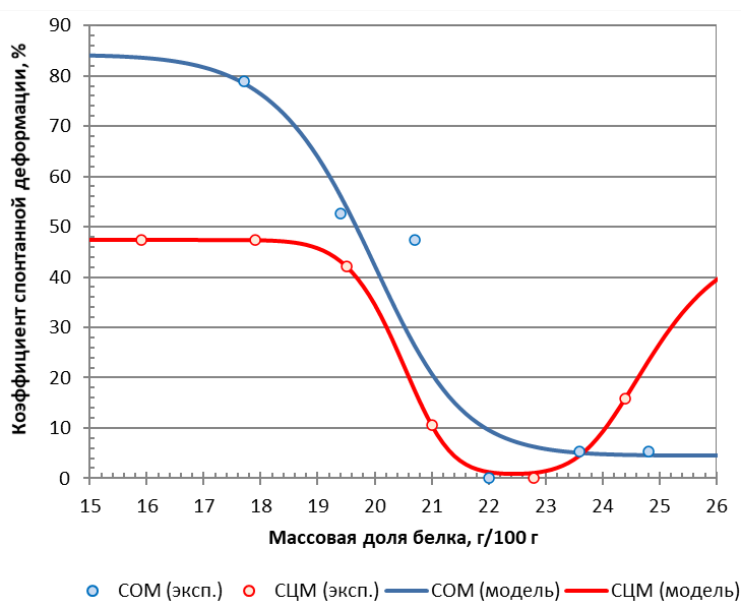


Рисунок 5 – Моделирование влияния массовой доли белка в ПЧ на  $K_{сд}$

Односторонняя функция желательности имела вид:

$$d = \exp \left\{ -\exp \left[ -\left( a + b \cdot \omega_{pr} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $d$  – значение желательности, доли 1;  $a$  – константа;  $b$  – коэффициент.

Двухсторонняя функция желательности имела вид:

$$d = \exp \left[ -\left| \frac{2 \cdot \omega_{pr} - (\omega_{pr(\max)} + \omega_{pr(\min)})}{\omega_{pr(\max)} - \omega_{pr(\min)}} \right|^n \right], \quad (4)$$

где  $\omega_{pr(\min)}$  и  $\omega_{pr(\max)}$  – соответственно, минимальное и максимальное значения массовой доли белка в составе ПЧ, соответствующие референтному значению желательности  $d = 0.3679$ , %;  $n$  – показатель степени.

Определение оптимальных интервалов значений массовой доли белка в составе СП проводили в 2 этапа.

На первом этапе был выполнен выбор референтных точек функций желательности, где в качестве максимума принято значение желательности, соответствующее границе зон «хорошо» и «очень хорошо» – 0,8. Это значение

сопоставлено значению  $K_{сд} = 5 \%$ , что в настоящем исследовании соответствует одному деформированному слою. В качестве нижней границы принято значение желательности 0,3679 и соответствующий ему значение  $K_{сд} = 15\%$ . При превышении данного значения  $K_{сд}$  деформация конечного продукта становится визуально критичной: продукт утрачивает потребительскую привлекательность.

На втором этапе для каждого референтного значения  $K_{сд}$  на основании полученных моделей (1) и (2) были вычислены соответственные значения массовой доли белка в составе ПЧ, и уже на основании пар «массовая доля белка – значение желательности» были определены параметры функции желательности Харрингтона для вариантов СОМ и СЦМ.

Полученные в результате расчётов, выполненных в соответствии с описанным алгоритмом, функции желательности представлены на Рисунке 6.

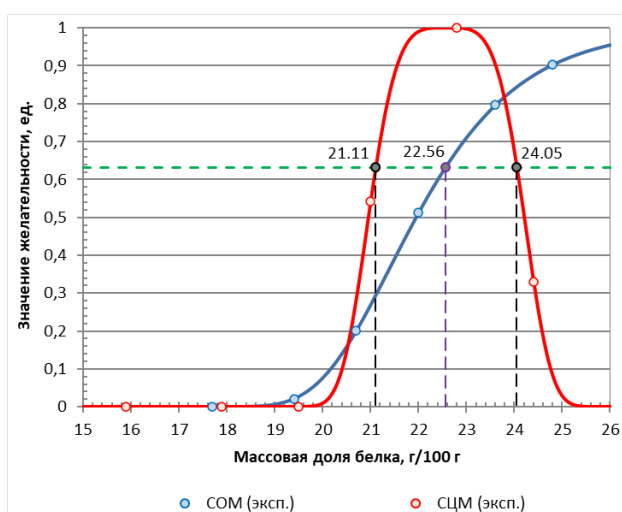


Рисунок 6 – Влияние массовой доли белка в «3D-чернилах» на значение желательности

В силу двусторонности функции желательности рациональное множество приемлемых значений массовой доли белка в рецептуре ПЧ данного варианта находится в интервале между двумя критическими точками, соответствующими значению желательности 0,6321. В результате рациональным является достаточно узкий интервал значений массовых долей белка в составе ПЧ от 21,11 до 24,05%.

Вызывает интерес причина такого различия. Вероятнее всего она связана с повышенной массовой долей жира в продуктах с СЦМ. При этом интервальный характер оптимальных значений для данного варианта ПЧ предполагает, что механизм вклада жировой составляющей весьма неоднозначен, и выяснение его требует проведения дополнительных исследований.

Проведенный органолептический анализ с использованием пятибалльной шкалы показал, что более высокими баллами по всем дескрипторам дегустаторы отметили образцы, в рецептуру которых входило СОМ, оценка за общее впечатление также превышала оценку образцов СЦМ (Рисунки 7 и 8).

В образцах СЦМ во вкусовых ощущениях была зафиксирована неприятная липкость и клейкость, обусловленная более высоким содержанием казеина. Что

касается показателя цвета, то в образцах с СОМ дегустаторы поставили наивысшую оценку, а в образцах с СЦМ она была ниже и составила 4 балла. Цвет образцов с СОМ был более приятный, нежный, кремовый. Что характерно, как в образце с СОМ, так и с СЦМ балльная оценка по всем показателям кроме цвета снижалась, начиная с образца №3 до образца № 5 показатели снижались незначительно. Данные органолептической оценки коррелируют с данными изложенными в предыдущем разделе, поскольку  $K_{сд}$  печатных форм также увеличивалась, начиная с третьего образца, в котором массовая доля белка в случае с СЦМ она составила 19,5%, а в образце с СОМ – 20,7% (то есть величины сравнимы друг с другом).

Из этого можно сделать вывод о подтверждении гипотезы о том, что массовая доля белка является основным фактором, определяющим органолептические и прочностные характеристики 3D-печатных форм.

В связи с невозможностью адекватной оценки структурных показателей полученных 3D-образцов по показателю вязкости, произведен теоретический и экспериментальный анализ поведения кубического образца при различных видах механической нагрузки с целью определения границы перехода материала из упругого в пластическое состояние и дальнейшей оценки его стабильности.

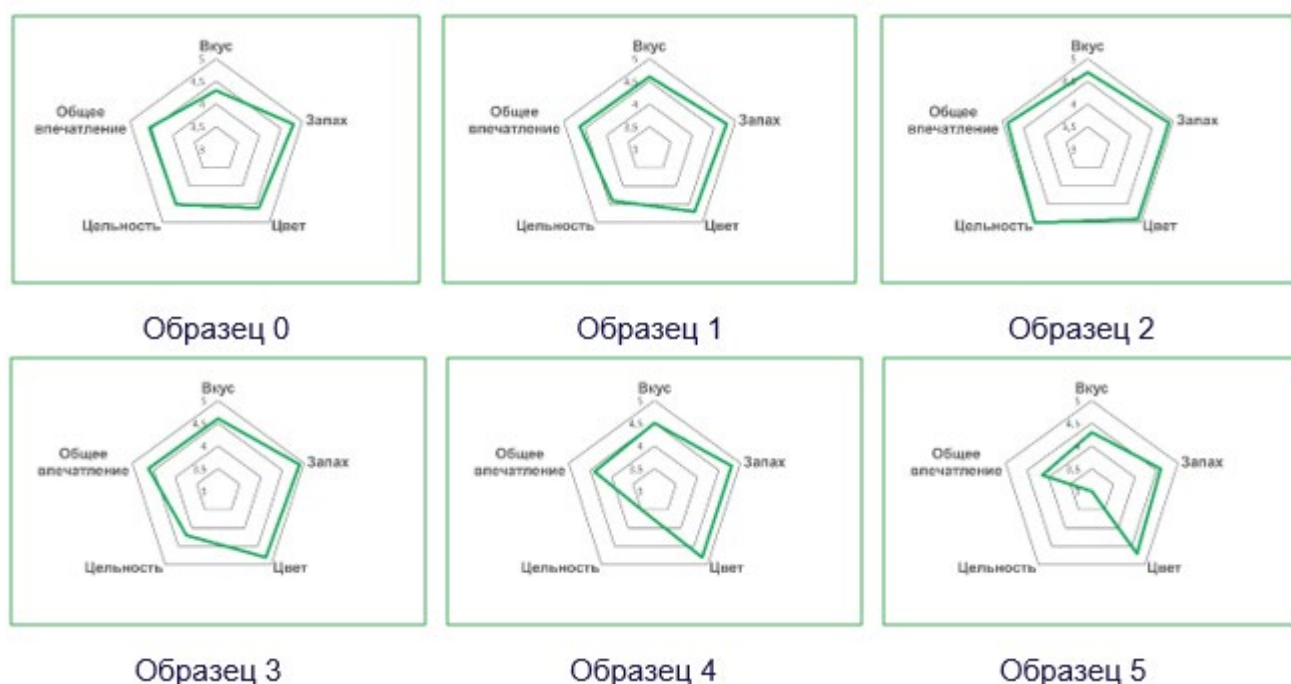


Рисунок 7 – Профилограммы полученных образцов с СОМ

Для построения теоретической модели аксиоматически приняты некоторые допущения, необходимые для нахождения наибольших значений напряжений, возникающих в исследуемом образце:

- упругие деформации, возникающие в материале, являются малыми, изгибающие моменты при воздействиях отсутствуют;
- исследуемый материал является макроскопически однородным по всему объему;

- напряжения, возникающие в материалах стенок, являются постоянными вдоль всей толщины стенок.

Из 3D-печатных форм для моделирования был выбран простейший объект кубической формы, ранее исследованный по физико-химическим и органолептическим показателям. Геометрия объекта моделирования представлена на Рисунке 9.

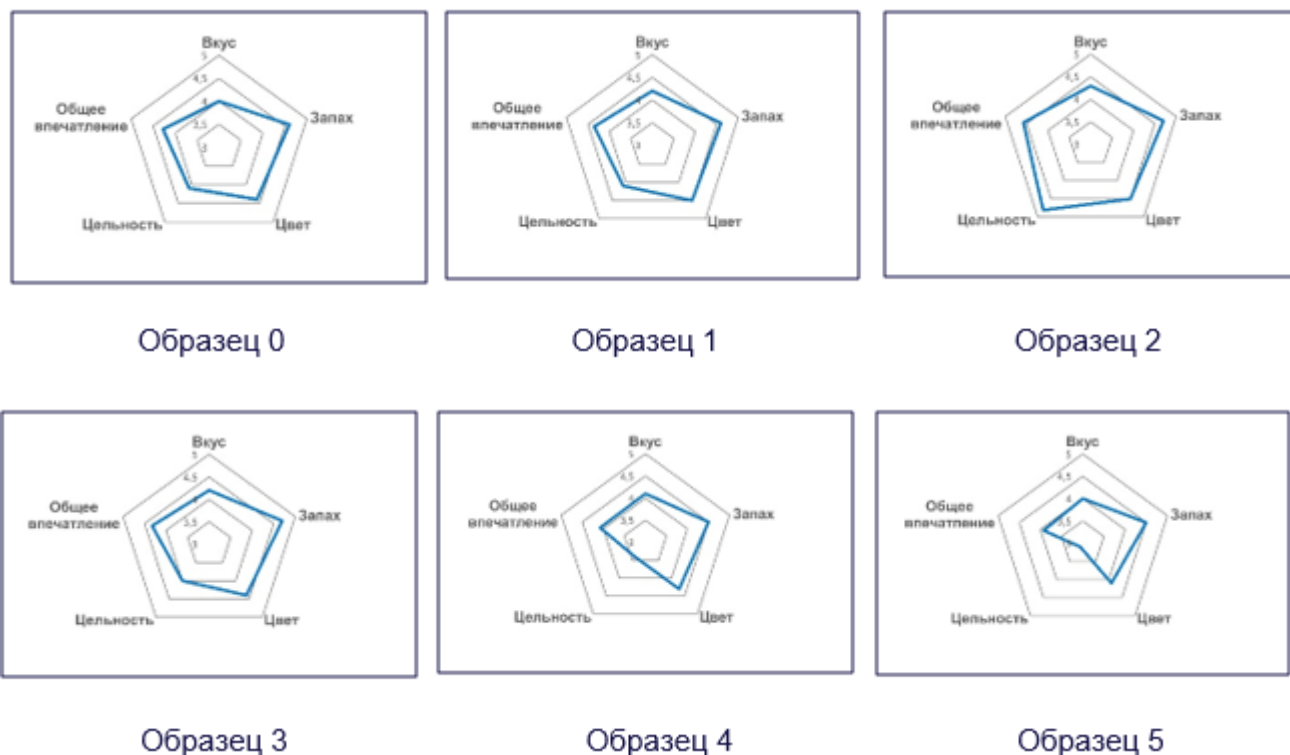
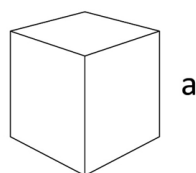
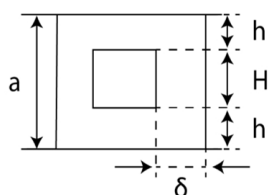


Рисунок 8 – Профилограммы полученных образцов с СЦМ

В качестве физической характеристики определена плотность материалов:  $\rho_1$  - плотность материала стенок (непосредственно «чернила»);  $\rho_2$  - плотность жидкости в полости (мёд).



а)



б)

$A$  - сторона кубика  
 $h$  - толщина «крышки» (\*  $h = \delta$ )  
 $H$  - высота «стенок» (\*  $H = a - 2\delta$ )  
 \* - Кубическая симметричная система

Рисунок 9 – Вид предпечатной 3D-формы: а) в натуральном виде; б) в разрезе

Метод определения устойчивости кубика состоит в том, что он будет рассмотрен в момент, предшествующий возникновению пластических деформаций.

Напряжение и деформации в кубике будут возникать вследствие воздействия внешних сил - сил гидростатического давления со стороны жидкости на стенки полости и объемная сила тяжести (сила действует на каждый элементарный объем и пропорционально его массе).

В результате расчетов найдены условия, когда эти напряжения будут наибольшими. Показано, что наибольшие напряжения растяжения и сдвига возникают в нормальном сечении, они равны и рассчитываются по Формуле 5:

$$\sigma = \frac{\rho_2 g (a - 2\delta)^2}{2\delta}, \quad (5)$$

где  $\rho_2$  - плотность жидкости в полости (мёд),  $(a - 2\delta)$  – внутренняя ширина полости,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\delta$  – толщина стенок кубика

Далее было получено уравнение зависимости напряжения сжатия от физических параметров материала и геометрических размеров объекта, которое позволит вычислить наибольшее значение напряжения сжатия (Формула 6).

$$\sigma = \frac{\rho_1 a^2 h + 4\rho_1 (a\delta - \delta^2) H}{4(a\delta - \delta^2)} g, \quad (6)$$

где  $\rho_1$  - плотность материала стенок,  $\alpha$  - угол наклона сечения,  $\delta$  – толщина стенок кубика,  $g$  – ускорение свободного падения

В качестве основы для интерпретации экспериментальных результатов измерения прочностных характеристик использовалась теория упругопластических деформаций.

Для интерпретации экспериментальных данных и определения критических значений напряжений использована гипотеза Людвики о существовании единой диаграммы деформирования, не зависящей от типа напряженного состояния (Рисунок 10, а). При этом, при исследовании на сжатие не во всех случаях пластичный материал можно довести до разрушения, он имеет тенденцию сплющиваться, и диаграмма может выглядеть несколько иначе (Рисунок 10, б).

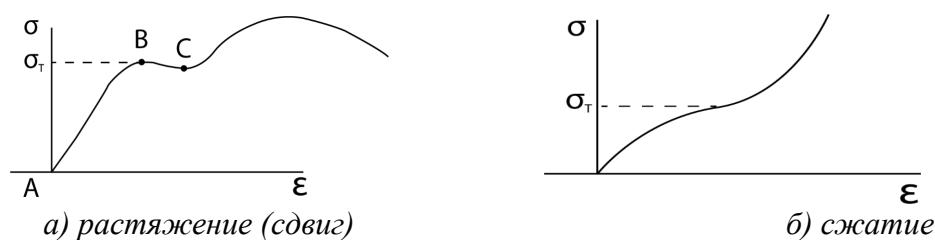


Рисунок 10 – Диаграмма прочностных характеристик

На участке АВ проиллюстрирован процесс упругой деформации, далее на участке ВС материал деформирует при постоянной силе, то есть происходит течение, или пластическая деформация.

Точка перехода В (соответственно, напряжение  $\sigma_T$ , определяемое как предел текучести), разделяет упругое и пластичное поведения материала при деформациях.

В процессе работы получены экспериментальные данные для испытаний на сдвиг, растяжение и сжатие материалов. Ниже представлены примеры диаграмм

для каждого вида опыта, связывающие силы с деформациями образцов (Рисунки 11– 13). На этих диаграммах выделены характерные участки, отвечающие области упругих деформаций, за которыми начинаются области пластических деформаций. Исходя из вышесказанного по этим диаграммам были определены пределы текучести.

Точка перехода определена как предел текучести, используемая далее, как предельная характеристика прочности образцов согласно теоретической модели.

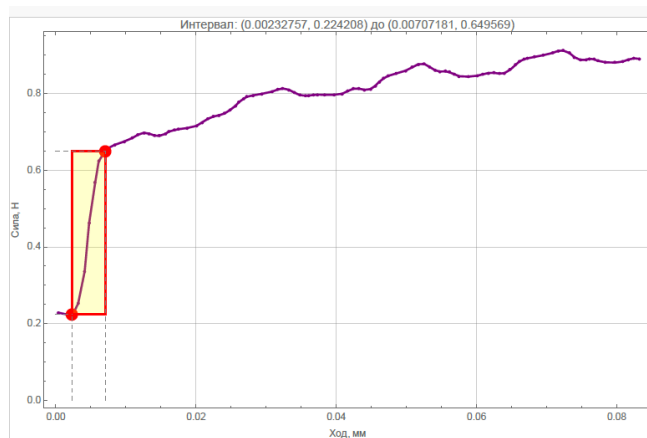


Рисунок 11 – Диаграмма сдвига образца 0

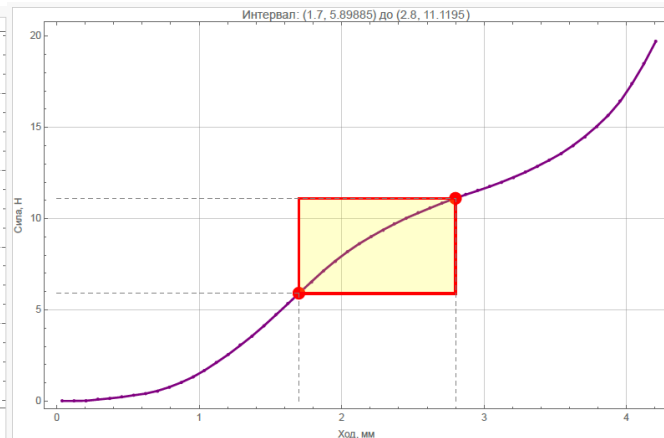


Рисунок 12 – Диаграмма сжатия образца 0

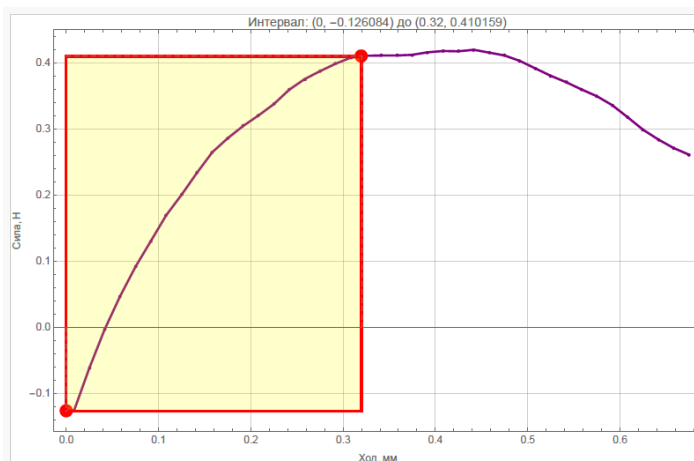


Рисунок 13 – Диаграмма растяжения образца 0

Согласно разработанной теоретической модели, кубический образец сохраняет свою первоначальную геометрическую форму и демонстрирует состояние статической стабильности до тех пор, пока уровень приложенных напряжений не станет превышать определенного предельного значения, в качестве которого выбран предел текучести материала  $\sigma_T$ .

В области напряжений меньше предельного значения, конструкция сохраняет целостность и устойчивость.

В Таблице 4 отображены значения сил, соответствующие предельным точкам, определенным на графиках выше. Во второй таблице приведено сравнение вычисленных предельных значений напряжений согласно теоретической модели и экспериментальных значений.

Таблица 4 – Значения сил, соответствующие предельным точкам

№ обр.	Сдвиг		Растяжение		Сжатие	
	Площадь сечения 0,0004 м <sup>2</sup>		Площадь сечения 0,00002 м <sup>2</sup>		Площадь сечения 0,0004 м <sup>2</sup>	
	Сила, Н	$\sigma_T$ , Па	Сила, Н	$\sigma_T$ , Па	Сила, Н	$\sigma_T$ , Па
0	0,6496	1624,00	0,1321	6605	20,9155	52288,75
1	0,6819	1704,75	0,1392	6960	25,1700	62925,00
2	0,7324	1831,00	0,1177	5885	27,6272	69068,00
3	0,6332	1583,00	0,0754	3770	14,4622	36155,50
4	0,5441	1360,25	0,0351	1755	8,3183	20795,75
5	0,5619	1404,75	0,0412	2510	11,1195	27798,75

Выбранная геометрия кубика (размер  $a$  и толщина стенок  $\delta$ ) и материал (рецептура) кубика и наполнителя определяют возникающие максимальные напряжения в кубике.

Сравнение расчетных значений максимальных напряжений, возникающих в сечениях кубика с экспериментальными значениями физических пределов текучести материала для каждой из рецептур, показывает существенный запас устойчивости для всех рецептур, для заданной геометрии кубика (Таблица 5).

Таблица 5 – Сравнение экспериментальных данных для предельных значений напряжений и расчетных (модельных) значений предельных напряжений

№ обр.	Сдвиг		Растяжение		Сжатие	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
	$\sigma_T$ Па	$\sigma_T$ Па	$\sigma_T$ Па	$\sigma_T$ Па	$\sigma_T$ Па	$\sigma_T$ Па
0	16,39671	1624,00±16,2	16,396714	6605,00±6,6	101,919413	52288,75±52,3
1	16,39671	1704,75±17,0	16,396714	6960,00±7,0	143,6344985	62925,00±62,9
2	16,39671	1831,00±18,3	16,396714	5885,00±5,9	131,8855377	69068,00±69,1
3	16,39671	1583,00±15,8	16,396714	3770,00±3,8	146,7652885	36155,50±36,2
4	16,39671	1360,25±13,6	16,396714	1755,00±1,8	136,8364949	20795,75±20,8
5	16,39671	1404,75±14,0	16,396714	2510,00±2,5	114,6917417	27798,75±27,8

То есть напряжение в материале, согласно полученным данным:  $\sigma \ll \sigma_T$

Из данных Таблицы 5 видно, что для используемых нами рецептур и для выбранной нами формы кубика возникающие деформации в кубике будут малыми и упругими и не приводят к пластическим деформациям и его разрушению.

Результаты, полученные для кубического образца под действием гравитационных сил и гидростатического давления наполнителя (меда), показывают общую методологию, которая может применяться в дальнейшем при анализе более сложных инженерных систем.

Предложенная модель позволяет выполнить расчеты для вычисления оптимальных геометрических параметров кубика для других предлагаемых рецептур или решить обратную задачу, определение минимальных свойств рецептур (предельных напряжений текучести) для заданных геометрических параметров кубика.

Интерфейс программы по взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств материала представлен на Рисунке 14.

### Определение параметров кубика

Плотность материала <input type="text" value="1200"/>	$\sigma_{сдв} = \rho_2 g a \frac{(1 - 2\gamma)^2}{2\gamma}$ $\sigma_{сжт} = \rho_1 g a \frac{\gamma + 4(\gamma - \gamma^2)(1 - 2\gamma)}{4(\gamma - \gamma^2)}$
Плотность наполнителя <input type="text" value="900"/>	
$g = 9.81$	

Рисунок 14 – Интерфейс программы по взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств материала

Прямая задача решается следующим образом: по заданной плотности материала и жидкости и их известным механическим свойствам (предельное напряжение) программа рассчитывает оптимальные отношения размера кубика и толщины стенки с учетом коэффициента запаса устойчивости для механических характеристик напряжения. При это, задавая размер кубика можно получать толщину стенки и наоборот.

Сторона кубика, мм <input type="text" value="10"/>	$\sigma_{сдв}$ <input type="text" value="15,46"/>
$\gamma$ <input type="text" value="0,33"/>	$\sigma_{сжт}$ <input type="text" value="83,95"/>
<b>Решение</b> $\sigma_{сдв} = 15.46$ $\sigma_{сжт} = 83.95$	<b>Решение</b> $a = 10.00$ мм – сторона кубика $\delta = 3.30$ мм – толщина стенки

а) б)

Рисунок 15 – Интерфейс программы по взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств материала (а) – прямая задача, б) – обратная задача)

Та же программа позволяет выполнять обратное действие (Рисунок 15, б)). Задавая геометрическое отношение размера кубика, толщины стенки и плотности материала и жидкости, возможно получить целевые значения механических свойств материала кубика с учетом коэффициента запаса устойчивости.

Программа находится в открытом доступе по ссылке:

<https://observablehq.com/d/740692036f5333e2>

Первым этапом приготовления ПЧ являлось получение сгустка (калье). Сырое молоко пастеризовали при температуре  $(78 \pm 2)$  °С с выдержкой от 15 до 20 с. Далее охлаждали до температуры заквашивания и вносили закваску, приготовленную на чистых культурах лактококков  $(30 \pm 2)$  °С. Доза закваски составила 3% от массы молока. После внесения в смесь добавляли хлористый кальций из расчёта 400 мг безводного хлористого кальция на 1000 г заквашиваемой

смеси. Хлористый кальций вносили в виде водного раствора с массовой долей хлористого кальция от 30 до 40 %. После внесения раствора хлористого кальция в смесь вносили сычужный фермент. Доза фермента активностью 100000 ME на 1000 г составила 1 мг. Продолжительность перемешивания смеси после заквашивания составила 15 мин. Продолжительность сквашивания смеси при указанных выше температурах составила 12 ч. После чего готовый сгусток разрезали проволочными ножами на кубики размером 2,0x2,0x2,0 см. Разрезанный сгусток оставляли в покое на 30 – 60 мин для отделения сыворотки. Далее его нагревали до температуры  $(40\pm 2)$  °С с выдержкой при этой температуре от 30 до 40 мин. В это же время постепенно отделяли сыворотку. Сгусток разливали в лавсановые мешки и прессовали от 1 до 4 часов. После чего готовый творог перемешивали и направляли на составление смеси или в холодильную камеру. Далее приступали к приготовлению 3D-«чернил».

Сначала в емкость загрузили калье и воду, перемешивали. Далее смешивали все сухие компоненты согласно рецептуре и вносили в смесь при постоянном перемешивании, постепенно нагревая до 40 °С. После достижения нужной температуры приступали к диспергированию при 1200 об/мин в течение 5-ти минут. Далее смесь пастеризовали при температуре  $(80\pm 2)$  °С в течение 5-ти минут. После чего горячая смесь поступала в камеру экструдера и поэтапно начинался процесс послойной печати. Вначале печаталась нижняя часть изделия с квадратным отверстием внутри. Далее согласно заданным параметрам печати камера перемещалась и через отверстие второго шприца заливался жидкий мед. Затем камера возвращалась на место и изделие также послойно запечатывалось крышкой. Готовое изделие сразу после напечатания полностью готово к употреблению и может быть направлено на реализацию, либо подлежит хранению в закрытых емкостях при температуре  $(4\pm 2)$  °С не более пяти суток.

Технологическая схема представлена на Рисунке 16. Завершающим этапом работы стала разработка ТУ на плавленый сыр, с начинкой, предназначенный для 3D-печати. Рецепт продукта приведен в Таблице 6.

Таблица 6 – Рецепт 3D продукта

Наименование компонента	Количество, кг
Калье	486,5
Концентрат сывороточного белка	136,0
Молоко сухое обезжиренное	91,0
Соль поваренная	27,0
Соль-плавитель «Фосфомикс»	13,5
Вода питьевая	246,0
<b>ИТОГО</b>	<b>1000</b>

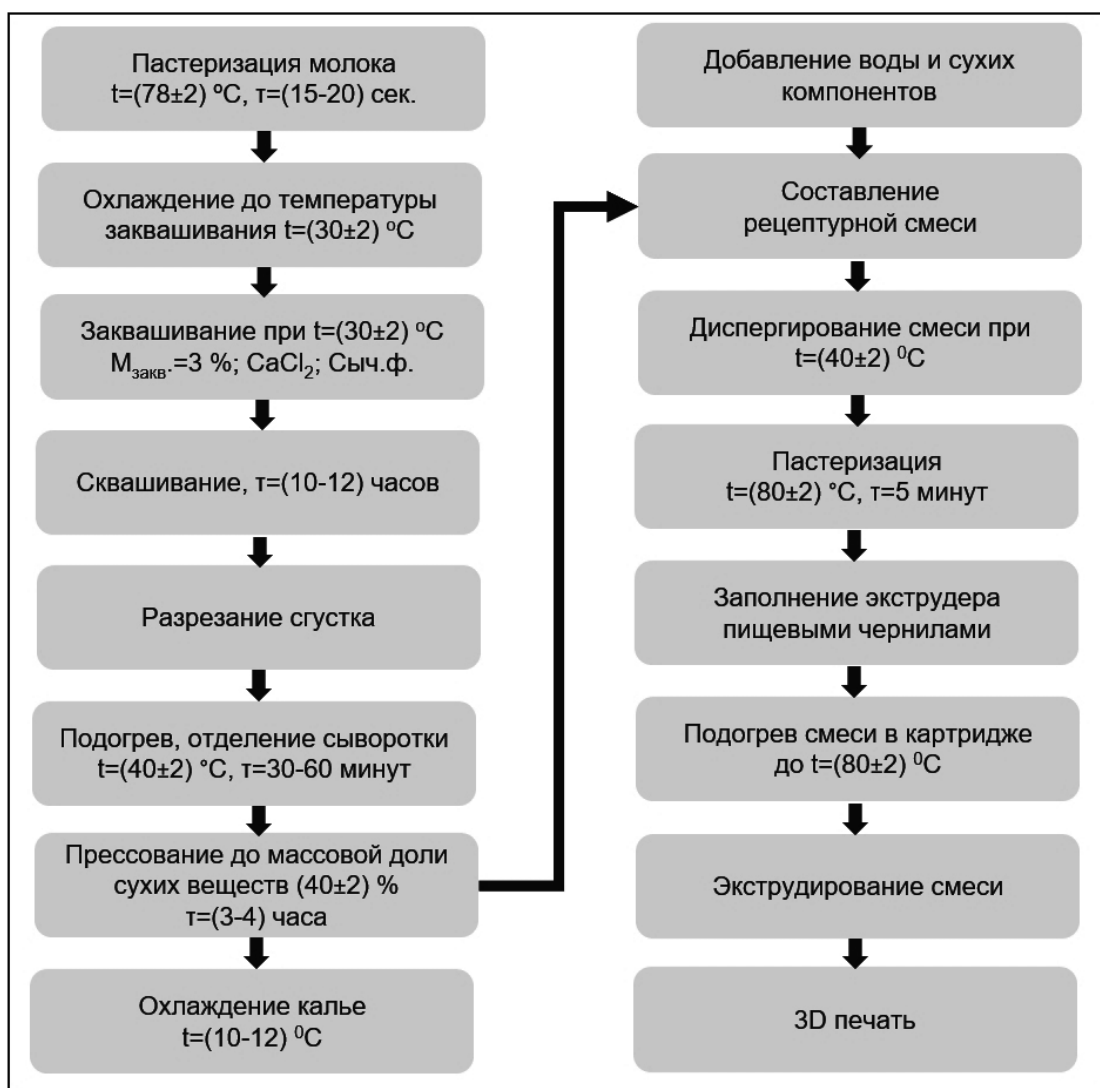


Рисунок 16 – Технологическая схема изготовления 3D продукта

В рамках исследования проведен предварительный экономический расчет разработанной технологии. Рассчитаны капитальные затраты на приобретение специализированного оборудования и срок окупаемости. На основе данных обоснована эффективность частичной замены персонала на предприятиях общественного питания пищевым 3D-принтером FELIX Food Switch Head. Внедрение новой технологии представляет собой инвестицию со сроком окупаемости менее 8 месяцев. Высокая рентабельность в сочетании с коротким сроком окупаемости создают хорошие предпосылки для перехода от единичных экспериментальных внедрений к системному использованию пищевых 3D-принтеров с последующим тиражированием успешных проектов.

### Основные результаты и выводы

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований, коррелирующих с заявленной концепцией глобальной трансформации промышленных технологий продуктов питания в производство «пищевых чернил»

для 3D-печати в рамках инициативы перехода к персонализации питания, создана аддитивная технология 3D-продукта на молочной основе для сегмента HoReCa.

1. Проведен анализ мировых тенденций развития пищевых аддитивных технологий и перспективных направлений интеграции 3D-технологии в сегменте HoReCa с учетом российских потребительских паттернов: показано, что технология 3D-печати позволяет создавать молочные продукты с индивидуальным контролем содержания питательных веществ, удовлетворяя растущий потребительский и рыночный спрос на персонафицированное питание.

2. Разработана методология расчета модели пищевого 3D-продукта на молочной основе, учитывающая его геометрические и конструктивные особенности; произведена корректировка G-кода и внесены соответствующие команды в программу-слайсер для разрабатываемой аддитивной технологии.

3. Исследованы зависимости свойств 3D-пищевых систем от их состава. Установлены закономерности изменения коэффициента спонтанной деформации ( $K_{сд}$ ) в системе ПЧ - продукт при различных соотношениях массовых долей белка и жира. Подтверждено наличие оптимальных диапазонов массовой доли белка в ПЧ, в пределах которого  $K_{сд}$  принимает минимальные значения. Для варианта ПЧ с сухим обезжиренным молоком (СОМ) была получена одна критическая точка, соответствующая допустимому минимальному значению массовой доли белка, равному 22.56 %. При этом установлено, что рациональными являются рецептуры с массовой долей белка, превышающей это значение. Для варианта ПЧ с сухим цельным молоком (СЦМ) -рациональное множество приемлемых значений массовой доли белка находилось в интервале между двумя критическими точками: от 21,11 до 24,05 %.

4. Разработаны теоретические модели, демонстрирующие предельные значения напряжений, при которых происходит переход модельных систем печатных изделий в пластичное состояние. На основе данных гипотез были проведены расчеты, в результате которых выявлены максимальные модельные значения напряжений: предел прочности при растяжении и сжатии, предел упругости при сдвиге.

5. С применением разработанной теоретической модели симулировано формирование механических характеристик образцов в зависимости от их состава. Проведено сравнение расчетных значений максимальных напряжений, возникающих в сечениях продукта выбранной кубической формы, с полученными экспериментальными значениями физических пределов текучести материала для каждой из рецептур. Выявлен существенный запас устойчивости для всех рецептур в заданной геометрии 3D-продукта - куб.

6. Разработана модель взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств печатного материала, позволяющая как рассчитывать оптимальные отношения размера кубика и толщины стенки с учетом коэффициента запаса устойчивости для механических характеристик напряжения, так и выполнять обратное действие, логически вылившаяся в разработку технологии 3D-продукта.

7. Создана технология 3D-продукта с начинкой, исследованы его потребительские характеристики и определены требования к безопасности изделия; разработана документация в области стандартизации на плавленный сыр с начинкой, производимый на пищевом 3D-принтере – Сыр плавленный «ПринтЧиз» (ТУ 10.51.40-111-00419785-2025). Расчет экономической эффективности от внедрения разработанной технологии показал ее конкурентоспособность и короткий срок окупаемости. Осуществлено успешное промышленное внедрение технологии в сегменте HoReCa.

**По материалам диссертации опубликованы следующие работы:  
Монографии**

1. Семипятный, В.К. Киберфизическая система пищевой промышленности Х.0. Цифровые и аддитивные технологии: монография / В.К. Семипятный, Д.С. Архипов– М.: ВНИМИ, 2025. – 180 с.

**Статьи в журналах, рекомендованных ВАК**

2. Агаркова, Е.Ю. Исследование зависимостей свойств 3D пищевых систем от их состава / Е.Ю. Агаркова, В.В. Кондратенко, Д.С. Архипов, М.А. Малюшина, А.Г. Галстян // Пищевая промышленность. – 2025. - №8. – С. – 101-106. DOI: 10.52653/PPI.2025.8.8.025

3. Архипов, Д.С. Разработка теоретической модели устойчивости 3D пищевых систем / Д.С. Архипов, С.В. Мотылев, Е.Ю. Агаркова, В.К. Семипятный, А.Г. Галстян // Пищевая промышленность. – 2025. - №10. – С. 28-32 DOI: 10.52653/PPI.2025.10.10.005

4. Кондратенко, В.В. Разработка модели формирования дисперсных биосистем на молочной основе / В.В. Кондратенко, О.В. Соколова, Е.Ю. Агаркова, О.Б. Федотова, Д.С. Архипов // Пищевая промышленность. – 2025. - №10. – С. 6-10 DOI: 10.52653/PPI.2025.10.10.001

5. Архипов, Д.С. Исследование прочностных характеристик пищевых 3D-систем, приготовленных по технологии плавленого сыра / Д.С. Архипов, С.В. Мотылев, Е.Ю. Агаркова, В.К. Семипятный, Д.М. Мясенко // Сыроделие и маслоделие. – 2025. – №4 – С. 42-47. DOI: 10.21603/2073-4018-2025-4-38

**Публикации в журналах, индексируемых в РИНЦ, и материалах конференций**

6. Малюшина, М.А. Перспективы 3D печати в пищевой промышленности / Д.С. Архипов, М.А. Малюшина, Е.Ю. Агаркова // Материалы VII Международного Симпозиума «INNOVATIONS IN LIFE SCIENCES» 21 – 23 мая 2025 г на базе ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (г. Белгород) – С. 457-458

7. Архипов, Д.С. Некоторые аспекты создания 3D пищевых систем на молочной основе / Д.С. Архипов, Е.Ю. Агаркова, М.А. Малюшина // Материалы Международной научно-практической конференции «Устойчивое

технологическое развитие аграрно-пищевых систем –гарантия продовольственной безопасности», 19-20 июня 2025 г., ГНУ НИИММП, г. Волгоград – С. 237-240.

### **Результаты интеллектуальной деятельности**

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667797 Российская Федерация. Программа для определения размеров таблетированных форм молочных продуктов в зависимости от базовой фигуры объекта : заявл. 09.07.2024 : опубл. 30.07.2024 / Д. С. Архипов, Н. С. Пряничникова, В. К. Семипятный, А. Г. Галстян ; заявитель ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ».

### **ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

Б – белок

ИСБ – изолят сывороточного белка

КМЦ – карбоксиметилцеллюлоза

$K_{сд}$  – коэффициент спонтанной деформации

МСБ – микронизированный сывороточный белок

МТ – мальтит

НПСБ – наноплазменные волокна сывороточного белка

ПО – программное обеспечение

ПЧ – пищевые чернила

СОМ – сухое обезжиренное молоко

СЦМ – сухое цельное молоко

TAND - тангенс угла потерь

ТГ – триглицериды

УВ – углеводы

Ж – жир