

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО–ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»
(ФГАНУ «ВНИМИ»)

На правах рукописи

АРХИПОВ ДАНИЛА СЕРГЕЕВИЧ

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

Специальность 4.3.3 – Пищевые системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
Агаркова Евгения Юрьевна

Москва 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ	12
1.1 Перспективы развития 3D-печати в пищевой индустрии: отечественные и международные подходы	12
1.2 Молочные продукты и их компоненты как сырьё для 3D-печати.....	14
1.3 Свойства пищевых чернил для печати.....	15
1.4 Факторы, влияющие на 3D-печать пищевых систем	19
1.5 Основные технологии 3D-печати, их применение и перспективы в пищевой промышленности.....	19
1.6 Перспективные молочные ингредиенты для 3D-печати: роль в стабилизации структуры пищевых чернил	23
Заключение к литературному обзору.....	30
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	33
2.1 Структура, организация и схема исследований	33
2.2 Объекты исследований	34
2.3 Методы исследований	35
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	43
3.1 Выявление потребительских предпочтений в области пищевых аддитивных технологий	43
3.2 Оценка потенциала барьеров и стратегических перспектив для внедрения аддитивных технологий в пищевой индустрии	51
3.3 Методология проектирования 3D модели и ее трансформация в набор команд для управления принтером	57
3.4 Исследование зависимостей свойств 3D пищевых систем от их состава.....	62
3.5 Органолептическая оценка образцов 3D пищевых систем.....	69
3.6 Моделирование деформационной устойчивости 3D печатных форм	73
3.7 Исследование взаимосвязи механических характеристик от состава образцов 3D печатных систем	84

3.8 Разработка модели взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств материала.....	96
3.9 Технологический процесс получения пищевого 3D продукта.....	98
3.10 Расчет экономической эффективности разработанной технологии	102
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	105
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	108
Приложение А	119
Приложение Б	120
Приложение В	121
Приложение Г	122

ВВЕДЕНИЕ

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. [1][2].

Глобальным аспектом в пищевой промышленности является сохранение и поддержание качества и безопасности продукции [3][4][5], а также всех промежуточных ингредиентов при ее производстве [6] [7]. Продовольственная организация (ФАО) Организации Объединенных Наций (ООН) сообщает [8] [9] о более, чем 30% потерь продукции на всех этапах производства и логистики в пищевой промышленности.

Наиболее вероятностным решением является переход к персонализированному питанию [10]. Соответственно актуализируется глобальная задача замены парадигмы питания от производства пищи в промышленных условиях к применению 3D-принтеров [11]. Априори такое развитие технологий предполагает опосредованную замену традиционных ассортиментных линеек и переход к производству компонентов для печати

продуктов питания [12]. 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 [2].

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 [13]. 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 [12].

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. 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 работы.

1. 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.

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

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

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

5. 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».

6. 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 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 технологии молочных продуктов (до января 2026 года «Лаборатория биотехнологии молока и молочных продуктов»).

Положения, выносимые на защиту.

1. Методология предельного равновесия в проектировании геометрических и конструктивных характеристик 3D-продуктов на молочной основе.
2. Адаптированный алгоритм 3D-печати продукта с биоинформационным программным обеспечением.
3. Зависимости формирования структурно-механических и органолептических свойств 3D-печатного продукта от его состава.
4. 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Перспективы развития 3D-печати в пищевой индустрии: отечественные и международные подходы

Трёхмерная (3D) печать - это аддитивная технология, позволяющая производить материалы различной формы с помощью компьютерного программирования и проектирования моделей [14][15,16]. Благодаря возможности печатать сложные и точные геометрические структуры по заранее заданным моделям, 3D-принтеры широко используются в аэрокосмической отрасли, медицине, машиностроении и пищевой промышленности. Первый в мире пищевой 3D-принтер с одной головкой был представлен на 18-м симпозиуме Solid State Freeform Manufacturing группой исследователей Корнельского университета, которые доказали возможность применения 3D-печати для производства продуктов питания.

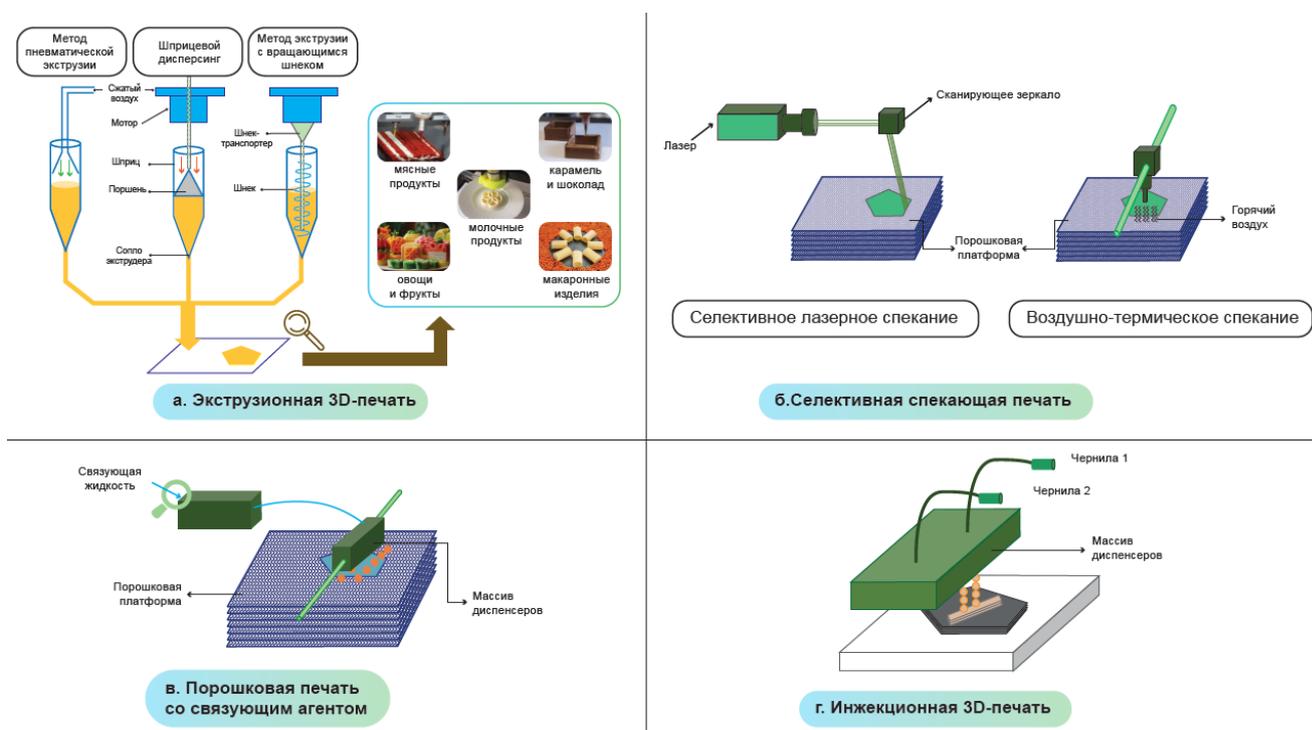


Рисунок 1.1 – 3D-печать в производстве и переработке продуктов питания (адаптировано из [17], [18],[19].

Впоследствии 3D-печать зарекомендовала себя лучше, чем традиционные технологии в части визуального восприятия и производства продуктов питания в современной пищевой промышленности (Рисунок 1.1). Одним из главных преимуществ 3D-печати в пищевой промышленности является гарантированное получение точных геометрических форм, упрощение равномерности распределения ингредиентов и, как следствие, снижение вероятности пищевых отходов. Одними из первых пищевых ингредиентов для 3D-печати были исследованы шоколад и эмульсии на его основе. De Farias с коллегами показали, что эмульсии Пикеринга с высоким объемом внутренней фазы в целом подходят для использования в качестве чернил в 3D-печати пищевых продуктов [20][21][22].

Исследование межмолекулярного взаимодействия компонентов между собой является важной основой для успешного процесса 3D-печати, так как от этого зависит реологическое поведение чернил [23]. Исследование формирования структуры чернил может обеспечить отличную стабильность формы напечатанных продуктов, что способствует тому, что напечатанный продукт будет максимально близок к заданной модели. В целом, чернила для печати должны обладать соответствующим поведением и вязкоупругими свойствами, чтобы способствовать плавной экструзии через сопло, что приведет к стабильному формированию и повышению точности при печати. В частности, при производстве пищевых продуктов включение некоторых макронутриентов, таких как белки, полисахариды или иные гидроколлоиды, может изменить реологию пищевых чернил [24,25]. Более того, лактоза, молочный жир и молочный белок часто используются в качестве компонентов для приготовления пищевых чернил в молочной 3D-печати благодаря присущей им способности к гелеобразованию.

В особенности, добавление сывороточного белка, обладающего повышенной биодоступностью, дает возможность модифицировать характеристики чернил, улучшая их адаптивность [26]. Поэтому молочные ингредиенты в целом обладают способностью к структурообразованию между собой и другими компонентами и, соответственно, имеют огромный потенциал для использования в качестве базового сырья для пищевой 3D-печати [27].

1.2 Молочные продукты и их компоненты как сырьё для 3D-печати

Молочные продукты включают в себя широкий спектр макроэлементов, в том числе полисахариды, белки и липиды, и, с точки зрения применимости в аддитивных технологиях среди них наиболее часто выделяют молоко, сыр, замороженные молочные продукты, йогурт, сливки, масло. Однако применение 3D-печати пищевых продуктов на молочной основе в настоящее время ограничено наличием подходящих связующих компонентов, поскольку в непосредственном виде молочные продукты не отвечают необходимым требованиям, что препятствует их широкому использованию в 3D-печати пищевых продуктов [28] [29].

Однако некоторые исследования показали, что включение молочных продуктов в состав чернил для 3D-печати может улучшить их свойства и значительно повысить стабильность печати [30]. Например, Ross и др. исследовали пригодность плавленого сыра к печати, изменяя содержание казеина, и определили оптимальный диапазон вязкости на основе анализа реологических свойств [31]. Аналогично, другие ученые продемонстрировали, что изменение содержания жира в сухом молоке может изменить реологические свойства печатных чернил, тем самым повышая стабильность формы и структуры во время печати [32].

Эти результаты подчеркивают, что различные ингредиенты в составе молочных продуктов оказывают значительное влияние на производительность 3D-печати, а не конкретный тип используемого молочного продукта. Однако большинство молочных продуктов не образуют идеальных условий для печати, что ограничивает их применение в 3D-печати продуктов питания.

Некоторые исследования показали, что определенные компоненты молочных продуктов, такие как сывороточный белок и полисахариды, а также экстракты молочного жира, могут улучшать пригодность к печати и реологические свойства чернил. Например, Du и др. [26] наблюдали улучшение реологических свойств пасты из конжака за счет добавления сухого сывороточного белка, что приводило

к повышению вязкости и облегчению экструзии, повышению стабильности. Кроме того, лактоза эффективно улучшает свойства пищевых печатных материалов. Йогурт, смешанный с соответствующим количеством олигосахаридов (ОС), обладает превосходной текстурой, сенсорными свойствами, оптимальной текучестью, благоприятной тиксотропией и экструзионными свойствами, что делает его пригодным для получения изделий точной геометрии и стабильных в хранении. К сожалению, нельзя с точностью констатировать факт, можно ли напрямую использовать различные молочные чернила для 3D-печати и могут ли они действительно улучшить возможности 3D-печати молочных продуктов [33].

В одной из работ выдвигается инновационное предложение ключевых требований к качеству, необходимых для успешной 3D-печати продуктов из молочного сырья, таких как экструдированность, стабильность печати, способность сохранять форму и т.д. В результате анализа было установлено, что некоторые молочные продукты (например, сыр, масло) обладают лучшей адаптивностью к печати и качеством печати [31].

Также для решения проблемы пригодности молочных продуктов для 3D-печати могут быть предложены эффективные меры по улучшению их свойств [34], которые найдут применение в реальном процессе печати. Таким образом, если молочные продукты и их производные компоненты предполагается использовать для аддитивной печати, это значительно расширяет область применения молочных продуктов и способствует их высокодоходной утилизации.

1.3 Свойства пищевых чернил для печати

Вязкость чернил

Вязкость – это свойство текучих тел оказывать сопротивление течению одних частей таких тел относительно других. Часто текучее тело называют жидкостью.

Разделяют два основных вида течений жидкости. Когда жидкость интенсивно перемешивается и в объеме образуются завихрения – такое течение называют турбулентным. Кроме того, возможно слоистое течение, при котором жидкость течет как бы слоями, не перемешивающимися друг с другом – ламинарное течение.

Для качественной 3D печати желательно избегать турбулентности, ввиду хаотизации направлений скоростей в жидкости. В гидродинамике определен критерий, который называют числом Рейнольдса, критическое значение которого разделяют эти виды течения жидкости. Этот критерий пропорционален скорости течения, плотности жидкости, характерному размеру течения и обратно пропорционален вязкости [35].

Течение чернил в процессе 3D печати через сопло приблизительно можно рассматривать как ламинарное течение вязкой жидкости по цилиндрической трубе. Для такого течения известна формула Гагена-Пуазейля связывающей расход жидкости (объем жидкости протекающей через поперечное сечение трубы в секунду) от радиуса и длины трубы, разности давлений на концах трубы и вязкости жидкости.

Согласно этой формуле, расход жидкости обратно пропорционален вязкости и длине трубы. Ограничения, накладываемые критерием Рейнольдса и желательные значения расхода жидкости, при заданных характеристиках сопла дают нам диапазон желательных значений для вязкости текучего состояния пищевых чернил.

На вязкость пищевых чернил влияют такие факторы, как температура, структура (состав) и добавление определенных веществ. Было обнаружено, что вязкость пищевых чернил значительно увеличивается по мере его охлаждения вблизи сопла [36]. Определение подходящей вязкости для 3D-печати имеет решающее значение. Вязкость существенно влияет на экструзионные свойства пищевых чернил. Пищевые чернила с высокой вязкостью могут стать причиной засорения сопла из-за сложности их экструзии, что приведет к снижению производительности печати [37].

Одним из показательных примеров влияния вязкости на процесс пищевой 3D-печати может служить анализ смесей из масла сливочного, пахты и быстрорастворимой картофельной муки. Было зафиксировано, что увеличение соотношения картофельной муки приводит к увеличению вязкости, её соотношение в смеси 1:4 и 1:4,5 было слишком вязким для успешной экструзии, в то время как в соотношении 1:5 смесь имела надлежащую кажущуюся вязкость, что позволило без проблем провести процесс экструзии и при этом готовое изделие отлично сохраняло форму [38]. Кроме того, большинство чернил, пригодных для 3D-печати, обладают переменной вязкостью и демонстрируют различные вязкостные свойства до и после экструзии [39]. Ji и др. [18] провели исследование 3D-печатных продуктов на молочной основе с использованием различных типов крахмала и определили, что картофельный крахмал с высокой вязкостью приводит к низкой точности и качеству печати. Поэтому, исходя из вышеприведенных данных исследований, можно сделать вывод о том, что регулировка диапазона вязкости чернил является эффективной мерой для повышения точности печати при 3D-печати молочных продуктов [40].

Разжижение при сдвиге относится к явлению, когда вязкость чернил уменьшается при увеличении деформации сдвига [41]. Все пищевые чернила, используемые для 3D-печати, демонстрируют псевдопластичное сдвиговое разжижение, что облегчает точное управление потоком печати и обеспечивает стабильность и непрерывность процесса печати [42] [43]. Slejko и др. исследовали чернила, состоящие из различных концентраций ацетата целлюлозы (АЦ) и ацетона, и обнаружили, что при приложении сдвига движущиеся молекулы АЦ разворачиваются, что снижает сопротивление течению и вязкость, и демонстрирует поведение сдвигового разрежения [44] [45].

Предел текучести чернил

Некоторые модули, такие как модуль сохранения (G') и модуль потерь (G''), играют важную роль в 3D-печати. G' определяет упругое поведение вещества в твердом состоянии. На G' влияет скорость сдвига, а на G'' - жидкотекучесть и вязкость. Ji с коллегами было доказано, что добавление казеина в крахмальные

чернила эффективно увеличивает значения G' и G'' [35]. Предел текучести определяется путем измерения пересечения G' и G'' в тесте сканирования напряжения [36]. Он представляет собой минимальное значение напряжения, при котором чернила начинают течь или деформироваться, и может также рассматриваться как критическое значение для разрушения структуры. Sasaki исследовал реологию картофельной пасты и обнаружил, что предел текучести тесно связан с пригодностью к печати, и что пасты с более низким пределом текучести обладают высокой точностью печати, а также отличной формуемостью [36]. Тангенс угла потерь ($\tan\delta$) представляет собой отношение G' к G'' . Обычно, когда $\tan\delta < 1$, пищевая система демонстрирует высокие вязкостные и прочностные свойства, что указывает на отличную способность к удержанию структуры и стабильность после экструзии. В случае, когда $\tan\delta > 1$, материал постепенно переходит из твердого состояния в жидкое, демонстрируя повышенную текучесть, что благоприятно для успешной экструзии и прохождении смеси через сопло [37]. Wang и др. измерили $\tan\delta$ пищевых чернил на молочной основе и гелей на основе альгината натрия по отдельности и обнаружили, что чернила с $\tan\delta < 1$, более близкие к гелеобразному поведению, демонстрируют большую вязкоупругость и улучшают точность при 3D-печати, устойчивость к упругим деформациям и отражают его механическую прочность [38][39]. С другой стороны, G'' описывает жидкое и вязкое поведение образца [40][40][40]. В то же время если G'' больше G' , это указывает на то, что печатная паста представляет собой гелеподобную структуру, и система находится в упруго-доминирующем состоянии, что является желаемым поведением материала, предназначенного для печати [41]. Данный факт подтвердил Zhu S. C. с соавторами, они исследовали образцы порошка шпината с различными размерами частиц и ксантановой камеди, смешанных в соотношении 20 % (масс.) и 10 % (масс.), и обнаружили, что G' больше G'' для всех образцов, что говорит о том, что они проявляют гелеобразное поведение и способствуют сохранению формы во время 3D-печати [42].

1.4 Факторы, влияющие на 3D-печать пищевых систем

Некоторые определенные факторы, такие как содержание воды, pH и температура, могут оказывать влияние на свойства чернил для 3D-печати [43]. Содержание влаги играет важную роль в изменении эластичности, полимеризации и твердости продукта [44][45][46]. Кроме того, уровень pH может изменять свойства 3D-печати и прочность напечатанного продукта. Кислоты и щелочи могут вызывать изменения в структуре и свойствах белков, тем самым оказывая влияния на процесс печати. Ross и др. предположили, что рецептура на основе плавленого сыра с pH 5,8 что печатный продукт получается мягким и трудно поддается точной печати. Кроме того, они продемонстрировали, что сырные продукты, напечатанные при высоких температурах, обладают повышенной твердостью и эластичностью [31]. Таким образом, на реологические свойства чернил в процессе приготовления, которые являются важнейшими для качества печати, большое влияние оказывает активную кислотность среды.

1.5 Основные технологии 3D-печати, их применение и перспективы в пищевой промышленности

В настоящее время существует несколько типов технологий 3D-печати пищевых продуктов: экструзионная печать, струйная печать, струйное нанесение связующего, печать методом селективного спекания и оптическая иммобилизация [47][16]. Среди этих технологий в пищевой промышленности наиболее широко применяются экструзионная печать, печать связующим веществом, печать методом селективного спекания и струйная печать [48].

Экструзионная печать

Экструзионная печать в настоящее время считается наиболее распространенным методом 3D-печати в пищевой промышленности. Основной принцип работы заключается в выдавливании чернил из нагретого или ненагретого сопла и нанесении его слой за слоем для создания 3D-структуры. В этой технологии обычно используется сопло с поршнем и роботизированная рука, обеспечивающая вертикальное перемещение и выдавливание материала.

Экструзионная печать может быть разделена на три типа по механизму выдавливания: шнековая, шприцевая и пневматическая экструзия. Шнековая экструзия предполагает перемещение и вращение шнека для транспортировки пищевых материалов из картриджа в сопло, что делает ее подходящей для печати чернилами с низкой текучестью [49]. Шприцевая экструзия использует шаговые двигатели для управления плунжером и выталкивания пищевого материала из сопла, что делает ее наиболее подходящей для печати твердыми или полутвердыми чернилами. При пневматической экструзии используется пневматический насос для создания давления и проталкивания картриджа с материалом через сопло, что лучше подходит для печати жидкими материалами с высокой текучестью [50].

Yang и др. сделали важные выводы относительно композитных паст на основе молочного белка. Они определили, что регулировка окружности, рисунка заполнения и уровня заполнения в процессе печати может изменить текстуру, внутреннюю структуру и геометрическую точность продукта. Примечательно, что уровень наполнения оказывал значительное влияние на твердость и желирование продукта [51]. Аналогичным образом, экструзионная печать может быть разделена на экструзию горячего расплава, экструзию при комнатной температуре и экструзию гидрогелевого формования в зависимости от температуры использования. Экструзионная печать также предъявляет определенные требования к пищевым чернилам, и исследования показали, что экструдруемый материал должен обладать быстрой застываемостью [52].

Струйное нанесение связующего

При струйной печати используются съедобные жидкие гели для скрепления и придания формы пищевым чернилам в определенных местах, что позволяет

укладывать несколько слоев для формирования заранее заданной модели. В основе технологии лежит вращающийся в обратном направлении барабан и гель (клей). Барабан распределяет порошок, а затем печатающая головка распыляет клей по определенной траектории, формируя на слое желаемый двумерный рисунок. Материалом для печати в этом методе является порошок, а свойства порошка (например, форма, способность к плавлению и т. д.) влияют на конечное качество продукта [53].

В настоящее время технология струйного нанесения связующего широко применяется в непищевых областях, и лишь несколько исследований посвящены пищевым материалам. Например, Holland и др. [54] использовали целлюлозу, глюкоманнан и ксантановую камедь для струйной 3D-печати на связующем материале. Струйное нанесение связующего обладает рядом потенциальных преимуществ по сравнению с другими методами печати. Она позволяет печатать без нагрева, используя адгезию для скрепления частиц порошка. Кроме того, процесс производства недорог и позволяет свести к минимуму отходы сырья. Однако существуют некоторые ограничения для применения этой технологии. Например, эксплуатационные расходы на оборудование являются дорогостоящими, а получаемые изделия могут иметь грубую текстуру и низкое качество.

Выборочное спекание печати

Выборочное спекание можно разделить на два типа: выборочное лазерное спекание горячим воздухом и без, в зависимости от технологии, используемой для спекания. При селективном лазерном спекании лазеры используются для селективного сплавления частиц порошка в ограниченном пространстве. Процесс идет слой за слоем, и в итоге получается 3D-объект [55]. В селективном спекании горячим воздухом в качестве источника тепла используется горячий воздух для сплавления определенных участков порошка и создания твердых слоев [56]. Печатная система технологии селективного спекания состоит из барабана, платформы для спекания, источника подачи спекаемого материала и платформы для подачи порошка.

В настоящее время технология 3D-печати с селективным спеканием применяется в кондитерской и фармацевтической отраслях, о чем сообщается некоторыми исследователями [57]. Эта технология обеспечивает быстрое производство и позволяет печатать сложные изделия со свободой дизайна за короткое время [58]. Однако селективное спекание имеет ряд недостатков. Оно подходит только для материалов с относительно низкой температурой плавления. Кроме того, конструкция оборудования может быть более сложной, и есть опасения, что лазеры и горячий воздух могут изменить свойства пищевых частиц, что может привести к проблемам с безопасностью пищевых продуктов.

Струйная печать

Струйная печать на пищевых продуктах подразумевает точное дозирование небольших капель жидкости из печатающей головки на пищевые продукты под действием силы тяжести [47]. Такие капли находят применение для украшения печенья и пирожных графикой, в качестве начинки для соуса для пиццы и для нанесения джемовой начинки на сэндвич-пирожные [59]. Технология может работать непрерывно на высоких скоростях на фабриках, где быстро производятся продукты питания, при этом отдельные капли могут быть запрограммированы на точное падение в определенное время и в определенном месте [52].

Струйная печать идеально подходит для материалов с низкой вязкостью, таких как некоторые виды джемов, однако ей не хватает механической прочности, необходимой для создания сложных 3D-структур [60] [61]. Поэтому при струйной печати получают преимущественно двумерные, полуцифровые изображения [62]. Реология и вязкость чернил [63], температура [61] и т. д. играют решающую роль в определении точности печати. Преимущество струйной печати на пищевых продуктах заключается в широком выборе чернил, что позволяет получать высококачественные отпечатки. Тем не менее, она имеет присущие ей ограничения: в первую очередь она подходит для базового декорирования продуктов питания и не способна создавать сложные пищевые изделия.

Молочные продукты для 3D-печати

Основными молочными продуктами, потенциально используемыми для 3D-печати являются молоко, сыр, замороженные молочные продукты, йогурт, сливки, масло и другие [64] [65]. Молочные системы, такие как молоко, йогурт или мягкий сыр, имеют большую склонность к образованию гелей из-за присутствия казеина и сывороточных белков [66]. Как микронизированные сывороточные, так и казеиновые белки являются молочными ингредиентами с высоким содержанием белка. Было замечено, что сыворотка денатурируется под воздействием тепла и подвергается реакциям агрегации и различным взаимодействиям с казеином, что способствует образованию гелей по сравнению с другими белками. Был проведен эксперимент по добавлению различных концентраций сухого молока в деионизированную воду для производства чернил на основе молока. В результате установили, что пищевые чернила на основе сухого молока, содержащие 70 % (масс.) сухого молока, наиболее подходят для 3D-печати.

Некоторые исследователи показывают, что 3D-печать молочных продуктов по-прежнему сопряжена с рядом трудностей, особенно в отношении видов сырья, которые трудно поддаются гелеобразованию. Поэтому необходимо проводить дальнейшие исследования, направленные на изучение свойств этих ингредиентов с точки зрения пригодности к 3D-печати [67].

1.6 Перспективные молочные ингредиенты для 3D-печати: роль в стабилизации структуры пищевых чернил

Молочные продукты состоят из различных компонентов, таких как молочные белки, молочный жир и лактоза, которые могут быть напечатаны 3D-печатью по отдельности. Например, казеин представляет собой агрегат фосфата кальция и отдельных казеинов, которые образуют мицеллы. Они обладают динамической структурой, которая позволяет обмениваться ионами с окружающей водной фазой, обеспечивая тем самым стабилизацию печатных чернил. Кроме того, казеин может

коагулировать в присутствии кальция или под воздействием кислоты, что приводит к гелеобразованию, например, это происходит при производстве йогурта и сыра [68] [69].

Сывороточный белок, характеризующийся глобулярной формой, может образовывать два типа гелей: полупрозрачный богатый водой тонкоцепочечный гель и непрозрачный гранулированный гель, легко высвобождающий воду. При охлаждении или нагревании сывороточные белки с высокой массовой долей белка обладают способностью к гелеобразованию [65]. Пористый гель сывороточных белков имеет шероховатую поверхность, высокую адсорбцию и когезию, а также соответствующую текучесть, что делает его идеальным для использования в 3D-печати [70]. Молочный жир в основном состоит из триглицеридов (ТГ), и различные уровни ТГ могут влиять на температуру плавления жира [71]. В процессе гелеобразования оболочки жировых шариков можно считать псевдобелками, что способствует образованию более твердого геля со значительным потенциалом для 3D-печати [72][73]. Лактоза - сахар, содержащийся в молоке, образуется за счет гликозидных связей, соединяющих галактозу и глюкозу [74]. Благодаря меньшей растворимости по сравнению с другими сахарами, гели, обогащенные лактозой, лучше подходят для печати по технологии послойного наплавления. Sager и др. [75], изучая пригодность гелей на основе микронизированного сывороточного белка (МСБ) в качестве чернил для 3D-печати, обнаружили, что МСБ дает более вязкий гель и хорошо сохраняет форму изделия при печати. В работе Fan и коллег [76], посвященной композитным гелям лактозы/изолята сывороточного белка (ИСБ), сообщается, что лактоза приводит к совместной солюбилизации, препятствуя агрегации ИСБ во время печати, что улучшает характеристики 3D-печатных изделий. Однако в реальном производстве печать молочных продуктов с использованием отдельных компонентов может привести к неполноценным 3D-печатным пищевым системам. Поэтому для облегчения 3D-печати молочных композитных пищевых систем может потребоваться модификация молочных продуктов или молочных компонентов.

В настоящее время для улучшения пригодности молочных продуктов для 3D-печати используются различные физические, химические и биологические методы модификации. Исследования, посвященные обработке чернил на основе казеина и рисового крахмала при различных температурах, показали, что при достижении температуры пастеризации 80-100 °С получаются эмульсии с высокой внутренней фазой, обладающие превосходной механической прочностью и модулем сохранения энергии, а также другими характеристиками, ценными с точки зрения 3D-печати. На основе этих эмульсий получают печатные объекты с устойчивыми структурами [46] [77]. Аналогичным образом, контроль pH в процессе 3D-печати имеет первостепенное значение. Исследования плавленых сыров, используемых для аддитивной печати, выявили критическую роль pH в стабильности конечного продукта. Когда pH находится в диапазоне от 5,7 до 6,1 плавленый сыр имеет тенденцию к образованию «жилистых» белковых частиц, которые, в свою очередь, снижают структурную стабильность [78]. Ross и др. провели исследование, чтобы проанализировать влияние pH на пригодность плавленого сыра к печати [65]. Результаты показали, что продукты, напечатанные из плавленого сыра с более высоким pH, имеют более эластичную и вязкую текстуру, но при этом хуже отпечатываются по сравнению с продуктами, напечатанными с более низким pH.

Другими учеными аналогичным образом было также отмечено, что поддержание более низкого pH привело к возникновению физико-химических условий, способствующих течению творога во время пластификации [64]. Понижение pH сыров с высоким содержанием кальция приводило к увеличению пластичности и текучести плавленого сыра. Это подчеркивает важность тщательного контроля уровня pH в процессе 3D-печати, поскольку он может существенно влиять на текстуру [79], пригодность к печати и общие показатели качества 3D-изделий на основе молочных продуктов. Также было показано, что добавление сычужного фермента к казеину вызывает реакцию гелеобразования, причем на уровень гелеобразования влияют pH, концентрация ионов Ca^{2+} и температура, а самое сильное гелеобразование казеина достигается при температуре 40 °С и pH 6,0 [80].

Смешанные гелевые системы на основе молочных продуктов

Сочетание молочных компонентов с крахмалами, такими как нативный и модифицированный крахмал, представляет собой адекватную стратегию для повышения модуля упругости гелевой системы, как основы чернил, и улучшения свойств 3D-печати геля [81]. Крахмал (гели на его основе), характеризующийся сдвигово-утоначающимся псевдопластичным поведением, проявляет заметные желирующие свойства, которые могут быть использованы в качестве загустителей и желирующих агентов при производстве продуктов питания [82]. Некоторыми исследователями были предприняты усилия по изучению влияния включения казеина в гели из крахмала тапиоки. Результаты показали, что введение казеина приводит к снижению вязкости гелевой системы, что обеспечивает более плавное выдавливание геля из крахмала тапиоки и казеина из сопла экструдера и улучшает структуру 3D-печатных изделий [35]. В исследовании Lille и др. [83] провели пневматическую экструзионную печать с использованием пасты, состоящей из крахмала и сухого молока. Результаты исследования показали, что сочетание крахмала и 15 % сухого обезжиренного молока дает более стабильную структуру при печати, превосходящую стабильность, наблюдаемую в композициях, состоящих только из крахмала.

Инулин, растворимое пищевое волокно, обладает хорошей растворимостью в воде, при этом вода прочно связывается с гидроксильными группами в его молекулярной структуре. Включение инулина в состав белковых гелей значительно улучшает их водоудерживающую способность, реологические свойства и повышает пригодность для 3D-печати.

Гидрогели на основе целлюлозы и карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) могут также обеспечивать эффект загущения. Включение аналогов целлюлозы в молочные системы также может повысить адаптивность 3D-печати, что делает их применимыми для разработки композиций молочных чернил. Благодаря уникальной конформации цепи КМЦ, они взаимодействуют с молочными белками, изменяя конформацию цепи и повышая стабильность системы. Кроме того, гидрофильные группы в молочных белках образуют водородные связи с

молекулами воды в цепях КМЦ, что делает массовую долю КМЦ значимым фактором в контроле вязкости системы КМЦ/молочный гель. Следовательно, добавление соответствующей концентрации КМЦ может придать системе молоко/КМЦ слабые или сильные гелеобразующие свойства, что делает ее перспективным компонентом пищевых чернил для 3D-печати.

Повысить потенциал 3D-печатных пищевых систем и улучшить качество печати на основе молочных продуктов можно путем добавления гидрофильных коллоидов, таких как камедь конжака, каррагинан, пектин и ксантановая камедь [84].

Порошок конжака получают из измельченных кусочков конжака, а камедь конжака - путем специальной обработки щелочью с последующим растворением в воде. Каррагинан, добываемый из красных морских водорослей, обладает гелеобразующими свойствами, а его различные виды дают возможность создавать молочные гели с различной плотностью и структурой [85]. Пектин – это полисахарид, состоящий из мономеров галактуроновой кислоты, который одновременно является анионным полиэлектролитом и природным гидрофильным коллоидом растительного происхождения. Его желирующая способность зависит от степени метоксилирования, что может быть использовано для регулирования вязкости геля при использовании пектина в качестве желирующего компонента или загустителя для 3D-печати [84]. Каррагинан и пектин могут усиливать решетчатую структуру белковых систем за счет гелеобразования, тем самым улучшая характеристики 3D-печатных изделий. Ксантановая камедь, характеризующаяся как полисахарид с отрицательным зарядом, благодаря наличию карбоксильных групп [86], проявляет склонность к отталкиванию в присутствии белков, таких как казеин, в нейтральной среде pH. Cai и др. [87,88] продемонстрировали значительное увеличение как G' , так и $G'-G''$ в заварном белковом креме при введении каррагинана.

Примечательно, что взаимодействие между каррагинаном и белками ИСБ, обусловленное электростатическими силами, приводит к образованию более компактной гелевой сети. Чистый коагулят из концентрата молочного белка (КМБ)

не способен поддерживать стабильную структуру. Однако было обнаружено, что добавление пектина к КМБ увеличивает G' , G'' и кажущуюся вязкость геля, формируя более прочную гелевую структуру, при этом изделие не деформируется и не разрушается после печати.

Мальтит (МТ) представляет собой многоатомный спирт из класса альдитов, получаемый из крахмала. В одном из исследований было проанализировано влияние различных концентраций мальтита и ИСБ на свойства густой молочной системы для 3D-печати, полученной путем термокислотной коагуляции. Исследование показало, что наибольшая прочность и наилучшие характеристики печати были достигнуты при соотношении WPI: МТ равном 4:2.

Исследования синергетического эффекта между ксантановой камедью и концентратом молочного белка выявили отсутствие образования прочной трехмерной сети, что указывает на то, что ксантановая камедь не является оптимальной добавкой в системах для 3D-печати молочных продуктов.

Исследования показали, что липидно-молочные гибридные гелевые системы обладают превосходными реологическими свойствами, что приводит к значительному повышению точности печати получаемых изделий. Ганаш, например, считается эмульсией, состоящей из шоколада в жировой фазе и взбитых сливок в водной фазе, причем капли жировой фазы диспергированы в водной фазе [89]. Включение какао-порошка, содержащего большое количество липидов, во взбитые сливки приводит к миграции частиц какао из масляной фазы в водную [90] [91]. В результате взаимодействия частиц какао образуются более крупные капли масла, что повышает вязкость эмульсии и улучшает сохранение формы продукта. В одном исследовании были протестированы различные соотношения какао-порошка и взбитых сливок, и выяснилось, что добавление 20 % (W/W) какао-порошка привело к созданию 3D-печатных продуктов с высокой точностью и прочностью, что уменьшает вероятность разрушения продукта [20].

Некоторые виды молочных продуктов с высоким содержанием жира могут быть использованы для повышения точности 3D-печати и качества готовых изделий. Например, сыр чеддер, известный высоким содержанием жира, стал еще

одним объектом экспериментов. Исследователи включили наноплазменные волокна сывороточного белка (НПСБ) в сыр чеддер, обнаружив, что НПСБ не только способствуют равномерному распределению жира и воды, улучшая процесс 3D-печати сыра, но и обеспечивают когезию, что приводит к равномерному сплавлению слоев продукта.

Влияние ионов кальция

Было показано, что добавление неорганических солей в молочные продукты улучшает гелеобразные свойства этих продуктов, тем самым повышая производительность и точность 3D-печати на их основе. Например, введение ионов кальция в обезжиренное молоко способствует его гелеобразованию за счет образования кальциевых мостиков между соседними карбоксильными группами белков [92]. Кроме того, введение ионов кальция может привести к образованию коллоидного фосфата кальция, который взаимодействует с казеином в молочных продуктах, образуя гель, обладающий значительным потенциалом для использования в качестве чернил для 3D-печати [93]. Было замечено, что хелатирование кальция приводит к диссоциации мицелл казеина и накоплению диссоциированных белковых частиц, в результате чего печатные продукты становятся более упругими и эластичными [94]. Uribe-Alvarez и др. продемонстрировали, что включение ионов кальция вызывает агрегацию частиц при использовании ИСБ [95]. Тщательно регулируя уровень ионов кальция, добавляемых в ИСБ, и оптимизируя количество хлорида кальция, можно получить гели с улучшенной твердостью, вязкоупругостью, повышенной пригодностью к печати и превосходными свойствами для термически необратимых гелей. Эти гели хорошо подходят для использования в качестве пищевых чернил для 3D-печати, представляя собой новый подход к 3D-печати в индустрии молочных продуктов. Эта инновация открывает новые возможности для применения 3D-печати в производстве молочных продуктов [95].

Заключение к литературному обзору

По мере развития общества, экономики и технологий все большее распространение получают специализированные продукты питания, созданные по индивидуальному заказу. Внедрение технологии 3D-печати представляет собой значительную веху в сфере производства продуктов питания. Молочные продукты, благодаря богатому составу необходимых человеку питательных веществ, играют ключевую роль в области 3D-печати. Тем не менее, на качество и пригодность 3D-печати оказывают глубокое влияние свойства, присущие печатным чернилам, и параметры принтера. Эти факторы в совокупности оказывают значительное влияние на пригодность к печати и качество продукции, в первую очередь за счет влияния на вязкость, эластичность и механические характеристики молочных гелей. Более того, некоторые молочные компоненты могут быть использованы для улучшения других пищевых систем для 3D-печати, с возможностью физических и биологических модификаций для повышения точности печати. Например, полисахариды могут повышать видимую вязкость и механическую прочность напечатанных молочных продуктов, позволяя им сохранять свою форму после печати. С другой стороны, неорганические соли изменяют вязкоупругость геля, вызывая агрегацию белковых частиц в молочных продуктах, что повышает экструдруемость чернил. Регулировка уровня pH также может повлиять на вязкоупругость, растяжимость и текучесть геля, что впоследствии скажется на точности 3D-печати.

Добавление различных загустителей не только улучшает пригодность молочных продуктов к печати, но и приводит к улучшению текстуры, вкуса и питательных свойств. Это открывает путь к разработке персонализированных питательных продуктов. Будущие исследования должны продолжать использовать результаты исследований по модификации молочных продуктов для улучшения качества и пригодности к печати 3D-печатных молочных продуктов. Очень важно всестороннее понимание взаимодействия между параметрами печати и

традиционными методами модификации молочных продуктов или белков. Кроме того, неизученные технологии модификации молочных продуктов обещают постепенно создать подходящие материалы для молочных чернил, которые будут обладать отличными печатными свойствами и будут пригодны для крупномасштабного производства. Некоторые ингредиенты, содержащиеся в молочных продуктах, могут служить вспомогательными материалами в других гелевых системах, повышая вязкоупругость и обеспечивая пригодность к печати, когда конкретные материалы могут не подходить в качестве сырья для 3D-печати. В заключение следует отметить, что постоянные исследования и инновации в области технологии 3D-печати молочных продуктов способствуют повышению персонализации и питательных качеств 3D-печатных продуктов. Это помогает сделать переработку молочных продуктов более удобной и доступной для потребителей, а также способствует реформированию новых молочных продуктов и их дальнейшему внедрению.

Технология трехмерной (3D) печати позволяет проектировать и изготавливать объекты с помощью цифровых технологий, управляемых компьютером. Для этого требуется сырье с особыми реологическими свойствами для экструзии и сохранения формы. Молочные продукты перспективны для 3D-печати благодаря своей способности формировать структуры и питательной ценности. Однако качество 3D-печати молочными продуктами зависит от свойств «пищевых чернил» и параметров принтера, что создает трудности для практического применения. В данной работе представлен обзор пригодности молочного сырья для 3D-печати пищевых продуктов, обсуждаются физико-химические модификации и добавки для улучшения их пригодности и питательных свойств.

Внутренняя структура и состав «пищевых чернил», полученных из молочных продуктов, тесно связаны с их производительностью. Пригодность «пищевых чернил» для 3D-печати можно повысить с помощью физической, химической или ферментативной обработки. Гелеобразные свойства молочных продуктов можно улучшить, смешивая их с гидрофильными гелями, вводя кальций и липиды для

улучшения характеристик 3D-печати молочных продуктов. Технология 3D-печати позволяет создавать новые изделия из «пищевых чернил» на молочной основе с индивидуальным контролем содержания питательных веществ, удовлетворяя растущий потребительский и рыночный спрос на более здоровую пищу.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Структура, организация и схема исследований

Работа выполнена во ФГАНУ «ВНИМИ» на базе Лаборатории технологии молочных продуктов (до января 2026 года «Лаборатория биотехнологии молока и молочных продуктов»). Принципиальная схема организации проведения экспериментальных работ представлена на Рисунке 2.1.

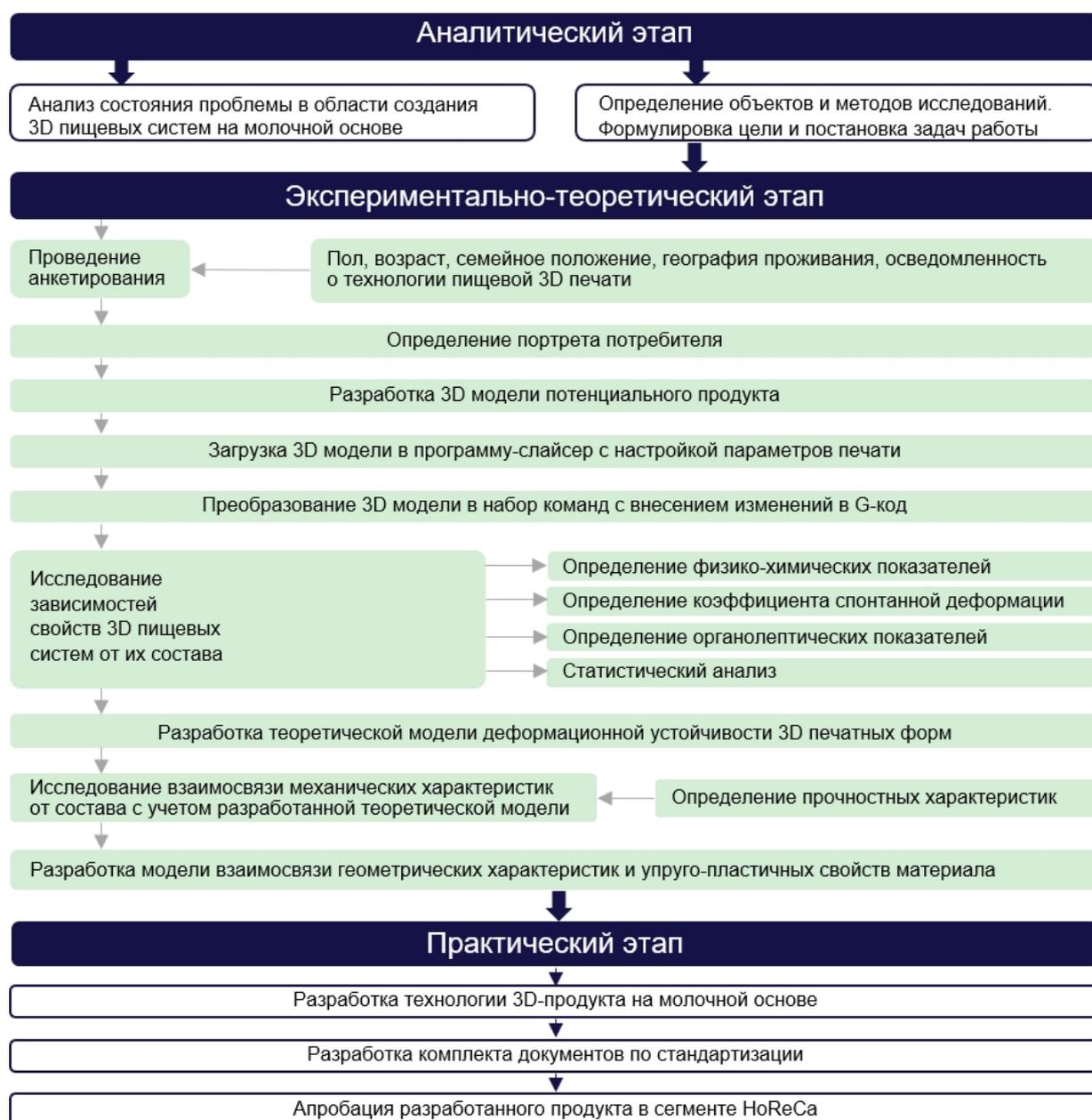


Рисунок 2.1 – Схема проведения исследований

Вначале были проанализированы перспективы развития 3D-печати в пищевой индустрии, оценены факторы, влияющие на 3D-печать пищевых систем, рассмотрены основные технологии 3D-печати, что позволило сформулировать цель и поставить задачи работы. Далее были определены объекты и методы исследований, предложен оригинальный метод оценки структурно-механических характеристик 3D продуктов.

На первом этапе экспериментальной работы путем расширенного анкетирования определены потребительские предпочтения в области пищевых аддитивных технологий, далее проведена оценка потенциала 3D продуктов для успешного коммерческого внедрения решений в пищевой индустрии путем SWOT-анализа. Далее был разработан G-код для печати 3D модели заданной формы. На этапе разработки рецептов пищевых чернил были исследованы зависимости свойств 3D пищевых систем от их состава и проведена органолептическая оценка. Далее было проведено моделирование деформационной устойчивости 3D печатных форм и разработана модель взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств 3D продуктов. В итоге был разработан технологический процесс получения пищевого 3D продукта, документ по стандартизации и оценена экономическая эффективность разработанной технологии.

2.2 Объекты исследований

Объектами исследования являлись модельные и реальные системы пластично-вязкой консистенции как основа 3D-продукта, полученного из казеина с добавлением различных концентраций КСБ, СОМ и СЦМ.

Для приготовления и изучения модельных систем использовали: молоко коровье сырое по ГОСТ 31449-2013 с массовой долей жира 3,2% (ООО «Итальянские традиции», Россия); молоко обезжиренное сухое, молоко цельное

сухое по ГОСТ 33629-2015 (ПАО Молочный Комбинат «Воронежский», Россия); концентрат сывороточных белков по ГОСТ Р 53456-2022 (ПАО Молочный Комбинат «Воронежский», Россия); мёд натуральный цветочный по ГОСТ 19792-2017 (компания «Алтайвита»), Россия; закваска, состоящая из чистых культур лактококков по ТУ 10.89.19-098-0041978 из коллекции лаборатории прикладной микробиологии и геномики микроорганизмов ФГАНУ «ВНИМИ»; вода питьевая по СанПиН 2.1.3684-21; соль поваренная по ГОСТ Р 51574-2018 (ООО «Руссольт», Россия); соль-плавитель «Фосфомикс-90» (Е 339) по ТУ 2148-003-50685486 (ООО «Рассвет», Россия).

2.3 Методы исследований

При выполнении работы применялись стандартизованные методы, используемые при контроле физико-химических и органолептических характеристик молока и молочной продукции. Определение массовой доли жира в образцах продукта проводили по ГОСТ 5867-90, массовой доли белка методом Кьельдаля по ГОСТ 23327-98, определение массовой доли сухих веществ по ГОСТ Р 54668-2011, определение массовой доли углеводов хроматографическим методом на жидкостном хроматографе «МАЭСТРО», Россия, ООО «ИНТЕР-ЛАБ».

Активную кислотность смеси, предназначенной для 3D-печати определяли потенциометрическим методом с помощью рН-метра inoLab pH/Cond Level 1 (WTW, Германия) с комбинированным стеклянным электродом WTW SenTix 81 согласно ГОСТ 32892-2014.

Титруемую кислотность образцов определяли по ГОСТ 3624-92.

Оценку органолептических показателей образцов 3D-продуктов проводили по ГОСТ ISO 4121-2016 по однополярной интервальной числовой шкале от 0 до 5 баллов по методике условного профилирования.

Срок годности продукта определен согласно МУК 4.2.1847–04 «Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов».

При проведении исследований по установлению рекомендуемых сроков годности 3D-продукта микробиологические показатели определяли по ГОСТ 32901-2014 (бактерии группы кишечных палочек); дрожжи, плесени – по ГОСТ 33566-2015; патогенные микроорганизмы в том числе *Salmonella* – по ГОСТ 31659-2012; количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов – по ГОСТ 32901-2014.

Методология анкетирования

В рамках данного исследования с целью формирования детализированного портрета потенциального пользователя аддитивных технологий в пищевой промышленности было проведено анкетирование. Данный опрос позволил выявить ключевые характеристики целевой аудитории, включая профессиональную принадлежность, уровень осведомленности о возможностях 3D-печати, а также основные потребности и барьеры, связанные с внедрением данной технологии.

Полученные данные обеспечили эмпирическую основу для анализа перспектив применения аддитивных методов в индустрии, что способствовало уточнению направлений дальнейших исследований. Опрос был проведен с помощью онлайн-сервиса Google Формы в рамках временного промежутка январь-апрель 2025 года и обработан с применением статистических методов, что гарантирует достоверность выводов.

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.

При составлении анкеты учитывались социально-демографические и поведенческие характеристики участников, включая возраст, семейное положение, размер населенного пункта проживания, наличие детей, а также отношение к

инновациям в кулинарной индустрии. Особое внимание уделялось следующим аспектам:

- готовность к кулинарным экспериментам;
- интерес к персонализированному питанию;
- опыт самостоятельного использования пищевых 3D-принтеров;
- дегустация продуктов, изготовленных аддитивными методами;
- предпочтения в посещении заведений, применяющих 3D-печать в приготовлении блюд;
- уровень заинтересованности в использовании данной технологии в домашних условиях.

Помимо базовых социально-демографических показателей, участникам предлагалось оценить визуальные и вкусовые аспекты продуктов, созданных методом 3D-печати. В частности, респонденты выбирали наиболее привлекательную геометрическую форму пищевого изделия, а также указывали, какой продукт на молочной основе они хотели бы продегустировать в напечатанном виде.

SWOT-анализ аддитивных технологий

SWOT-анализ – метод оценки перспектив продукта или компании по продвижению на рынке.

Всесторонний аудит проекта, который детально оценивает внутренний потенциал и внешние рыночные условия, трансформирует стратегическое видение в последовательный и обоснованный план действий. SWOT-анализ незаменим при построении долгосрочных траекторий роста и особенно важен при запуске нового товара или продуктовой линейки. Критерии оценки, которые используются при данном анализе, представлены в Таблице 2.1.

Получение 3D печатных форм

В работе использовался пищевой 3D-принтер FELIX Food Switch Head (Рисунок 2.2), разработанный компанией FELIXprinters (Нидерланды). Принтер имеет габариты 430 × 500 × 700 мм (Д × Ш × В) и массу 14 кг, работает от сети переменного тока с напряжением 110–220 В. Устройство обеспечивает

формирование слоев толщиной от 0,25 до 3,0 мм и оснащено гибкой платформой из нержавеющей стали, а также системой автоматического выравнивания на основе электропривода.

Таблица 2.1 – Критерии оценки, используемые при проведении SWOT-анализа

Наименование критерия	Условное обозначение	Расшифровка критерия	Примеры
Strengths – сильные стороны	S	Факторы, уже работающие в пользу предприятия, внедряющего новый продукт	Современное оборудование, уникальные технологии; бренд, хорошо зарекомендовавший себя на рынке
Weaknesses – слабые стороны	W	Ограничения, которые тормозят развитие производственного кластера	Плохая логистика, недостаточность каналов продаж, низкая маржинальность
Opportunities – возможности	O	Внешние тренды и факторы, которые можно использовать в пользу развития производства и продвижения продукта	Наличие онлайн площадок продаж, рост популярности экологизации производства, поддержка производителя государством
Threats – угрозы	T	Факторы, создающие проблемы	Конкуренция, кризис, изменения в законодательстве

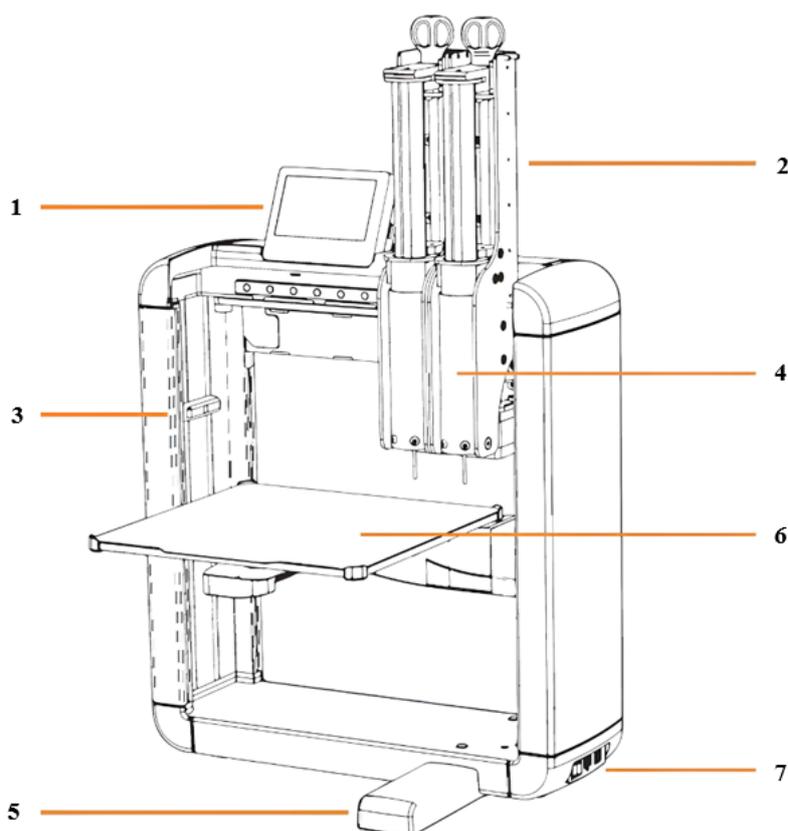


Рисунок 2.2 –
Схематическое
изображение 3D-принтера
FELIX Food Switch Head

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 – включатель/выключатель питания

Экструзионный блок принтера включает двойной моторизованный поршневой механизм с возможностью переключения, совместимый со шприцами объёмом 70 и 100 мл. В комплектации доступны сопла диаметром от 0,5 мм до 4 мм. Предусмотрена опция подогрева шприца с регулировкой температуры в диапазоне от 20 до 80 °С.

Создание 3D модели было произведено с помощью профессионального программного обеспечения для 3D-моделирования, анимации и визуализации Autodesk 3ds Max, предназначенного для работы архитекторов и дизайнеров.

Управление устройством осуществляется через 5-дюймовый емкостный сенсорный экран, оснащённый восьмиядерным процессором. Встроенное программное обеспечение Repetier-Server обеспечивает контроль процесса печати, включая мониторинг через веб-камеру и управление файлами. Объём внутренней памяти составляет 16 ГБ.

Для подключения к внешним устройствам предусмотрены интерфейсы USB, Wi-Fi и Ethernet. В качестве программного обеспечения для подготовки моделей рекомендуется использование профессионального слайсера Simplify3D, обеспечивающего высокую точность и гибкость настроек печати.

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

Важным аспектом управления является функция точного позиционирования компонентов принтера. Специализированное меню перемещения позволяет регулировать координаты печатающей головки, экструдера и рабочей платформы, что особенно важно при калибровке и подготовке к печати.

Дополнительно интерфейс предоставляет возможность подключения веб-камеры для визуального мониторинга процесса в реальном времени. Встроенный

раздел статуса отображает текущие параметры работы устройства, а функция аварийной остановки обеспечивает мгновенное прекращение всех операций в случае возникновения нештатных ситуаций.

Графический модуль температуры предоставляет актуальные данные о нагреве экструдеров и платформы, что способствует поддержанию оптимальных условий печати. Дополнительные инструменты, такие как настройка съемки, расширяют функциональные возможности 3D-принтера FELIX Food Switch Head, позволяя включить веб-камеру для наблюдения за печатью в реальном времени или проверить текущий статус принтера.

Исследование структурно-механических характеристик

С учетом специфичности структурно-механических свойств сырья и продукта, в частности, критических изменений при охлаждении, в качестве характеристик системы были выбраны показатели напряжения сдвига, растяжения и сжатия.

В ходе проведения эксперимента оценивали внешний вид и физико-механические показатели исследуемых образцов 3D форм. Испытания 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» (Рисунок 2.3). Прибор представляет собой устройство высокой точности, обеспечивающее возможность многосторонних испытаний материала на растяжение, сжатие и изгиб.

Принцип действия заключается в преобразовании тензорезисторным датчиком силы, воздействующей на образец, в электрический сигнал, изменяющийся пропорционально этой силе. Электрический сигнал передается в контроллер и результаты измерений в единицах силы отображаются на дисплее.

Конструктивно машина состоит из нагружающего устройства и контроллера.

Нагружающее устройство состоит из нагрузочной рамы, тензорезисторного датчика, подвижной траверсы.



Рисунок 2.3 – Универсальная испытательная машина Shimadzu EZ-LX-1

Применительно к исследованию прочностных характеристик 3D печатных форм была сконструирована камера, представленная на Рисунке 2.4. Размер отверстий подходит под исследование 3D изделий с различной площадью поверхностей на сдвиг. 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.

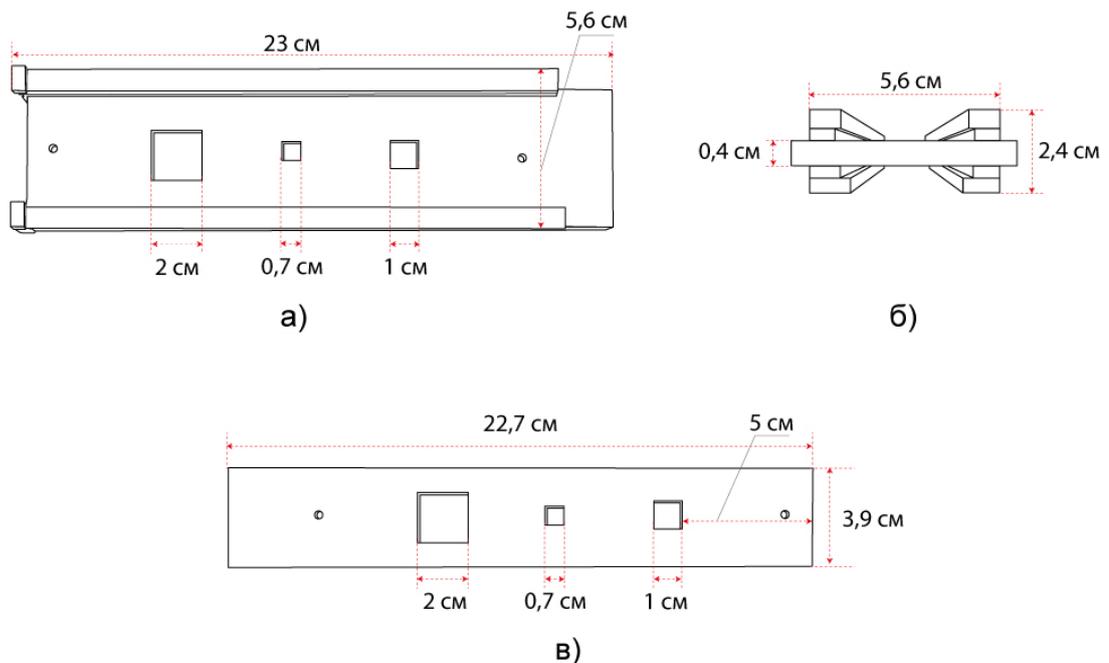


Рисунок 2.4 – Камера для исследования прочностных характеристик 3D печатных форм (а) корпус камеры, б) вид камеры сбоку, в) крышка камеры)

Контроллер управляет всеми операциями и обрабатывает сигналы датчика. Измеренные значения силы отображаются на дисплее. 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.

Все результаты представлены как средние арифметические значения 3–5 независимых экспериментов. Статистическую обработку данных проводили с использованием описательной статистики и методов регрессионного анализа в программном обеспечении Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation Inc., США) и TableCurve 3D (Grafiti LLC Headquarters, США). Визуализацию данных выполняли средствами указанного программного обеспечения.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Выявление потребительских предпочтений в области пищевых аддитивных технологий

На основании проведенного анкетирования можно сделать вывод, что наиболее перспективной группой потребителей, проявляющих устойчивый интерес к использованию пищевых 3D-принтеров в домашних условиях, являются лица в возрасте 35-45 лет, состоящие в зарегистрированном браке и имеющие детей (Рисунок 3.1, 3.2). Из всей массы респондентов большую часть опрошенных составляли лица мужского пола (Рисунок 3.3)

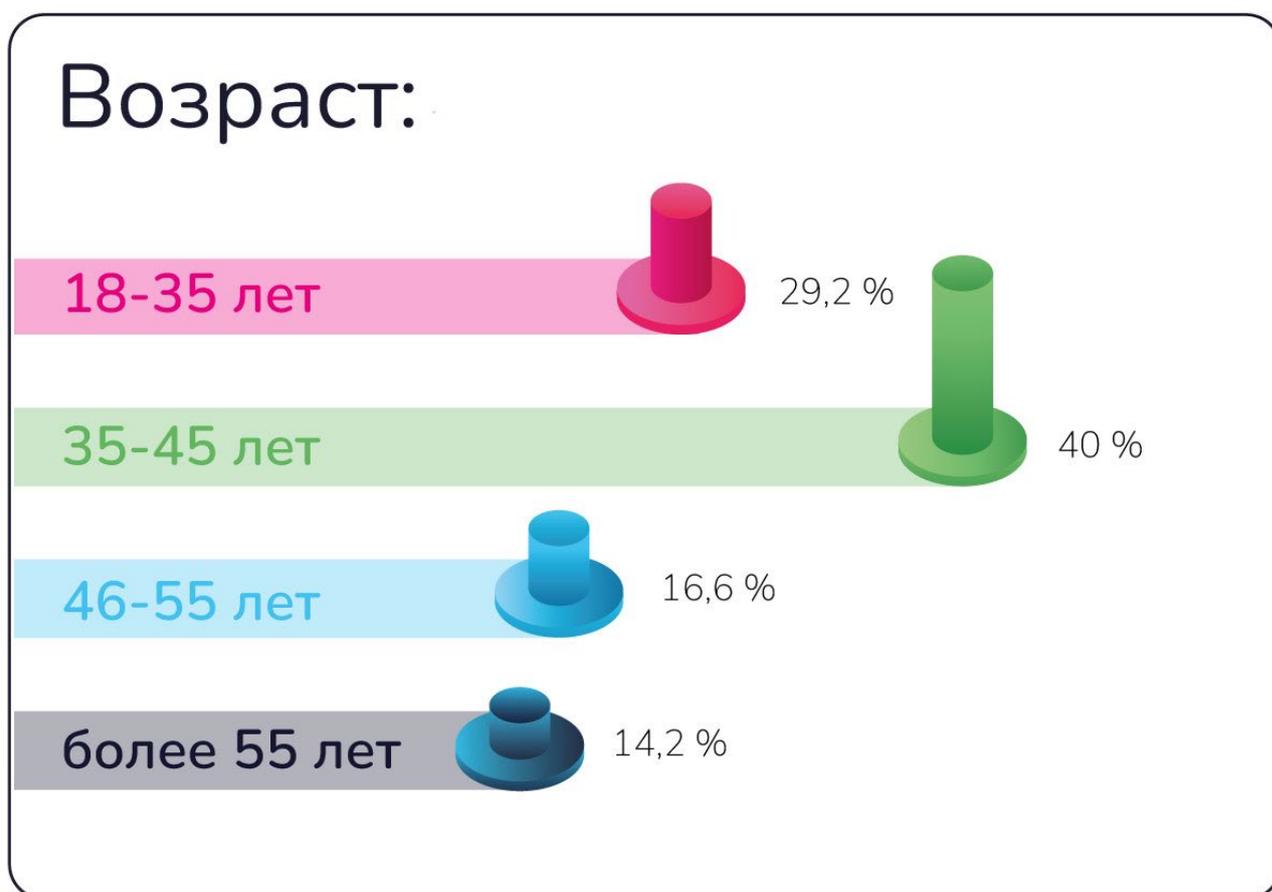


Рисунок 3.1 – Распределение потенциальных потребителей по возрастам

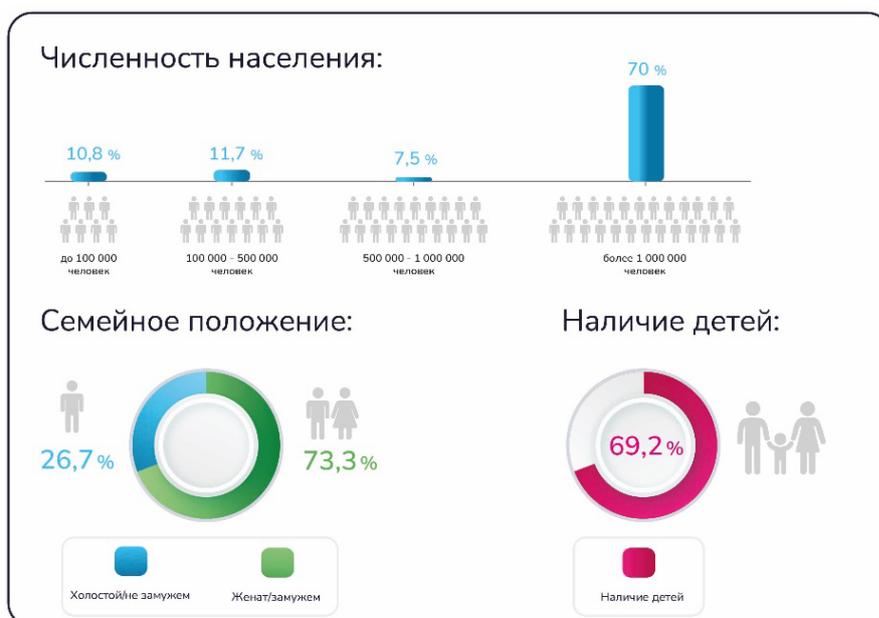


Рисунок 3.2 – Распределение респондентов по семейному статусу



Рисунок 3.3 – Состав респондентов по половой принадлежности

Данная категория пользователей преимущественно проживает в мегаполисах, где численность населения составляет свыше 1 млн человек, что обусловлено максимально высоким уровнем доступности инновационных технологий и сложившейся культурой применения технических новинок. Распределение опрошенных людей по странам проживания представлено на Рисунке 3.4. Большую часть респондентов составило население Российской Федерации.

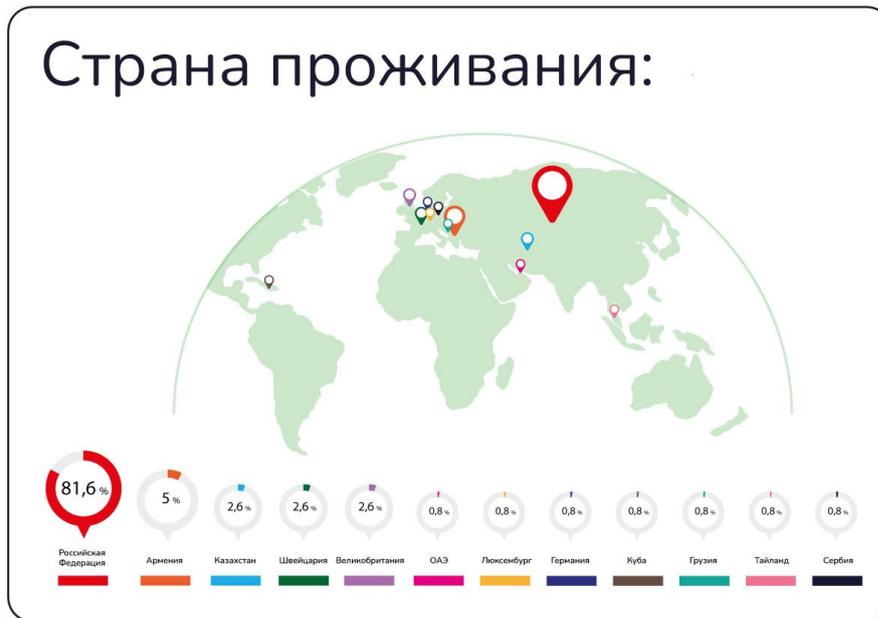


Рисунок 3.4 – Распределение респондентов по странам проживания

Важным фактором, определяющим вовлечённость данной группы людей к потенциальному использованию аддитивных технологий в кулинарии, является выраженный интерес к экспериментам в области гастрономии (Рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Распределение респондентов по интересам к кулинарным экспериментам

Как показало анкетирование, 94,2% опрошенных не имеют опыта самостоятельного использования пищевого 3D принтера для приготовления пищи (Рисунок 3.6). Тем не менее 5,8 % респондентов уже используют аддитивные

технологии в повседневной жизни, что свидетельствует о том, что 3D печать активно интегрируется в современные реалии.



Рисунок 3.6 – Опыт самостоятельного использования 3D технологий



Рисунок 3.7 – Количество респондентов, употребивших 3D изделия

Несмотря на то, что большинство опрошенных (более 80 %) не пробовали изделия, напечатанные на 3D принтере (Рисунок 3.7), более 80 % выразили желание попробовать такие изделия (Рисунок 3.8).

Интересно ли было бы Вам посетить заведение (ресторан, кафе и т.д.), в котором приготовление блюд осуществляется с помощью 3D-принтера?



Рисунок 3.8 – Количество респондентов, проявивших интерес к 3D изделиям

На Рисунке 3.9 представлена диаграмма распределения лиц, участвующих в опросе по интересу к приготовлению пищи с помощью 3D принтера, по десятибалльной шкале (10 – максимальный балл), так 22,5 % респондентов оценили свой интерес на высший балл; 23,3 % на 8 баллов, что говорит о перспективности использования 3D принтинга для приготовления еды.

Оцените по шкале от 1 до 10 интерес к использованию пищевого 3D-принтера для приготовления еды, где 10 — это максимальный балл

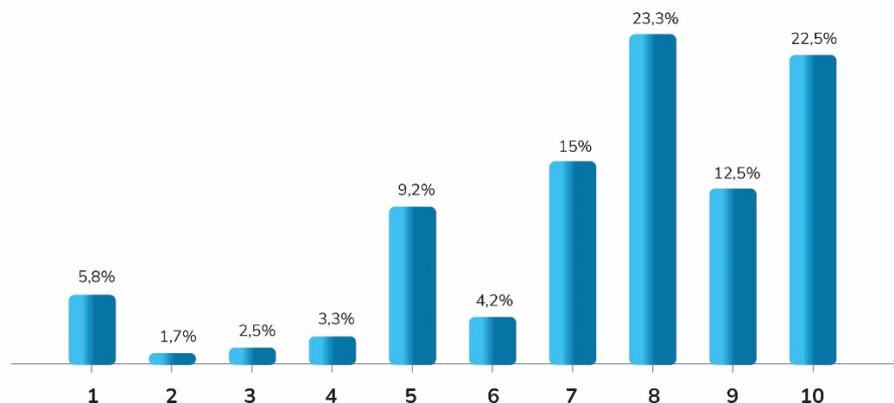


Рисунок 3.9 – Диаграмма распределения респондентов по интересу к аддитивным технологиям



Рисунок 3.10 – Число пользователей бытовой техники

Среди вопросов, заданных респондентам, был вопрос касательно геометрической формы печатного изделия. Среди вариантов, предложенных опрашиваемым, были формы куба, сферы, пирамиды, цилиндра, конуса и призмы. Большая часть людей определило в качестве предпочтительной формы потенциального 3D изделия геометрическую форму куба и сферы. Тем не менее количество респондентов, которые выбрали форму куба, превышало количество тех, кто предпочел сферу (Рисунок 3.11).

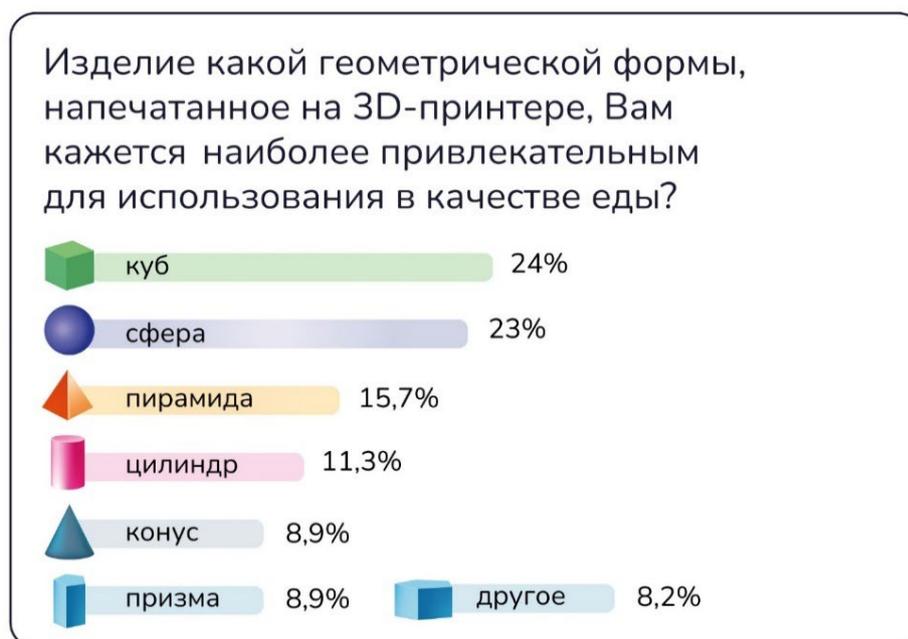


Рисунок 3.11 – Распределение респондентов по предпочтению геометрической формы 3D изделия

Помимо выше озвученного, потенциальным потребителям был задан вопрос касательно основы 3D изделий на молочной основе. Более 45% опрошенных выразили желание попробовать 3D продукт на основе сыра, на втором месте в качестве основы аддитивного продукта потребители предпочли творог и творожные изделия. Потребительские предпочтения относительно основы 3D продуктов представлены на Рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Потребительские предпочтения относительно основы 3D продуктов

Сочетание семейного статуса и урбанизированной среды проживания данной группы формирует запрос на оптимизацию времени, затрачиваемого на приготовление еды, при одновременном сохранении её питательной ценности и оригинальности. Это создаёт благоприятные условия и предпосылки для внедрения аддитивных технологий как инструмента, позволяющего совмещать кулинарное творчество с удобством и практичностью современных технологий. Такие пользователи более активно осваивают новые рецептуры, стремятся к персонализации рациона и демонстрируют большую готовность интегрировать высокотехнологичные кухонные устройства в повседневную практику приготовления пищи, и их количество значительно превышает количество лиц, не проявляющих интерес к новым формам пищи (Рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Готовность к использованию персонализированного питания

Полученные данные позволили выявить важные тенденции в восприятии аддитивных пищевых технологий среди различных групп потребителей. Результаты были использованы при разработке и выборе итоговой формы напечатанного изделия и позволили сформировать портрет потенциального потребителя (Рисунок 3.14)

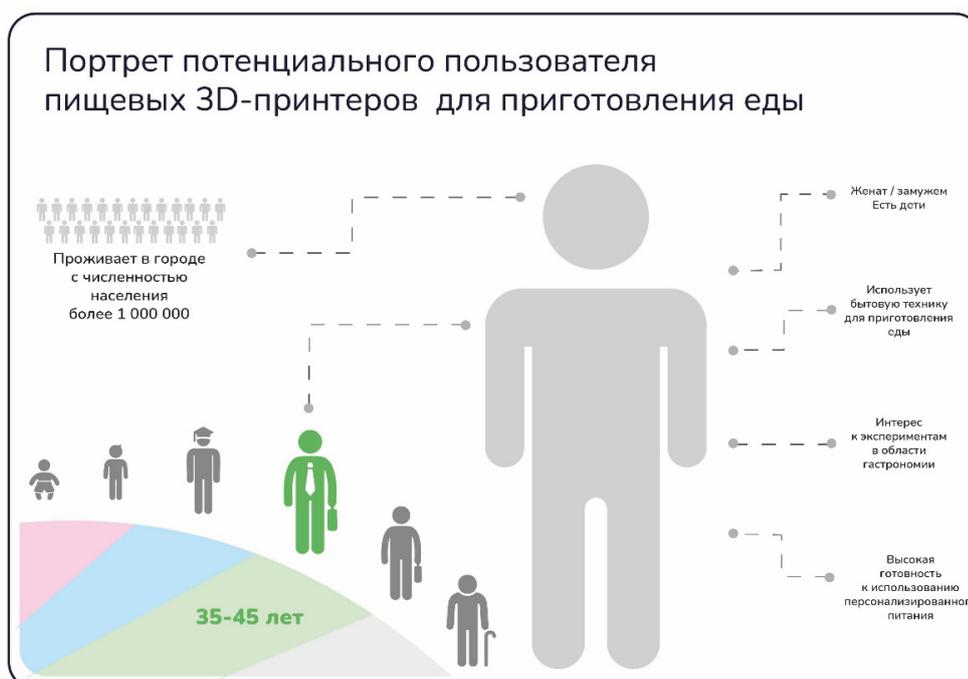


Рисунок 3.14 – Портрет потенциального потребителя 3D продуктов

3.2 Оценка потенциала барьеров и стратегических перспектив для внедрения аддитивных технологий в пищевой индустрии

Систематизация факторов, лимитирующих и расширяющих возможности интеграции аддитивных технологий в пищевое производство, была осуществлена на основе методологии SWOT-анализа, позволив структурировать ключевые детерминанты их успешной адаптации (Рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 – Результаты SWOT-анализа аддитивных технологий

Сильные стороны (Strengths)

На сегодняшний день сложившиеся цепочки производства и потребления продуктов питания характеризуются значительными потерями на этапах переработки, логистики, дистрибуции и конечного потребления. Аддитивное производство открывает возможности для внедрения модели «точно в срок» (just-in-time), при которой сырье преобразуется в готовый продукт исключительно по запросу потребителей и в определенном объеме. Пищевая 3D-печать

минимизирует отходы, возникающие при технологической обработке, используя только необходимое количество пищевых чернил. Принтер, используя цифровую модель, ориентированную на определенную задачу, экструдировывает пищевую матрицу с высокой точностью, сводя технологические потери к минимуму.

Одним из наиболее значимых потенциалов пищевой 3D-печати является возможность кастомизации продукта под индивидуальные потребности конечного потребителя. На основе данных, которые учитывают сведения о здоровье, аллергических реакциях, генетических особенностях и индивидуальных вкусовых предпочтениях, можно изменять рецептуру в режиме реального времени. Например, пациентам с дисфагией (нарушением функции глотания) необходима пища с определенными реологическими свойствами (мягкая, желеобразная). Как правило, такая пища имеет непривлекательный внешний вид и бедна необходимыми нутриентами. Технологии пищевой 3D-печати позволяют создавать гелевые структуры, обогащенные протеинами, витаминами и микроэлементами, которым можно придать визуально аппетитную форму готового продукта, повышая качество жизни пациента.

Аддитивные технологии позволяют расширять горизонты классического формообразования продукта, обеспечивая воспроизведение объектов со сложной внутренней архитектурой и геометрией, открывая новые возможности для гастрономического дизайна. Технологии 3D-печати позволяют равномерно производить распределение различных ингредиентов внутри единого продукта, например, размещение начинки в виде точной сетки внутри основы напечатанного изделия. Среди сильных сторон пищевой 3D-печати можно отметить ее роль катализатора внедрения в пищевой рацион альтернативных ингредиентов, которые часто обладают неидеальными технологическими или сенсорными свойствами при их классическом использовании. Благодаря преобразованию ингредиентов в пищевые чернила данные ингредиенты могут быть структурированы в визуально привлекательные и вкусные продукты.

Обеспечение высокой степени автоматизации и воспроизводимости является еще одной сильной стороной применения аддитивных технологий. Созданная

цифровая модель продукта может быть воспроизведена на аналогичном оборудовании с минимальными отклонениями. Набор команд и инструкций (G-код), определяет траекторию перемещения печатающих головок, температурные режимы, скорость экструзии, подогрев стола, работу вентилятора и другие критические параметры печати. Это обеспечивает высокий уровень контроля качества и стабильности органолептических показателей готовой продукции от одной партии к другой и не требует постоянного присутствия оператора.

Аддитивные технологии позволяют оптимизировать временные затраты за счет сокращения количества этапов производства. Объединение ряда операций, например, таких как формовка, декорирование и сборка, в один автоматизированный процесс существенно сокращает общее время от концепции до готового продукта.

Слабые стороны (Weaknesses)

Одной из слабых сторон для массового внедрения 3D-печати остается высокая стоимость оборудования, что создает существенный барьер для активного использования аддитивных технологий в пищевой отрасли. Помимо стоимости самого оборудования необходимы затраты на формирование сопутствующей инфраструктуры: систем охлаждения и нагрева, специализированных экструдеров и программного обеспечения для моделирования и слайсинга. Данное обстоятельство приводит к удорожанию конечного продукта, делая его малодоступным для массового потребителя, значительно удлиняя сроки окупаемости вложенных средств со стороны потенциальных инвесторов.

В отличие от традиционных методов пищевого производства, где используется огромное разнообразие сырья, аддитивное производство накладывает строгие реологические ограничения на свойства печатных сред. Материал, который планируется использоваться в качестве пищевых чернил, должен обладать определенной вязкостью и способностью к быстрому структурообразованию после экструзии. Применение материалов с неоднородной структурой может приводить к засорению экструдеров в процессе печати. В настоящий момент это существенно

сужает потенциал использования технологии для создания полноценных сложных продуктов.

Критическим вызовом для интеграции аддитивных технологий в пищевое производство является обеспечение соответствия строгим санитарно-гигиеническим нормам. Конструкция большинства современных пищевых 3D-принтеров характеризуется наличием большого количества труднодоступных зон, которые являются потенциальными местами для накопления органических остатков и развития нежелательной микрофлоры. Для полноценной мойки деталей требуется полная разборка узлов после каждого производственного цикла, увеличивая время простоя принтера.

Органолептические свойства продуктов, созданных аддитивным способом, зачастую уступают аналогам, произведенным по классическим рецептурам. Например, напечатанный стейк на основе растительного белка не может имитировать сложную мышечно-жировую структуру и такие свойства, как жесткость и сочность настоящего мяса.

Внедрение инноваций в пищевую индустрию часто сталкивается с нежеланием потребителей принимать в пищу продукты или блюда, воспринимаемые как «ненатуральные» или «синтетические». Потребительские паттерны предпочтения глубоко укоренены в культурных и традиционных практиках питания. На сегодняшний день пища, напечатанная на 3D-принтере, может ассоциироваться с отсутствием натуральности, вызывая настороженность с точки зрения здоровья и питательной ценности.

Эффективная эксплуатация пищевого 3D-принтера требует наличия технологических навыков и знаний. Оператор должен уметь владеть программным обеспечением для 3D-моделирования, обладать IT-навыками, понимать принципы механики, разбираться в свойствах ингредиентов и их поведении при различных температурных режимах. Отсутствие стандартизированных информационных протоколов и специализированных библиотек с материалами для принтеров разных производителей значительно усложняет процесс интеграции в пищевую отрасль.

Возможности (Opportunities)

Применение аддитивных технологий в пищевой индустрии открывают новые возможности, среди которых программное управление рецептурами на уровне отдельного продукта. Традиционная пищевая промышленность не всегда способна эффективно решать задачи персонализации ввиду экономической нецелесообразности мелкосерийного производства. 3D-печать обладает значительными возможностями перехода от массового производства к созданию пищевых продуктов, полностью адаптированных под индивидуальные физиологические потребности человека.

3D-печать позволяет преобразовывать низкомаржинальное или невостребованное сырье в продукты с высокой добавленной стоимостью. Важным аспектом является возможность использования сырьевых баз с нестабильными реологическими свойствами, которые технологически непригодны для традиционных линий переработки. Одним из примеров является мука из сверчков, которая является высокобелковым продуктом, однако ее органолептические свойства ограничивают широкое применение.

Динамика развития аддитивных технологий в пищевой сфере повторяет путь промышленных 3D-принтеров, где наблюдается устойчивая тенденция к снижению себестоимости оборудования и повышению его надежности. Это открывает инвестиционные возможности для крупных корпораций, малого бизнеса, научных лабораторий и даже конечных потребителей. Активному проникновению технологий существенно может помочь создание доступного и интуитивно понятного программного обеспечения, что существенно снизит барьер входа новых пользователей пищевых принтеров.

Отсутствие единых отраслевых стандартов на сегодняшний день является сильным сдерживающим фактором для масштабирования технологии. Разработка и внедрение унифицированных картриджей или капсул для пищевых паст может стать заметным катализатором роста, аналогично стандартизации капсул в кофейной индустрии. Например, использование таких картриджей позволит ресторанам оперативно менять ингредиенты и использовать расходные материалы

от разных производителей, не перенастраивая оборудование с повторной калибровкой системы.

Аддитивные технологии обладают большим потенциалом для фундаментального пересмотра логистических моделей в пищевой промышленности. Концепция «печати по требованию» подразумевает переход от транспортировки готовых пищевых продуктов к перемещению полуфабрикатов и сырья. Особенно это может стать актуально в удаленных регионах со сложной логистикой, где вместо доставки готовых рационов, поставка будет осуществляться в виде компактных картриджей с пищевыми концентратами для 3D-принтера. Это позволит сократить объем, вес и стоимость логистики, увеличивая сроки хранения.

Угрозы (Threats)

Ключевой угрозой для коммерциализации технологий пищевой 3D-печати является отсутствие сформированной нормативно-правовой базы. Действующие регламенты разрабатывались для традиционных методов производства и не учитывают специфики аддитивных технологий. Отсутствие четких государственных стандартов накладывают потенциальные юридические риски, сдерживая инвестиции в пищевые аддитивные технологии.

Пищевая индустрия является одной из самых консервативных, несмотря на желание людей пробовать новые вкусы. Внедрение инноваций традиционно наталкивается на осторожность со стороны потребителей. В общественном сознании пицца, созданная с помощью аддитивных методов, может восприниматься как «искусственная» или «менее натуральная» по сравнению с аналогами, произведенными по классическим технологиям. Для преодоления данной угрозы потребуются не только технологические ресурсы, но и значительные коммуникационные усилия со стороны маркетологов для формирования новой гастрономической эстетики вокруг напечатанных продуктов.

На сегодняшний день аддитивное производство неспособно конкурировать с традиционными отраслями пищевой промышленности. Одним из главных

критериев является себестоимость производства готовых продуктов. Рентабельность пищевой 3D-печати достигается только в сегментах с высокой добавленной стоимостью, например, сфера NoReCa, где ключевыми параметрами являются не масса и объем, а кастомизация и уникальность. Таким образом, одной из главных угроз развития технологии является риск ее маргинализации и закрепления исключительно за премиальными или узкоспециализированными сегментами рынка.

Широкое внедрение пищевых 3D-принтеров может спровоцировать волну критики со стороны общественности и производителей продуктов питания. Применение аддитивных технологий может быть воспринято как угроза традициям, девальвирующая технологов в современном промышленном производстве. Подобные дискуссии уже имели место в контексте автоматизации ресторанов быстрого питания.

Среди потенциальных угроз для массового применения аддитивных технологий в пищевой промышленности является кибербезопасность. Угроза может заключаться в возможности несанкционированного доступа к системам управления 3D-принтерами, камерам и цифровым базам рецептов. Кроме того, возможны атаки на рестораны и пищевые производства путем отключения оборудования, внесения изменений в рецептуры, что может привести к порче целых партий товара и значительным экономическим потерям. Для нивелирования киберугроз потребуются разработка новых протоколов безопасности и новые инвестиции со стороны производителей 3D-принтеров.

3.3 Методология проектирования 3D модели и ее трансформация в набор команд для управления принтером

Создание 3D модели было произведено с помощью профессионального программного обеспечения для 3D-моделирования, анимации, рендеринга и

визуализации AutoDesk 3ds Max, предназначенного для работы архитекторов и дизайнеров.

AutoDesk 3ds Max представляет собой широкий набор инструментов, позволяющих детально прорабатывать геометрию объектов и вносить необходимые изменения в создаваемую модель. Благодаря функциональности и гибкости 3ds Max, процесс моделирования максимально точный, что особенно требуется при работе над сложными проектами.

Использование AutoDesk 3ds Max помогло создать качественную модель изделия в короткие сроки, в соответствии с заданными параметрами, с возможностью последующей доработки модели при необходимости.

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. Для ее создания был разработан второй куб с размерами 0,6×0,6×0,6 см, который был спозиционирован в геометрическом центре первого объекта. На заключительном этапе из внешнего куба была выделена область внутреннего куба. В результате получилась готовая 3D-модель, соответствующая заданным параметрам. Данная методика демонстрирует эффективность использования AutoDesk 3ds Max для создания подобных объектов. На заключительном этапе был произведен экспорт созданной модели в формат STL-файла. Данный формат используется для 3D-печати и совместим с большинством современных 3D-принтеров.

Созданная 3D-модель была загружена в специализированное программное обеспечение, которое преобразует её в набор команд для управления 3D-принтером. Производитель 3D-принтера FELIX Food Switch Head рекомендует в качестве программы-слайсера использовать программный продукт Simplify3D (Рисунок 3.16). Данная программа позволяет полностью контролировать подготовку моделей к 3D-печати и детально регулировать ключевые параметры печати, такие как температура, скорость печати, порядок нанесения слоев, что обеспечивает высокое качество печатных объектов.

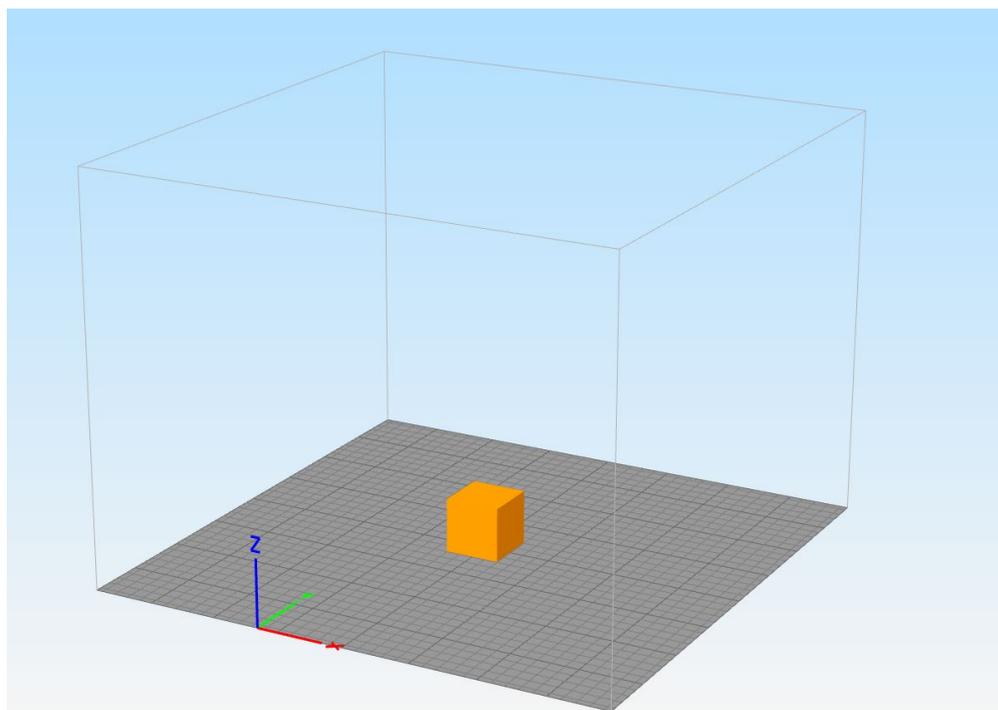


Рисунок 3.16 – Загруженная модель в программу-слайсер Simplify3D

На сегодняшний день слайсер Simplify3D является одной из самых популярных и технологически развитых программ для подготовки 3D-моделей к печати с набором гибких настроек, позволяющих пользователю сделать процесс печати максимально точным.

Simplify3D помогает находить проблемы в STL-файлах с помощью встроенных инструментов анализа. Система визуализации Simplify3D предоставляет пользователю возможность увидеть, как будет перемещаться экструдер принтера во время печати, своевременно выявить возможные ошибки и скорректировать их. Для создания уникального продукта и печати сложных моделей программа позволяет детально настраивать каждый слой, гибко изменяя параметры. Разделение модели на части обеспечивает гибкое управление скоростью печати. Нижние слои можно печатать медленнее для надежного сцепления с поверхностью, а верхние — ускорить, значительно сократив общее время процесса печати (Рисунок 3.17).

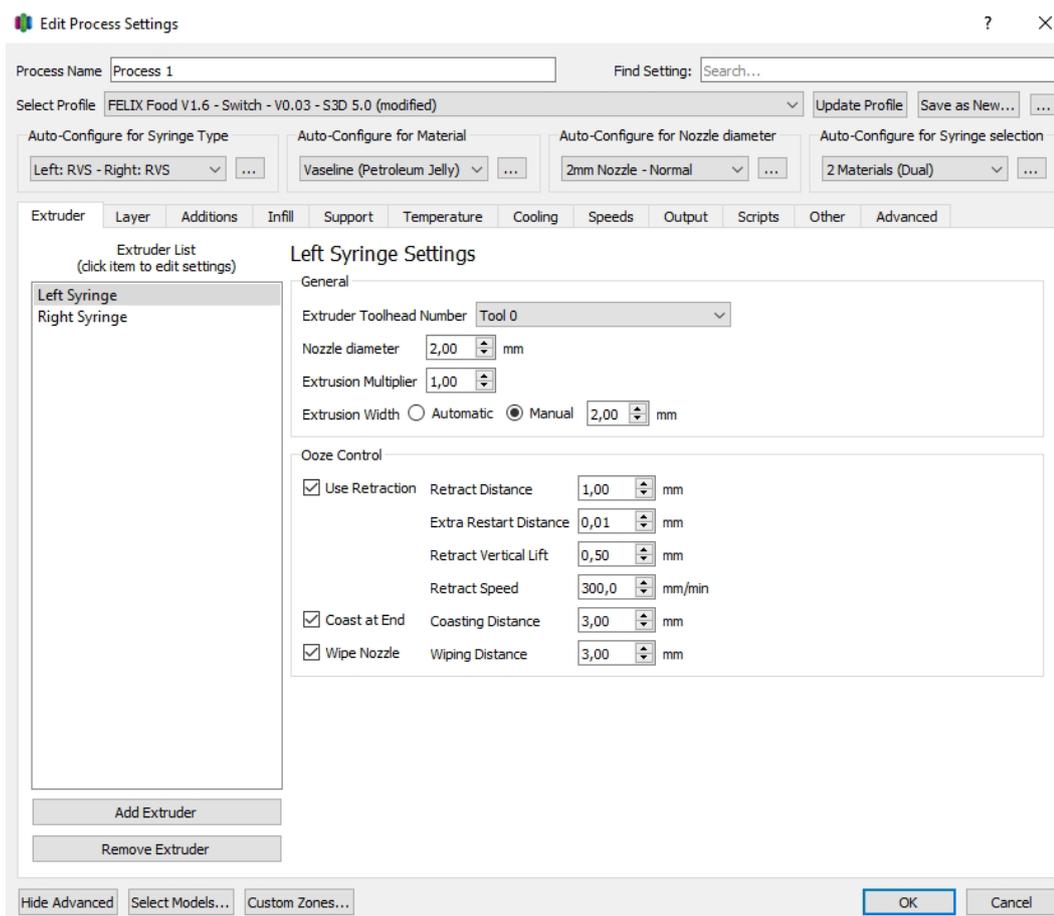


Рисунок 3.17 – Процесс настройки модели в Simplify3D к печати на 3D-принтере

Данная программа также позволяет обеспечивать процесс преобразования цифровых 3D-моделей в специализированные управляющие команды, выполняя слайсинг-нарезку модели на слои с последующей генерацией G-кода.

G-код представляет собой набор команд и инструкций, определяющих траекторию перемещения печатающих головок, температурные режимы, скорость экструзии, подогрев стола, работу вентилятора и другие критические параметры печати. В Simplify3D этот процесс настраивается с высокой степенью гибкости, позволяя адаптировать режимы печати под конкретные требования модели и используемого материала для пищевой печати.

Сгенерированный программой G-код включает ряд ключевых компонентов, включая координатные перемещения по осям X, Y и Z, задающие траекторию движения экструдера, скоростные показатели, термические параметры, экструзионные команды, скрипты, обеспечивающие калибровку принтера, прогрев компонентов и завершающие операции.

Simplify3D обеспечивает максимальный пользовательский контроль параметров печати с возможностью предварительного просмотра и управления различными настройками для отдельных областей модели. Это особенно важно при работе со сложными геометрическими фигурами, требующими адаптивных режимов экструзии (Рисунок 3.18).

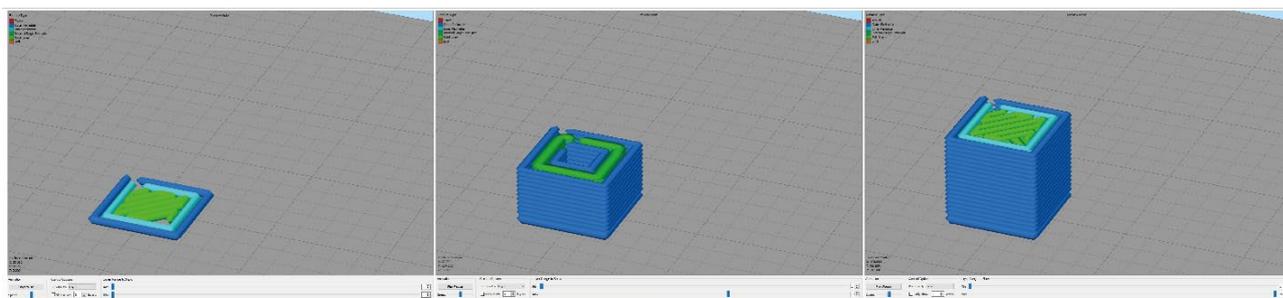


Рисунок 3.18 – Предварительный просмотр послойной печати изделия

В рамках оптимизации и совершенствования технологического процесса 3D-печати был проведен анализ с последующей корректировкой управляющего G-кода, отвечающего за работу второй печатающей головки. Изначально созданный алгоритм G-кода включал в себя послойное нанесение материала, однако после внесения изменений режим печати модели был изменен.

В результате внесенных корректировок в набор команд после 12 слоя из 19 вторая печатающая головка стала заполнять чернилами указанную область целиком в назначенное время, а не наносить его послойно как изначально было запрограммировано. Благодаря изменению G-кода напечатанное изделие приобрело большую устойчивость при сокращении времени печати.

Посредством внесения изменений в G-код был осуществлен переход правого экструдера от послойного заполнения пасты к сплошному, исключив простои и дублирование операций, оптимизировав расход материала, снизив энергопотребление оборудования, избежав перерасхода материала и деформации готового изделия.

Таким образом, полученный файл был сохранен на SD-карту и перенесен на 3D-принтер для дальнейшей печати (Рисунок 3.19).

```

G1 X63.200 Y104.000 E0.27777
G1 X60.200 Y104.000 F1800
G92 E0.00000
G1 E-1.00000 F300
G92 E0 ; Reset syringe
; process Process 2
; Pre Tool Change Script FELIX Food 1.6 - Switch - V0.01
; ===== Move buildplate down
G91 ; Relative positioning
G1 Z10 F5000 ; Move Z 10mm up
G90 ; Absolute positioning
M18 E ; Turn off the current extruder
T1 ; Select right syringe
G92 E0 ; Reset syringe
G1 X67 Y97 Z14 F6000 ; Move to purge position
G1 E2 F15 ; Purge syringe
G1 E-1.00000 F300
G92 E0 ; Reset syringe|
T0
; layer 13, Z = 14.0000
M106 S0 P0
; feature inner perimeter

```

Рисунок 3.19 – Измененный G-код после 12 слоя

3.4 Исследование зависимостей свойств 3D пищевых систем от их состава

Варьируя соотношение основных ингредиентов, 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 Таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Физико-химические показатели образцов с СЦМ

Номер образца	Массовая доля, %		
	Ж	Б	УВ
0	7,4±0,8	24,4±0,3	6,7±0,8
1	8,0±0,8	22,8±0,3	7,6±0,9
2	8,7±0,8	21,0±0,3	8,7±1,0
3	9,3±0,8	19,5±0,3	9,7±1,2
4	9,9±0,8	17,9±0,3	10,6±1,3
5	10,8±0,8	15,9±0,3	11,9±1,4

Таблица 3.2 – Физико-химические показатели образцов с СОМ

Номер образца	Массовая доля, %		
	Ж	Б	УВ
0	5,9±0,8	24,8±0,3	7,2±0,9
1	5,7±0,8	23,6±0,3	8,4±1,0
2	5,6±0,8	22,0±0,3	9,8±1,2
3	5,5±0,8	20,7±0,3	11,0±1,3
4	5,3±0,8	19,4±0,3	12,2±1,5
5	5,1±0,8	17,7±0,3	13,8±1,7

3D-печать на основе данных ПЧ не во всех случаях позволила получить продукты с удовлетворительным внешним видом. Использование отдельных образцов ПЧ приводило к деформации продукта различной степени выраженности, проявляющейся как в единичных артефактах слоёв, так и в практически полной утрате потребительских свойств (Рисунки 3.20 и 3.21). Под потребительскими свойствами в рамках настоящего исследования понимали сохранность геометрической формы.

Ввиду отсутствия внешних сил, оказывающих механическое воздействие на полученные продукты вне процесса печати, такого рода деформации были определены как спонтанные, возникающие в процессе формирования продукта вследствие особенностей сочетания упругих свойств ПЧ, выраженности когезии между слоями в продукте, скорости выдавливания ПЧ через отверстие насадки картриджа принтера и скорости перемещения модуля картриджей. Все указанные факторы, за исключением скорости перемещения модуля картриджей и, частично, скорости выдавливания ПЧ, суть производные от физико-химических свойств ПЧ.

Анализ экспериментально полученных вариативностей выраженности спонтанной деформации 3D-продукта в случае использования в составе как СЦМ, так и СОМ, позволил в первом приближении предположить, что ключевым элементом состава ПЧ, оказывающим доминантное влияние на спонтанную деформацию, является массовая доля белка.

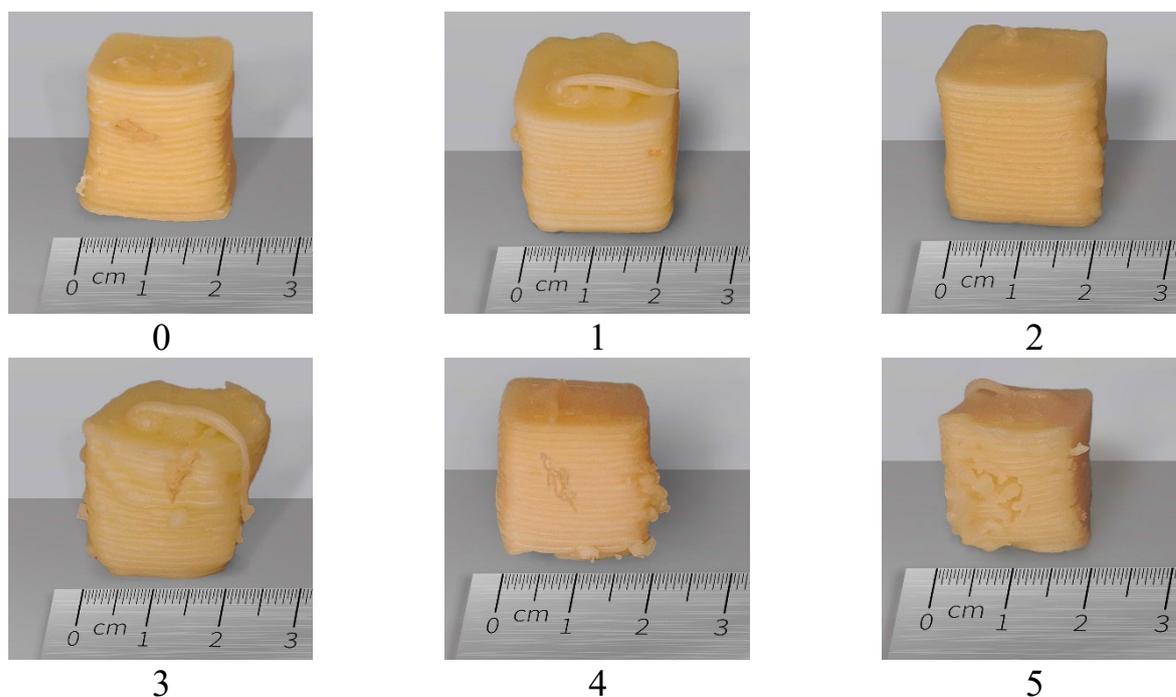


Рисунок 3.20 – Внешний вид образцов с СЦМ

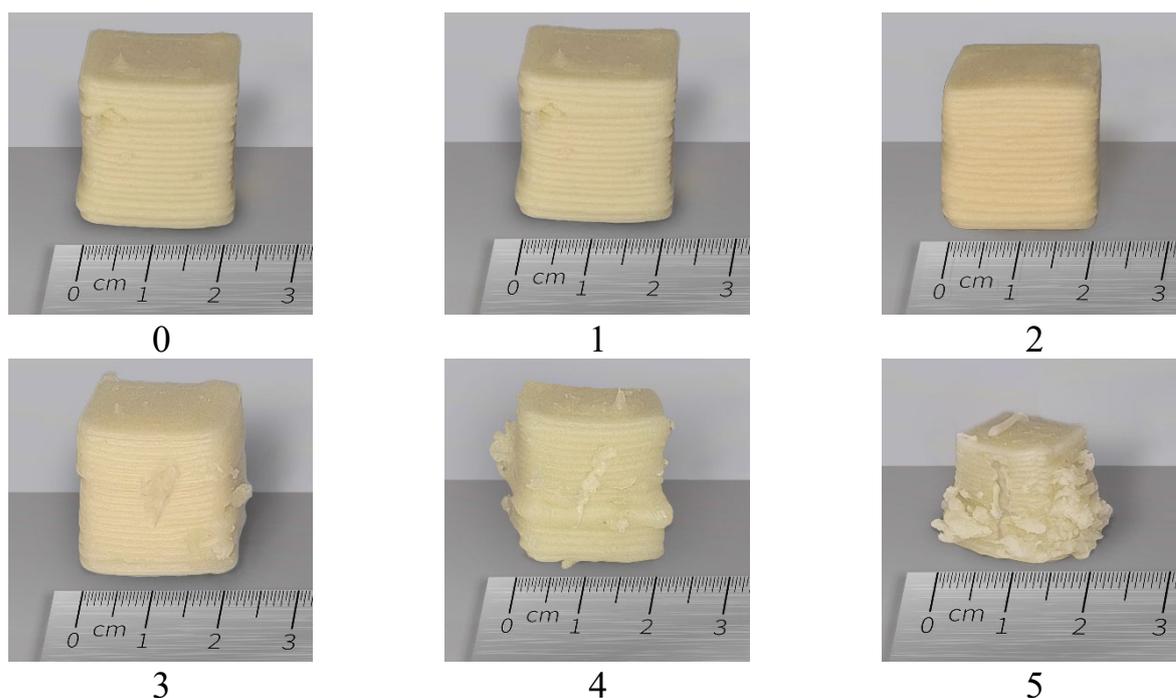


Рисунок 3.21 – Внешний вид образцов с СОМ

Для определения влияния состава пищевых чернил на сохранность геометрической формы 3D-продукта по каждому образцу и оценки текстуры нами в работе был введен термин - коэффициент спонтанной деформации ($K_{сд}$), выраженный в процентах, как доля слоёв, имеющих визуальные признаки

деформации, от их общего количества. Полученные результаты, округленные до целого значения, представлены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Коэффициент спонтанной деформации и количество поврежденных слоёв

Код образца	ПЧ с СОМ		ПЧ с СЦМ	
	количество деформированных слоёв, шт.	$K_{сд}$, %	количество деформированных слоёв, 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

В результате увеличения массовой доли сухого молока в составе ПЧ был отмечен нелинейный отклик системы в виде значений $K_{сд}$.

Была высказана гипотеза о превалирующей роли белка при формировании потребительских свойств продуктов 3D-печати пищевых систем на молочной основе. Из этого можно предположить, что существует некоторый интервал массовых долей белка в составе ПЧ, в пределах которого находятся в допустимом интервале.

Для установления границ этого интервала в пределах каждой совокупности образцов были определены математические описания взаимосвязи массовой доли белка и значений $K_{сд}$. Для ПЧ с СОМ математическое описание имело вид:

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

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 $K_{сд}$, %; ω_{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 3.4).

Таблица 3.4 – 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 3.22.

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 наличие оптимальных диапазонов массовой доли белка в ПЧ, в пределах которого $K_{сд}$ принимает минимальные значения, находит своё аналитическое подтверждение.

В силу высокой дискретизации экспериментальных данных, для определения рациональных диапазонов массовой доли белка в составе ПЧ, на наш взгляд целесообразным является использование функции желательности Харрингтона. Однако 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.

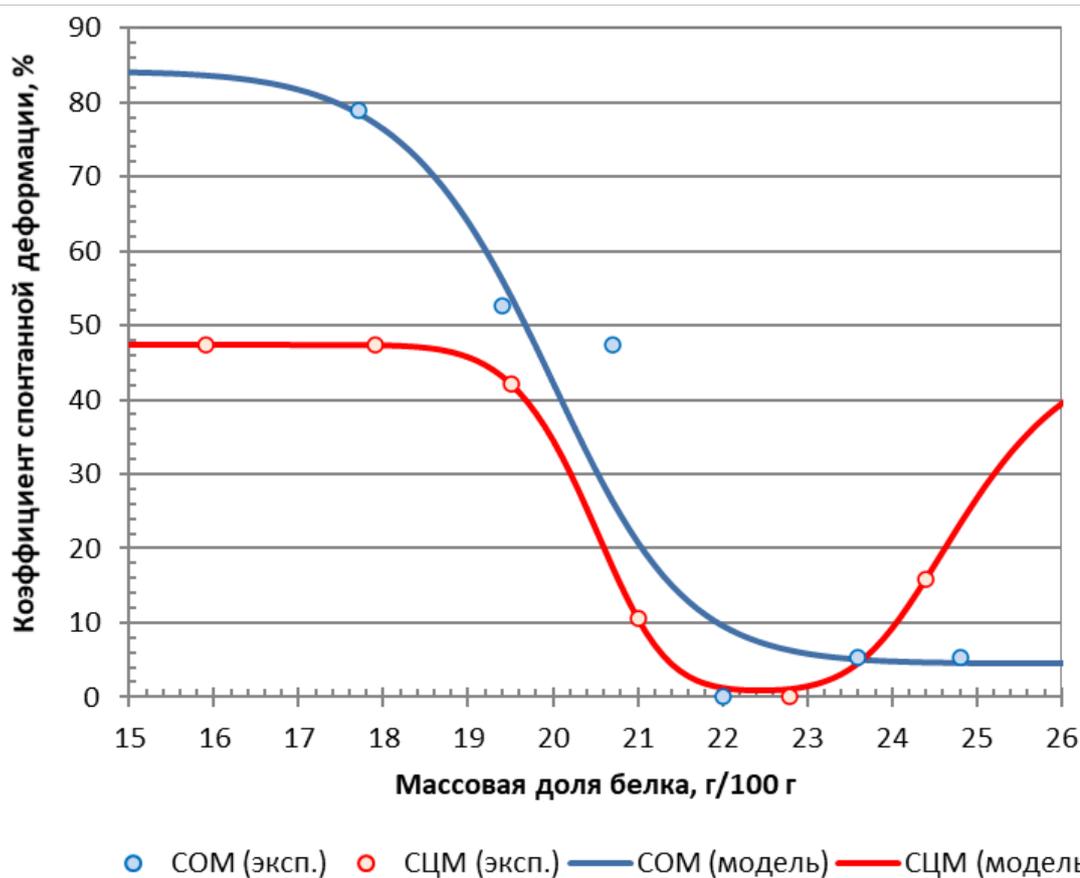


Рисунок 3.22 – Моделирование влияния массовой доли белка в ПЧ на $K_{сд}$

Односторонняя функция желательности имела канонический 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.

Двусторонняя функция желательности имела канонический вид:

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

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 референтные значения массовой доли белка в составе ПЧ, и уже на основании референт пар «массовая доля белка – значение желательности» были определены параметры функции желательности Харрингтона для вариантов СОМ и СЦМ.

Функции желательности, полученные в результате расчётов, выполненных в соответствии с описанным алгоритмом, представлены на Рисунке 3.23.

Принимая во внимание необходимость удовлетворения условиям минимизации $K_{сд}$ в случае оптимума, в качестве граничного условия принято значение желательности 0,6321; соответствующее границе зон «хорошо» и «удовлетворительно». В результате для варианта ПЧ с СОМ была получена одна критическая точка, соответствующая допустимому минимальному значению массовой доли белка, равному 22,56%. При этом для этого варианта ПЧ рациональными являются рецептуры с массовой долей белка, превышающей аналитически полученное значение. В случае с СЦМ имеет место несколько иная тенденция. В силу двусторонности функции желательности рациональное множество приемлемых значений массовой доле белка в рецептуре ПЧ данного варианта находится в интервале между двумя критическим 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%.

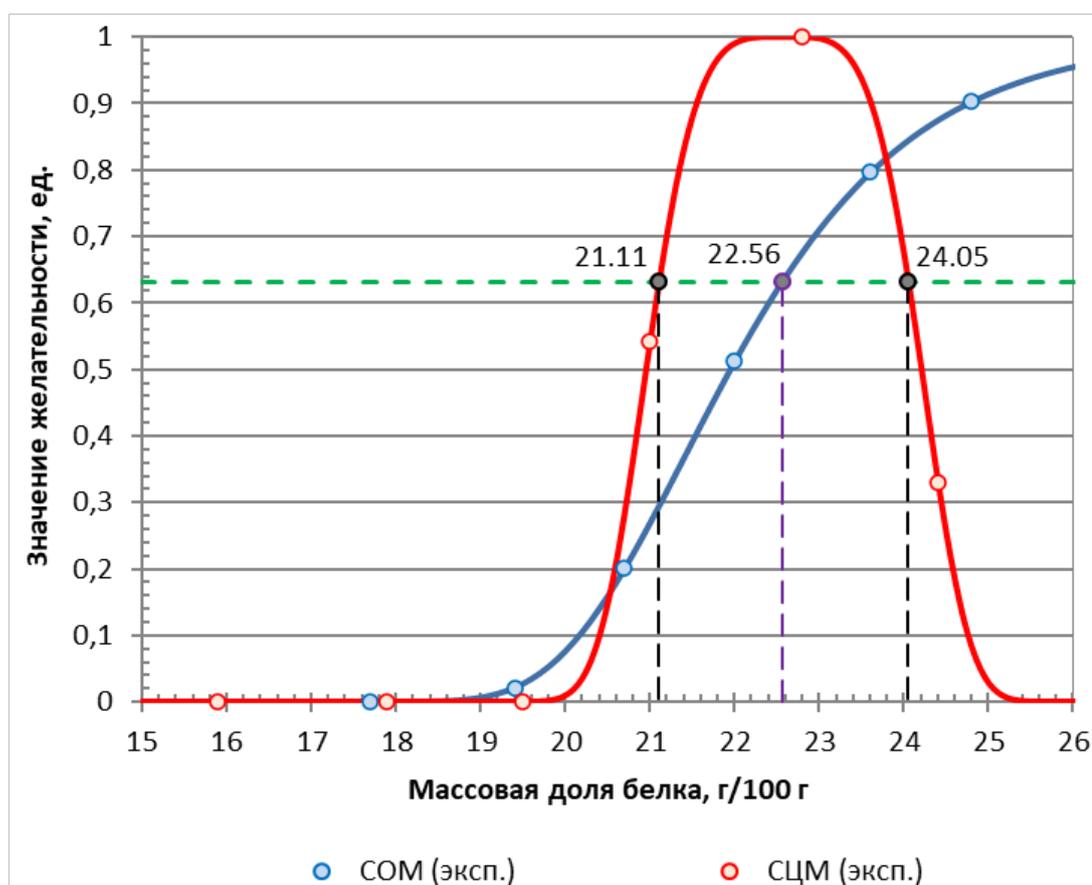


Рисунок 3.23 – Влияние массовой доли белка в «3D-чернилах» на значение желательности

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 заставляет предположить, что механизм вклада жировой составляющей весьма неоднозначен, и выяснение его требует проведения дополнительных исследований.

3.5 Органолептическая оценка образцов 3D пищевых систем

Помимо формирования структуры большое значение имеют органолептические показатели, в значительной степени определяющие потребительские свойства печатной формы. Балльная оценка органолептических показателей образцов представлена в Таблицах 3.5 и 3.6.

Учитывая специфику разрабатываемых продуктов, в работе был введен дополнительный органолептический дескриптор – цельность, определяемый отсутствием разрушенных слоев.

Профилограммы полученных образцов представлены на Рисунках 3.24 и 3.25.

Проведенный сенсорный анализ с использованием пятибалльной шкалы показал, что в целом более высокими баллами дегустаторы отметили образцы, в рецептуру которых входило СОМ.

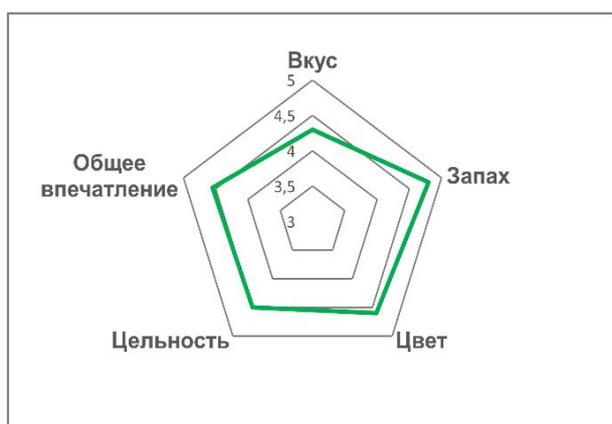
Таблица 3.5 – Балльная оценка органолептических показателей образцов с СОМ

Наименование показателя	Номер образца					
	0	1	2	3	4	5
Вкус	4,3	4,6	4,7	4,6	4,5	4,3
Запах	4,8	4,8	4,9	4,9	4,8	4,6
Цвет	4,6	4,7	4,9	4,8	4,8	4,7
Цельность	4,5	4,4	5	4,2	3,5	3
Общее впечатление	4,6	4,6	4,9	4,6	4,4	4,2

Таблица 3.6 – Балльная оценка органолептических показателей образцов с СЦМ

Наименование показателя	Номер образца					
	0	1	2	3	4	5
Вкус	4	4,2	4,3	4,2	4,1	4
Запах	4,6	4,6	4,7	4,7	4,5	4,5
Цвет	4,4	4,5	4,5	4,4	4,3	4,1
Цельность	4,1	4,1	4,8	4	3,4	3,1
Общее впечатление	4,3	4,4	4,6	4,3	4,1	3,9

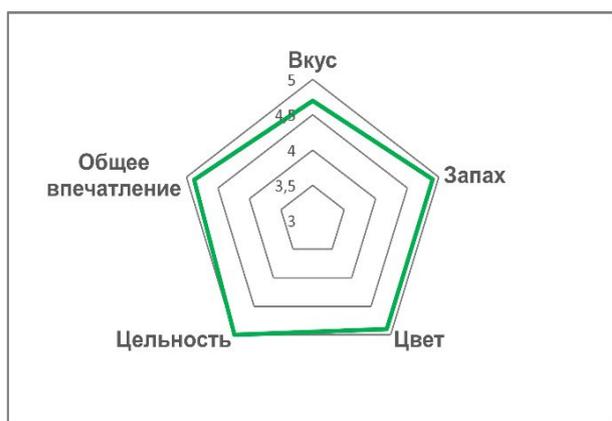
В значительной степени образцы СОМ отличались от образцов с СЦМ по вкусу и, соответственно, оценка за общее впечатление так же в ощутимо превышала оценку образцов СЦМ. В образцах СЦМ во вкусовых ощущениях была зафиксирована неприятная липкость и клейкость, обусловленная более высоким содержанием казеина. Что касается показателя цвета, то в образцах с СОМ дегустаторы поставили наивысшую оценку, а в образцах с СЦМ она была ниже.



Образец 0



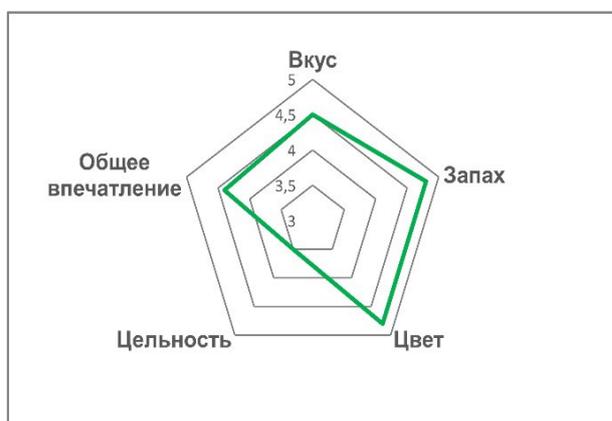
Образец 1



Образец 2



Образец 3



Образец 4



Образец 5

Рисунок 3.24 – Профилограммы полученных образцов с СОМ

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, и далее показатели снижались незначительно.

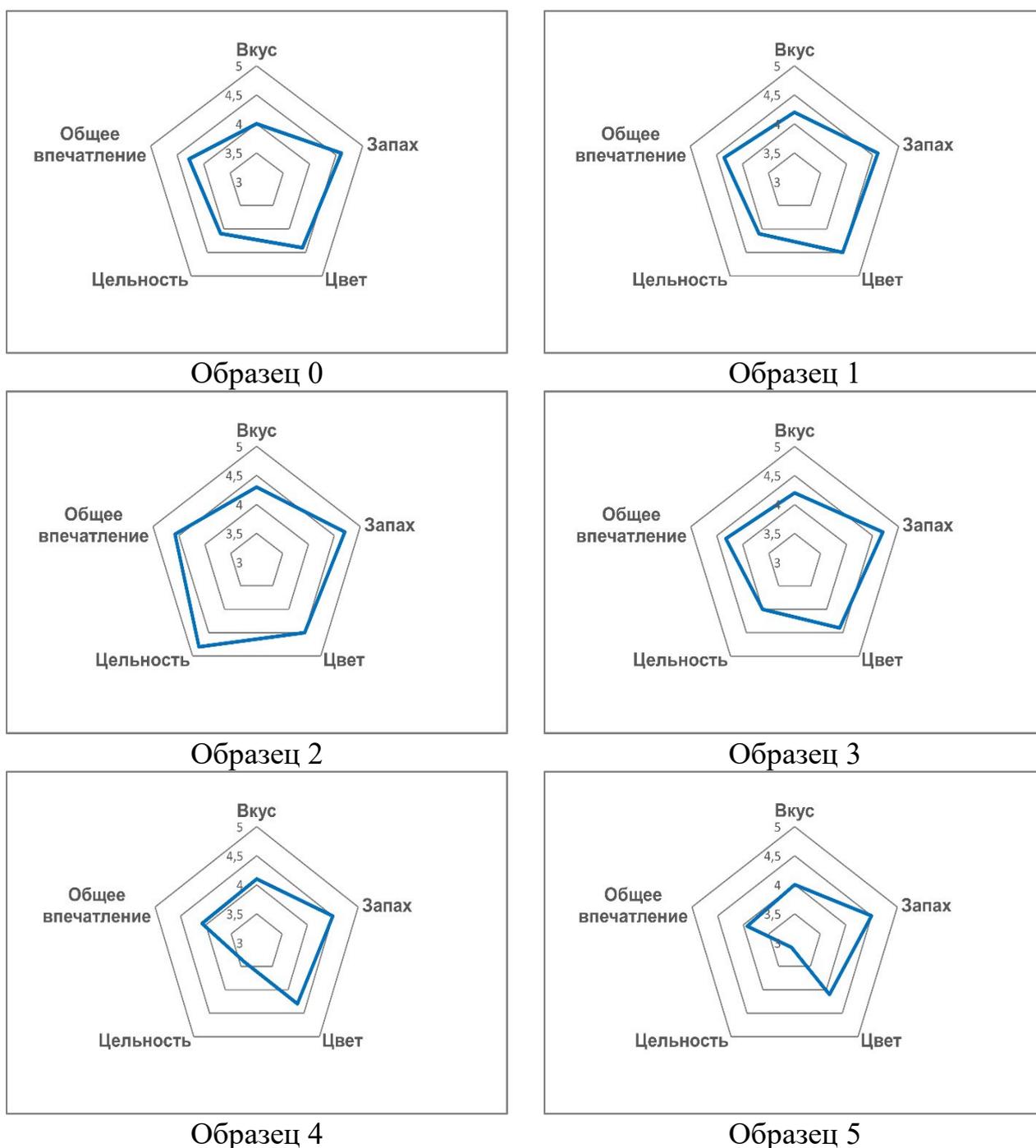


Рисунок 3.25 – Профилограммы полученных образцов с СЦМ

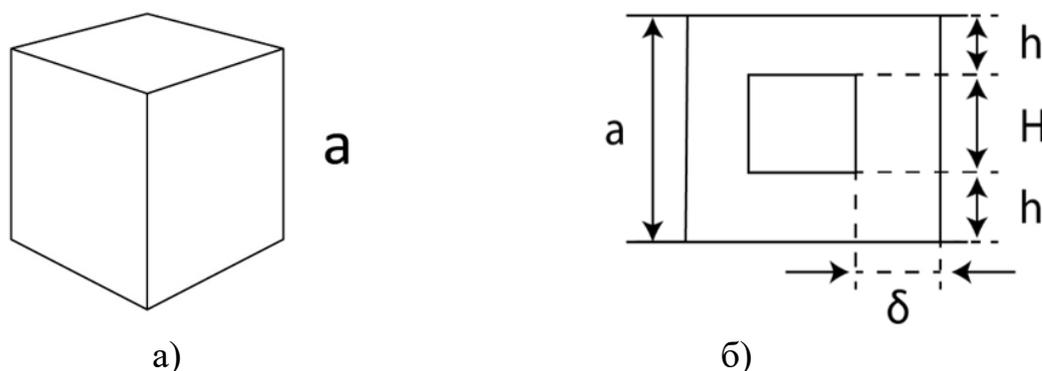
Данные органолептической оценки коррелируют с данными, изложенными в предыдущем разделе, поскольку величина коэффициента спонтанной деформации печатных форм также увеличивалась, начиная с третьего образца, в котором массовая доля белка в случае с СЦМ составила 19,5%, а в образце с СОМ – 20,7%. Из этого можно сделать вывод о том, что именно массовая доля белка является основным фактором, определяющим органолептические и прочностные характеристики 3D печатных форм.

3.6 Моделирование деформационной устойчивости 3D печатных форм

В рамках работы был произведен экспериментальный и теоретический 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.

Данное исследование основано на фундаментальных принципах механики деформируемого твердого тела, в частности, на теории упругости и теории пластичности [96].

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 3.26.



A - сторона кубика

h - толщина “крышки” (* $h = \delta$)

H - высота “стенок” (* $H = a - 2\delta$)

* - Кубическая симметричная система

Рисунок 3.26 – Вид предпечатной 3D формы: а) в натуральном виде, б) в разрезе

В качестве физической характеристики определена плотность материалов: ρ_1 - плотность материала стенок (непосредственно чернила); ρ_2 - плотность жидкости в полости (мёд).

Напряжение и деформация в кубике будут возникать вследствие воздействия внешних сил - сил гидростатического давления со стороны жидкости на стенки

полости и объемные силы тяжести (сила действует на каждый элементарный объем и пропорционально его массе).

При экспериментальном исследовании механических свойств материалов результат исследования обычно представляется в виде графиков зависимости напряжения от деформации.

Величины, которые будут задействованы при построении модели и формулы их расчета представлены ниже:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (5)$$

где σ – напряжение, Па; F – действующая сила, Н; S – площадь поперечного сечения, м²

Принципиально деформирование образца будет представлено в виде безразмерной величины (ε), рассчитанной как его удлинение относительно к первоначальному размеру (Формула 6):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (6)$$

где Δl - удлинение образца, мм; l_0 - первоначальный размер, мм.

Моделирование процесса растяжения(сдвига)

На графике Рисунка 3.27 представлена классическая диаграмма растяжения(сдвига), с помощью которой будет определяться предельное значение напряжения текучести. В основу моделирования процесса растяжения(сдвига) легла гипотеза о существовании единой диаграммы деформирования, не зависящей от типа напряженного состояния, которая была выдвинута Людвигом [97].

Для проверки существования единой диаграммы деформирования был проведен ряд экспериментальных исследований механических свойств материалов при испытаниях на простые и сложные нагружения, в ходе которых выявлялись связи касательного и нормального напряжения с угловой и линейной деформацией [98][99][100][101].

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что как при простой, так и при сложной нагрузке (в отсутствие массовых сил) диаграмма деформирования

не зависит от типа напряженного состояния, что соответствует положениям теории пластичности и ползучести Н.Н. Малинина [96].

При исследовании прочности на растяжение (сдвиг) экспериментальные данные можно интерпретировать в виде графика и выразить в виде величины σ_T , которую называют физическим пределом текучести материала.

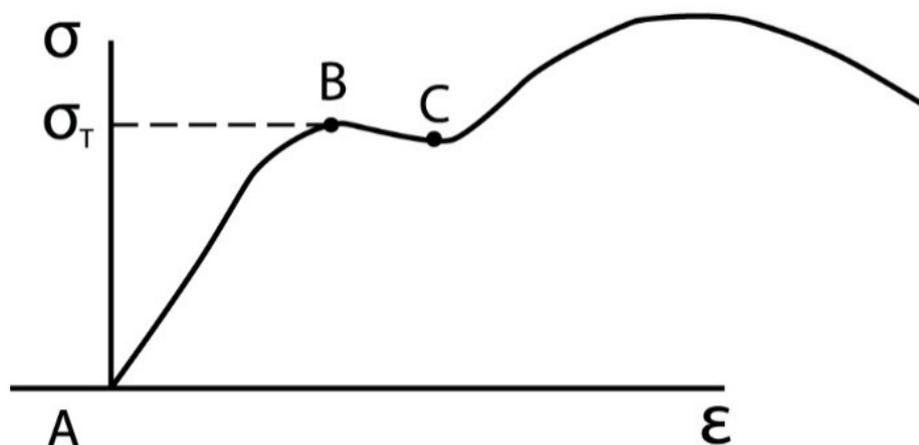


Рисунок 3.27 – Диаграмма растяжения (сдвига)

На участке АВ проиллюстрирован процесс упругой деформации, далее на участке ВС материал деформирует при постоянной силе, то есть происходит течение, или пластичная деформация, после точки С процесс продолжающейся текучести, не представляющий в данной работе практический интерес, так как в рамках нашей модели мы принимаем условие начала текучести, моментом нарушения устойчивости образца.

При исследовании прочности на сжатие материала экспериментальные данные сжатия также можно интерпретировать в виде графика и выразить в виде величины σ_T . Поскольку не во всех случаях пластичный материал можно довести до разрушения, он имеет тенденцию сплющиваться, и диаграмма выглядит несколько иначе (Рисунок 3.28), тем не менее экспериментальное значение предела текучести σ_T будет определено по принципу, как в случае сдвига (растяжения):

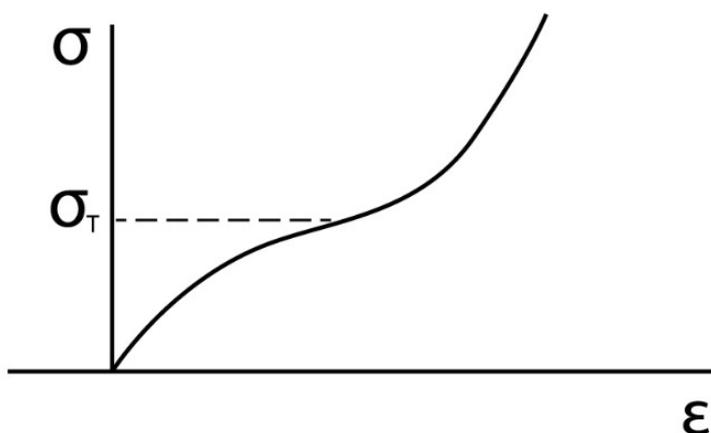


Рисунок 3.28 – Диаграмма сжатия

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

Аксиоматически принимаем некоторые допущения для построения модели, необходимые для нахождения наибольших значений напряжений, возникающих в исследуемом образце:

1) Напряжение в материале априори меньше значения предела текучести:

$$\sigma < \sigma_T, \quad (7)$$

2) Принимается, что упругие деформации, возникающие в материале, являются малыми $\varepsilon \ll 1$, и ими можно пренебречь, т. е. в расчетах будут использованы неизменные геометрические размеры кубика. Также принимается, что изгибающие моменты при воздействиях отсутствуют.

Таким образом будут рассчитаны возникающие напряжения из условия равновесия внутренних и внешних сил для любого объема, будет использован так называемый метод предельного равновесия.

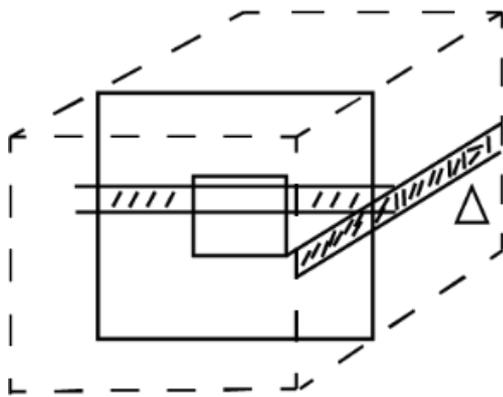
3) Принимается, что исследуемый материал является макроскопически однородным по всему объему.

4) Принимается, что напряжения, возникающие в материалах стенок, будут являться постоянными вдоль всей толщины стенок.

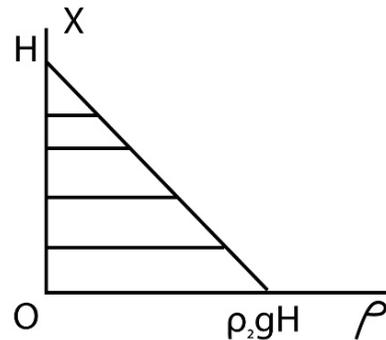
После принятия данных допущений можно переходить к непосредственной реализации расчетной модели.

Моделирование процесса растяжения (сдвига):

На начальном этапе моделирования был рассмотрен тонкий слой Δ в кубе в области действия поверхностных сил давления со стороны наполнителя. Со стороны жидкости на этот слой действует сила давления. Давление жидкости (гидростатическое) зависит от глубины (Рисунок 3.29).



а) Схематичное изображение рассматриваемого слоя.



б) Профиль действующих сил давления в зависимости от высоты расположения слоя.

Рисунок 3.29 – Рассматриваемый тонкий слой и профиль давления при моделировании процесса растяжения (сдвига)

Как известно, гидростатическое давление в жидкости рассчитывается по формуле:

$$p = \rho_2 g (H - x), \quad (8)$$

где ρ_2 – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; $(H - x)$ – глубина в жидкости; x – координата по вертикали, отсчитываемая от дна жидкости.

Сила давления на слой толщины Δ , если внутренняя ширина полости равна значению $(a - 2\delta)$ может быть рассчитана по Формуле 9:

$$F = \Delta(a - 2\delta)p, \quad (9)$$

где δ – толщина стенок; Δ – толщина слоя материала; $(a - 2\delta)$ – внутренняя ширина полости; p – гидростатическое давление в области слоя.

Заданный слой толщины Δ был выбран малым, тогда можно было считать, что возникающие внутри слоя силы действуют в плоскости слоя.

Для расчета возникающих напряжений в произвольных сечениях нашего слоя, необходимо было найти условия, когда эти напряжения будут наибольшими. Для этого провели из точек G и H симметричные линии относительно

горизонтальной линии, проходящей через центр O (Рисунок 3.30), и получили пересечения G' и H' с внешней стороны CD .

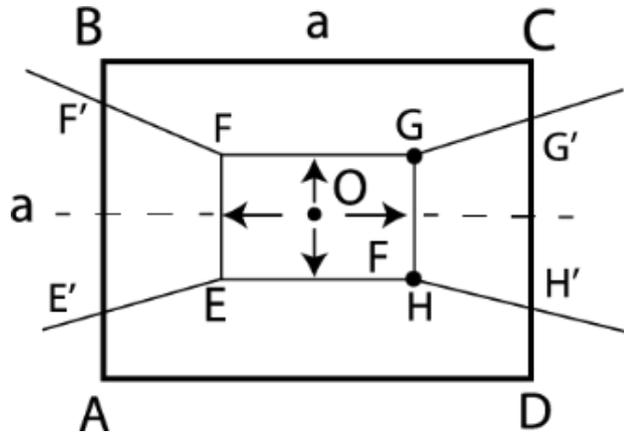


Рисунок 3.30 – Схема построения произвольных сечений в слое.

Для точек E и F был использован аналогичный принцип, в результате получили две пары симметричных элементов $GG'H'H$ и $EE'F'F$, а также $FF'BCG'G$ и $HH'DAE'E$, представляющих собой тела, взаимодействующие между собой силами в выделенных нами сечениях.

Далее для вычисления напряжений в этих сечениях необходимо было рассмотреть взаимодействие выделенных элементов нашего слоя.

В сечениях GG' и HH' возникают симметричные силы, показанные на Рисунках 3.31 и 3.32.

Возникающая пара сил, согласно 3 закона Ньютона, проиллюстрирована на Рисунке 3.32 ($\vec{P}_1 = -\vec{P}'_1$), причем $|\vec{P}_1| = |\vec{P}'_1|$.

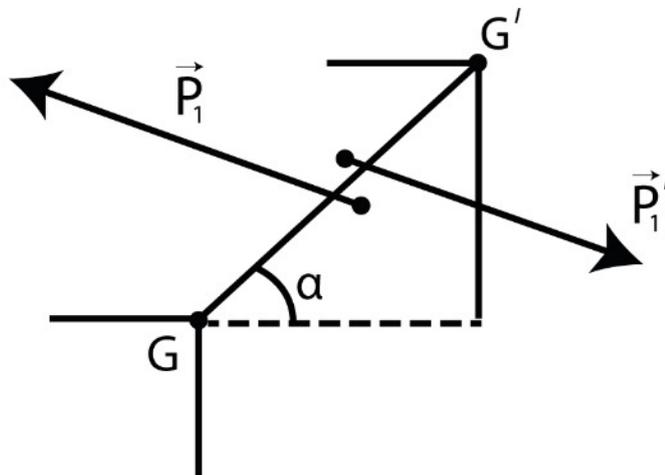


Рисунок 3.31 – Силы взаимодействия между парой элементов в сечении GG'

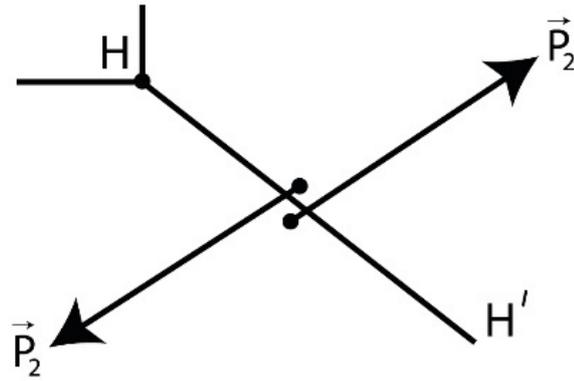


Рисунок 3.32 – Силы взаимодействия между парой элементов в сечении NN'

Для задания положения сечений GG' и NN' - введем угол α – наклона сечения к горизонтальной линии. По симметричному построению, очевидно, $\alpha \in [0, \frac{\pi}{4}]$. При $\alpha > \frac{\pi}{4}$ мы получим такую же картину, повернутую на 90° , поэтому достаточно рассмотреть $\alpha \in [0, \frac{\pi}{4}]$.

Для дальнейшего выделения нормальной и тангенциальной компоненты сил взаимодействия, по которым согласно формуле 5 будет вычислено нормальное и тангенциальное напряжение, был введен в сечениях вектор нормали \vec{n} (Рисунок 3.33).

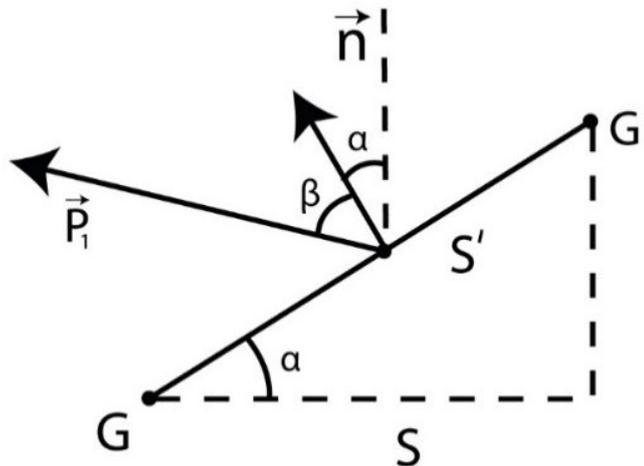


Рисунок 3.33 – Положение вектора нормали к сечению
 S' – площадь сечения слоя в направлении GG'
 S – площадь нормального сечения слоя

Далее был обозначен угол между $(\vec{n} \text{ и } \vec{P}) - \beta$. После чего по результатам, формулы 5 и введенных углов вычислим напряжение в сечении GG' , нормальное и тангенциальное. Эти напряжения соответствуют растяжению и сдвигу.

Учитывая, что геометрически площадь сечения слоя в направлении GG' является площадью нормального сечения слоя к косинусу угла наклона сечения к горизонтальной линии, формулы для определения напряжений имеют вид:

Нормальное:

$$\sigma_n = \frac{P_1 * \cos \beta}{S^1} = \frac{P_1 * \cos \beta * \cos \alpha}{S} \quad (10)$$

Тангенциальное

$$\sigma_t = \frac{P_1 * \sin \beta}{S^1} = \frac{P * \sin \beta * \cos \alpha}{S} \quad (11)$$

где P_1 – сила, действующая в сечении; S - площадь нормального сечения слоя; α - угол наклона сечения; β – угол между $(\vec{n} \text{ и } \vec{P})$.

Так как косинус на интервале углов от 0 до 180 градусов – убывающая функция, наибольшие значения σ_n и σ_t принимают в сечении с $\alpha = 0$ ($\cos \alpha = 1$).

Этому углу соответствуют сечения, изображенные на Рисунке 3.33.

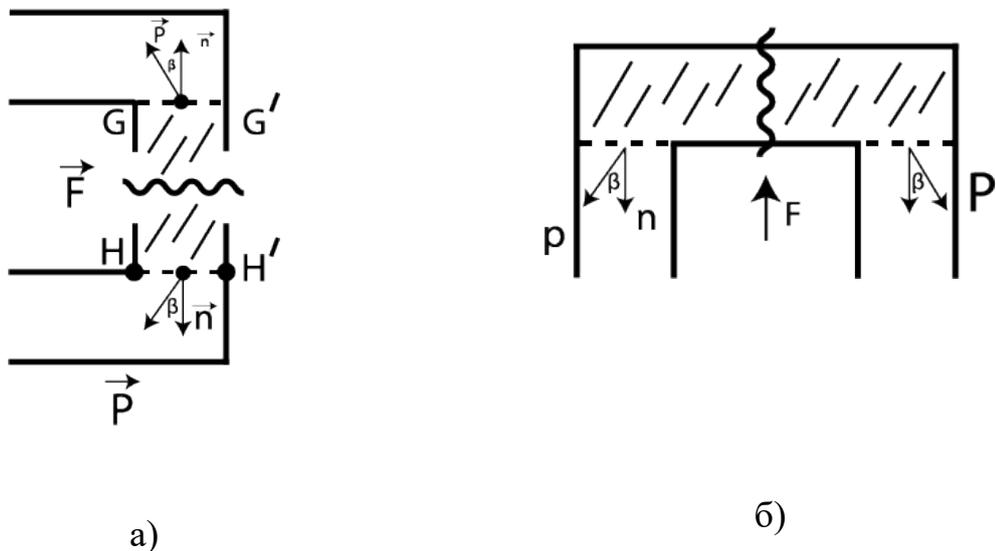


Рисунок 3.34 – Положение сечений с наибольшими действующими напряжениями: а) для вертикальных элементов, б) для горизонтальных элементов

Рассмотрим 2 элемента Рисунка 3.34, а) и б). На эти элементы со стороны наполнителя действует сила F , а со стороны соседних элементов действуют силы P . Так как все элементы остаются статичными, можно записать следующие равенства сил:

$$2P \cos \beta = F \quad (\text{из б})$$

$$2P \sin \beta = F \quad (\text{из а})$$

$$\operatorname{tg} \beta = 1 \rightarrow \beta = 45^\circ$$

Далее, исходя из условия статичности, был найден угол наклона силы P к вектору нормали, что позволило вычислить по формуле, обозначенной выше, значение силы P :

$$P = \frac{F}{\sqrt{2}}, \quad (12)$$

где F – сила со стороны наполнителя.

Ранее была получена зависимость $F = p \cdot S = p(a - 2\delta)\Delta$ (Формула 10). Используя формулы 10, 11, 12, и значения для углов β и α , учитывая, что мы ищем наибольшие напряжения, получим Формулу 13.

$$\sigma_n = \sigma_t = \sigma = \frac{p(a-2\delta)}{2\delta}, \quad (13)$$

где $(a-2\delta)$ – внутренняя ширина полости; p – давление.

Таким образом мы выяснили, что наибольшие напряжения растяжения и сдвига возникают в нормальном сечении (нулевой угол наклона), равны и рассчитываются по Формуле 13.

Согласно Формуле 8 давление p – будет принимать максимальное значение при $x = 0$, то есть

$$p = \rho_2 g H, \quad (14)$$

где ρ_2 – плотность наполнителя; g – ускорение свободного падения; H – высота стенок кубика.

Поэтому, подставляя максимальные значения напряжения растяжения и сдвига могут быть рассчитаны по Формуле 15.

$$\sigma = \frac{\rho_2 g H (a - 2\delta)}{2\delta}, \quad (15)$$

где ρ_2 – плотность наполнителя; g – ускорение свободного падения; H – высота стенок кубика; a – размер ребра кубика; δ – толщина стенок кубика.

В силу кубической симметрии задачи (центрированный кубик в кубике), можно заметить:

$$H = a - 2\delta, \quad (16)$$

где $(a - 2\delta)$ – внутренняя ширина полости.

Тогда формулу 15 можно переписать в следующем виде:

$$\sigma = \frac{\rho_2 g (a - 2\delta)^2}{2\delta}, \quad (17)$$

где ρ_2 – плотность наполнителя; $(a - 2\delta)$ – внутренняя ширина полости.

Для того, чтобы получить итоговое уравнение зависимости наибольшего напряжения сдвига (растяжения) от характеристик наполнителя и геометрических размеров образца, был введен параметр толщины стенок $\gamma = \frac{\delta}{a}$ (при очевидном условии $\gamma < \frac{1}{2}$)

$$\sigma = \frac{\rho_2 g a (1 - 2\gamma)^2}{2\gamma}, \quad (18)$$

где ρ_2 – плотность наполнителя; g – ускорение свободного падения; γ – гамма – введенный параметр толщины стенок.

Моделирование процесса сжатия

Одним из нежелательных явлений, а именно возникновение неустойчивости в стенках кубика, может являться действие объемных сил тяжести на сжатие. Так как площадь сечения в области стенок меньше площади сечения в области ‘дна’ кубика $S_1 < S_2$ (Рисунок 3.35), то напряжение сжатия будет обратно пропорционально площади сечения (Формула 19).

$$\sigma = \frac{P}{S}, \quad (19)$$

где P – вес материала над площадью сечения; S – площадь сечения.

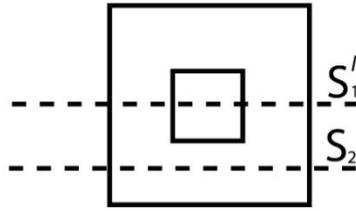


Рисунок 3.35 – Схема прохождения горизонтальных сечений в кубике

Кроме того, напряжение прямо пропорционально весу, действующему в сечении, поэтому наибольшее напряжение сжатия возникает в области, где площадь будет наименьшей, а вес материала над площадью сечения большим, это будет верно для сечения, проходящего вдоль дна полости – S' (Рисунок 3.36).

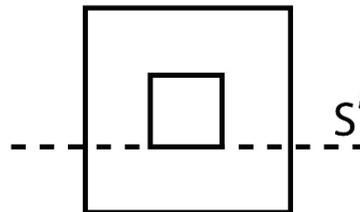


Рисунок 3.36 – Положение сечения наибольшего напряжения

Площадь сечения может быть рассчитана согласно Формуле 20.

$$S' = a^2 - (a - 2\delta)^2 = a^2 - a^2 + 4a\delta - 4\delta^2 \Rightarrow$$

$$S' = 4(a\delta - \delta^2), \quad (20)$$

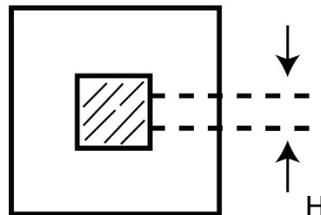


Рисунок 3.37 – Наглядное отображение определения высоты полости кубика

Используя, как и при моделировании сдвига (растяжения) по Формуле 16 можем определить высоту полости (Рисунок 3.37).

В сечении действует сила, определяемая весом находящегося выше материала кубика. Это крышка (P_1) и стенки (P_2), вес которых может быть рассчитан по Формулам 21 и 22, соответственно.

$$P_1 = \rho_1 g V_1 = \rho_1 a^2 h g, \quad (21)$$

$$P_2 = \rho_1 g V_2 = \rho_1 \cdot 4(a\delta - \delta^2) \cdot Hg, \quad (22)$$

Складывая величины весов, определенные Формулам 20 и 21, получили формулу расчета общего веса, действующего в сечении кубика:

$$P = \rho_1 a^2 h g + 4\rho_1 (a\delta - \delta^2) g H, \quad (23)$$

Используя Формулы 19 – 22, была получена формула расчета напряжения сжатия:

$$\sigma = \frac{\rho_1 a^2 h + 4\rho_1 (a\delta - \delta^2) H}{4(a\delta - \delta^2)} g, \quad (24)$$

Ранее мы ввели параметр $\gamma = \frac{\delta}{a}$ для удобства расчетов, также используя выражение для высоты полости.

В итоге получаем уравнение зависимости напряжения сжатия от физических параметров материала и геометрических размеров объекта, которое позволит вычислить наибольшее значение напряжения сжатия:

$$\sigma = \rho_1 g a \left[1 - 2\gamma + \frac{1}{4(1-\gamma)} \right], \quad (25)$$

где ρ_2 – плотность наполнителя; g – ускорение свободного падения; γ – гамма – введенный параметр толщины стенок.

3.7 Исследование взаимосвязи механических характеристик от состава образцов 3D печатных систем

На первом этапе, согласно изложенной выше методике, были исследованы прочностные характеристики шести 3D печатных систем. В качестве основы для интерпретации наблюдаемых результатов использовалась теория упругопластических деформаций, которая описывает поведение материала нашего кубического образца как в области упругой (обратимой) деформации, так и в области пластических (необратимых) изменений.

Получены экспериментальные данные, диаграммы для каждого вида опыта, связывающие силы с деформациями образцов. На этих диаграммах выделены

характерные участки отвечающие области упругих деформаций, за которыми начинаются области пластических деформаций. Точка перехода определена как предел текучести, используемая далее, как предельная характеристика прочности образцов согласно теоретической модели (Рисунки 3.38 – 3.55).

В процессе проведения эксперимента было выявлено, что кубический образец сохраняет свою первоначальную геометрическую форму и демонстрирует состояние статической стабильности до тех пор, пока уровень приложенных напряжений не станет превышать определенного критического порога.

Его значение соответствует пределу упругости материала, при котором все возникающие деформации являются линейно связанными с приложенными напряжениями через тензор модулей упругости и полностью обратимыми при снятии нагрузки. В этой области деформаций материал действует в рамках линейной теории упругости, а конструкция сохраняет целостность и устойчивость.

Исследование 3D печатных систем на сдвиг

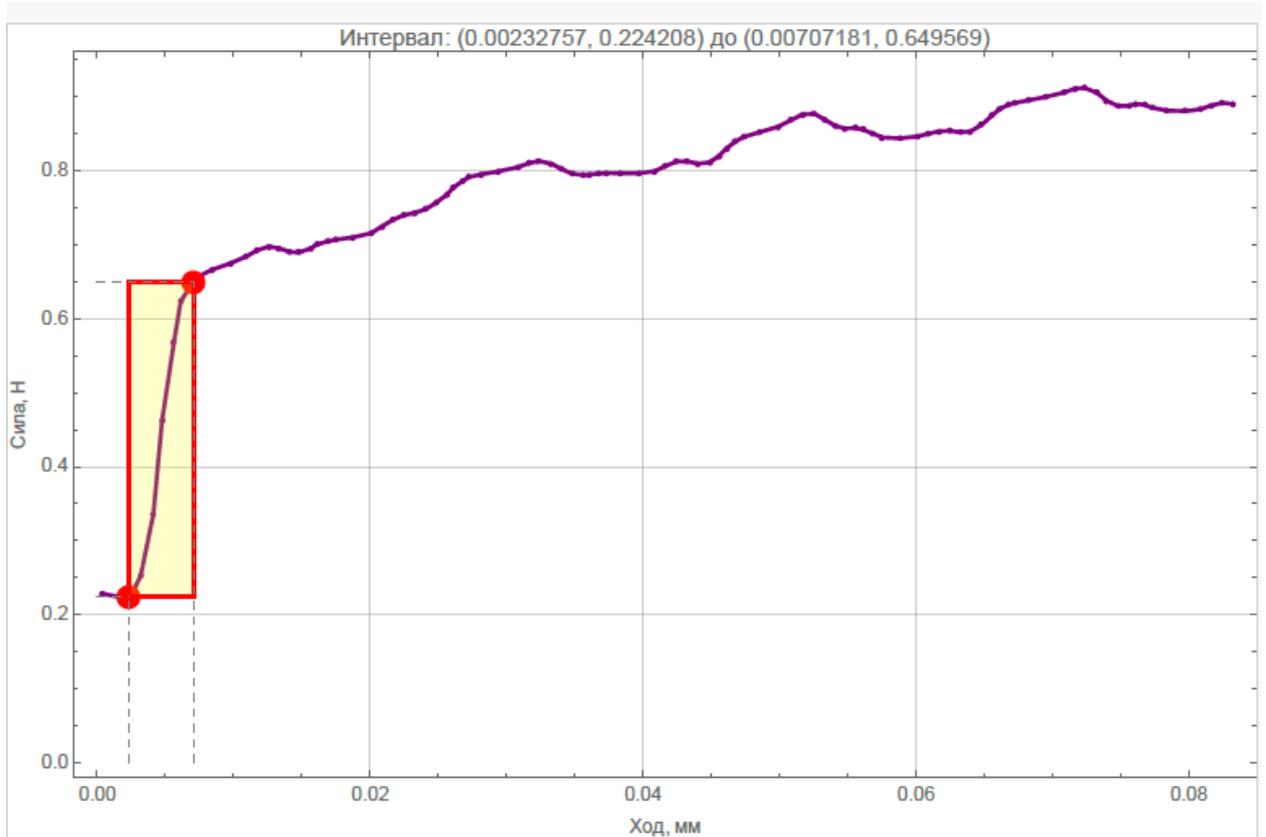


Рисунок 3.38 – Диаграмма сдвига образца 0

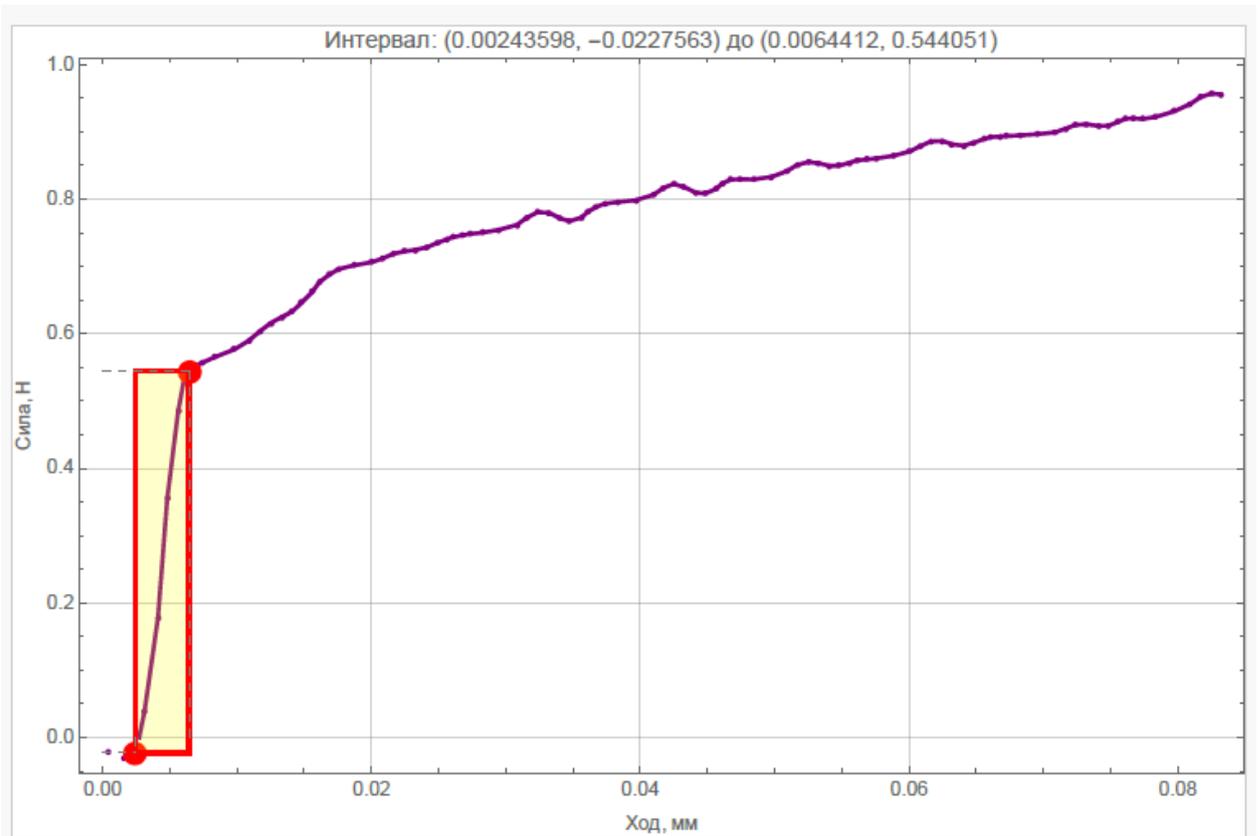


Рисунок 3.39 – Диаграмма сдвига образца 1

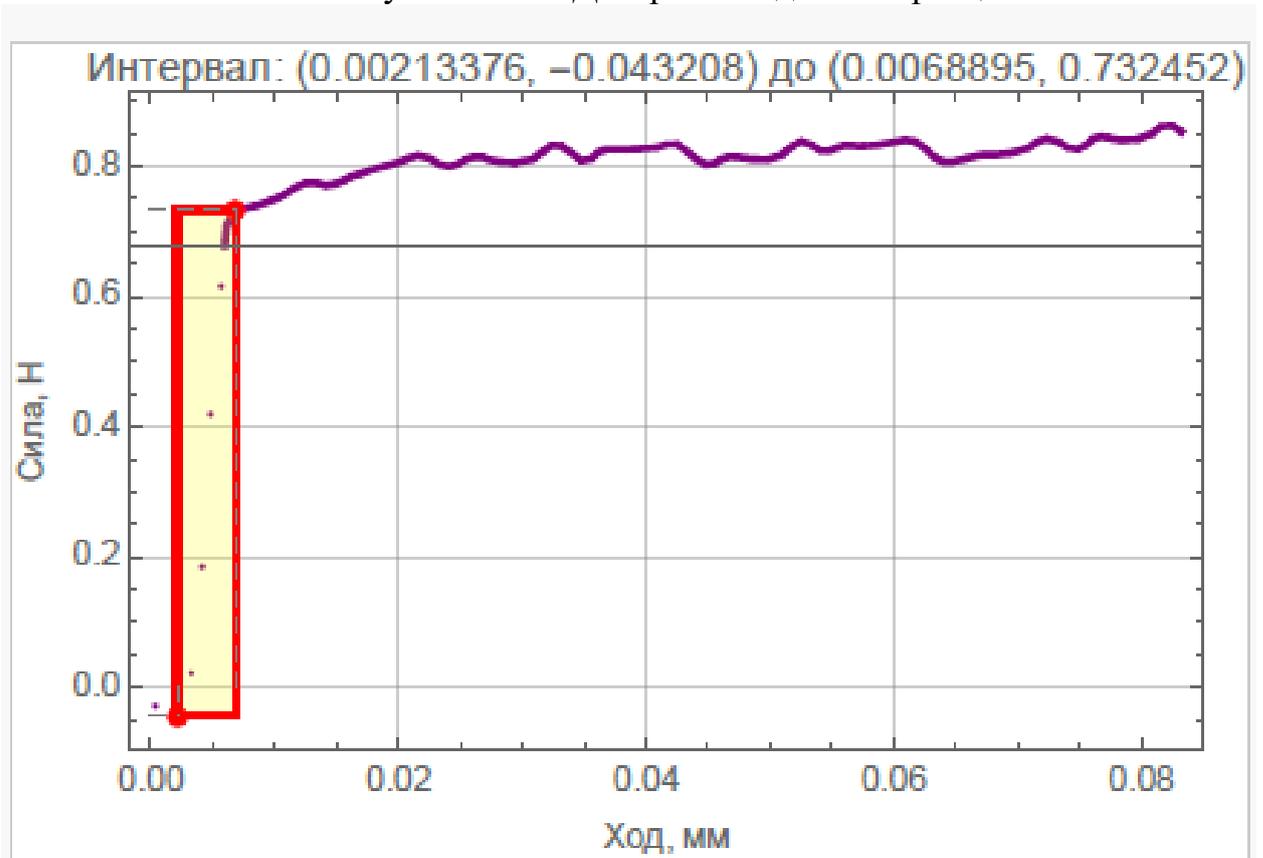


Рисунок 3.40 – Диаграмма сдвига образца 2

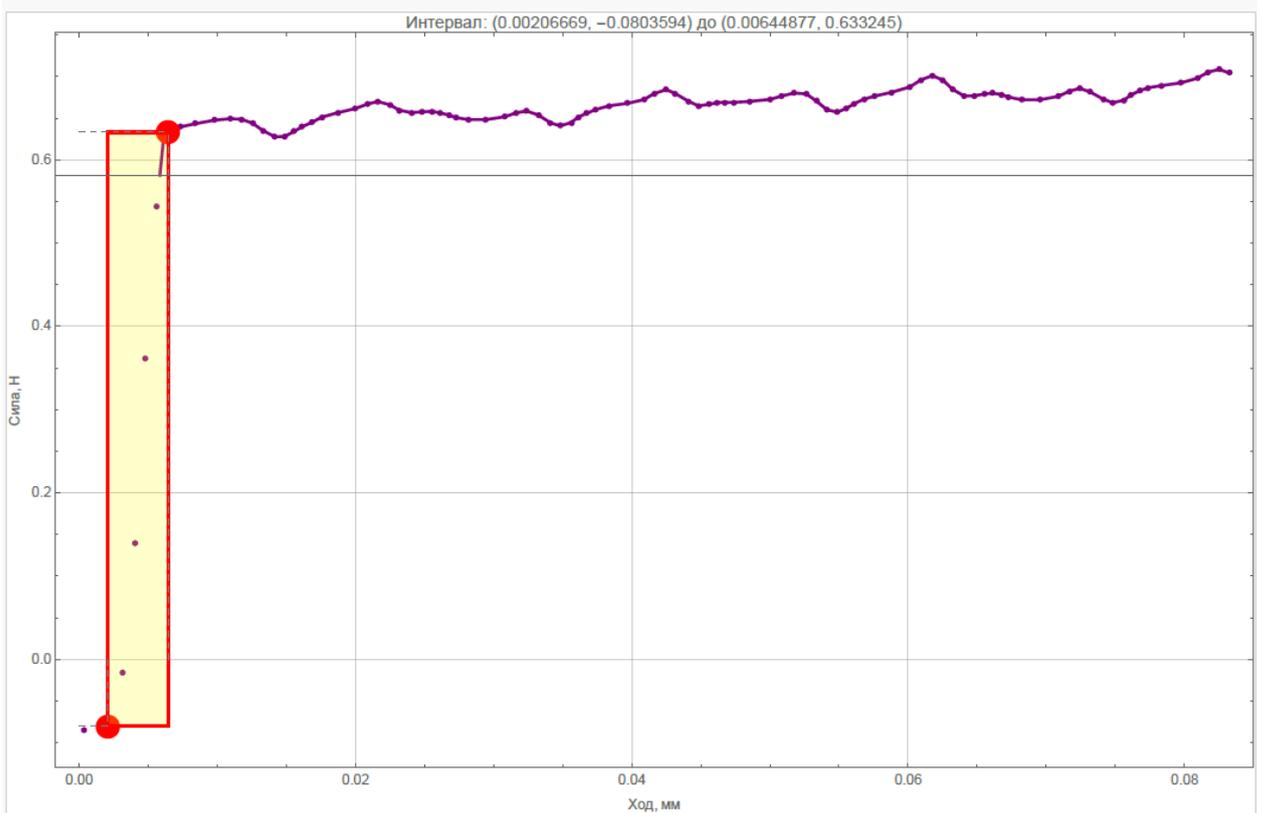


Рисунок 3.41 – Диаграмма сдвига образца 3

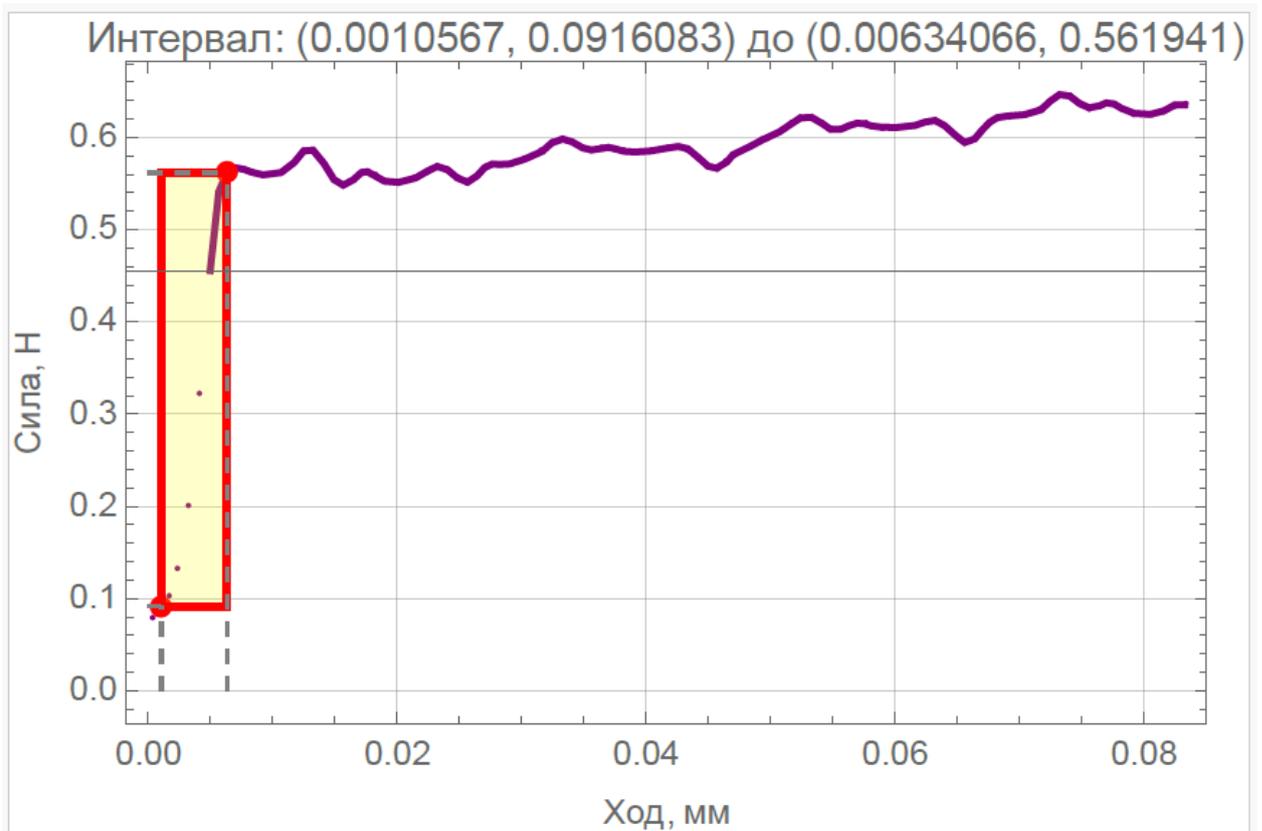


Рисунок 3.42 – Диаграмма сдвига образца 4

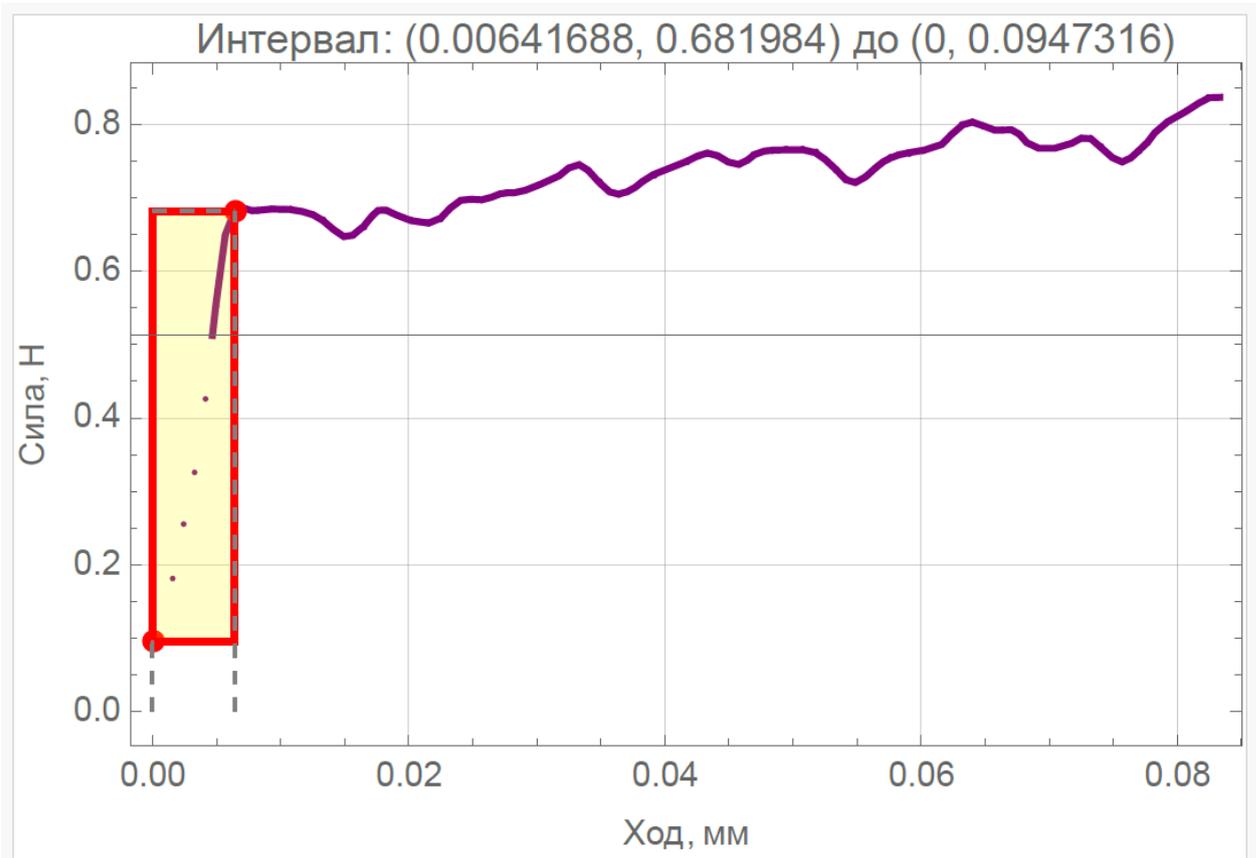


Рисунок 3.43 – Диаграмма сдвига образца 5

Исследование 3D печатных систем на сжатие

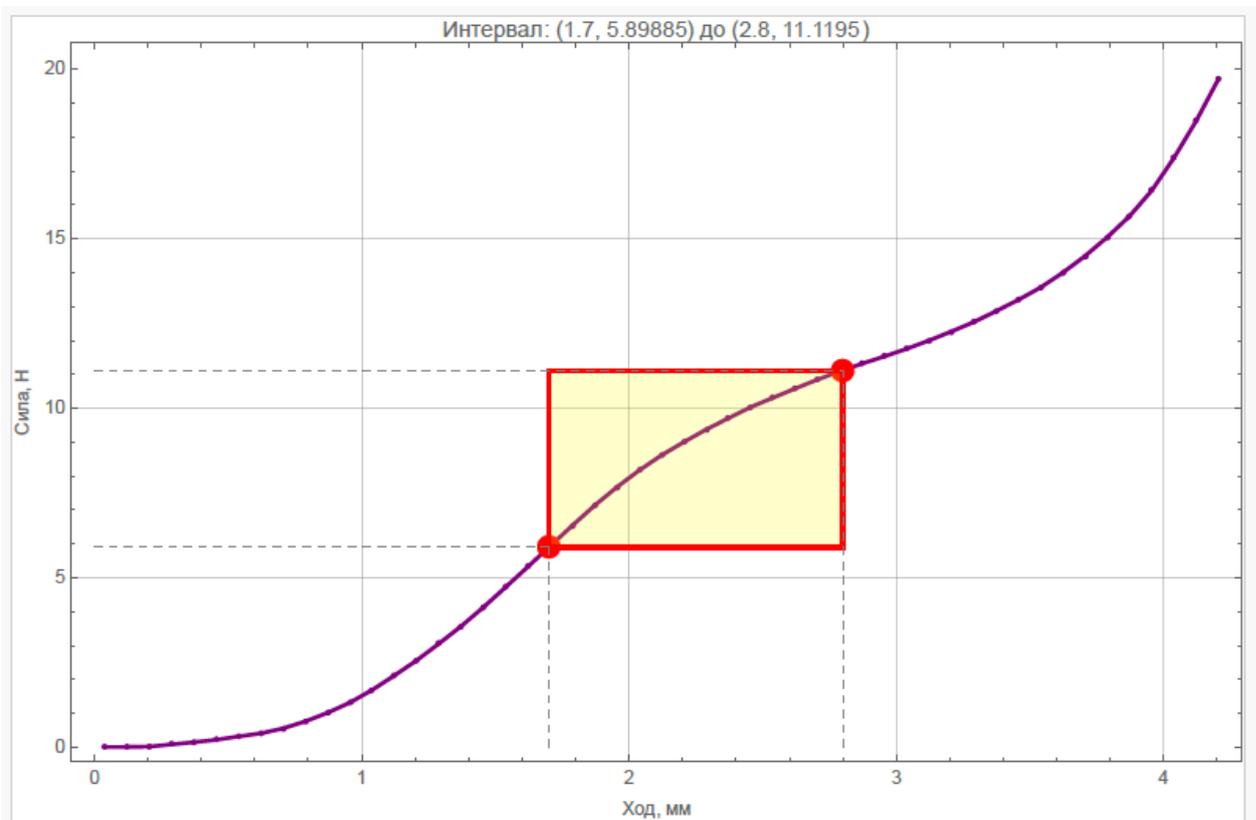


Рисунок 3.44 – Диаграмма сжатия образца 0

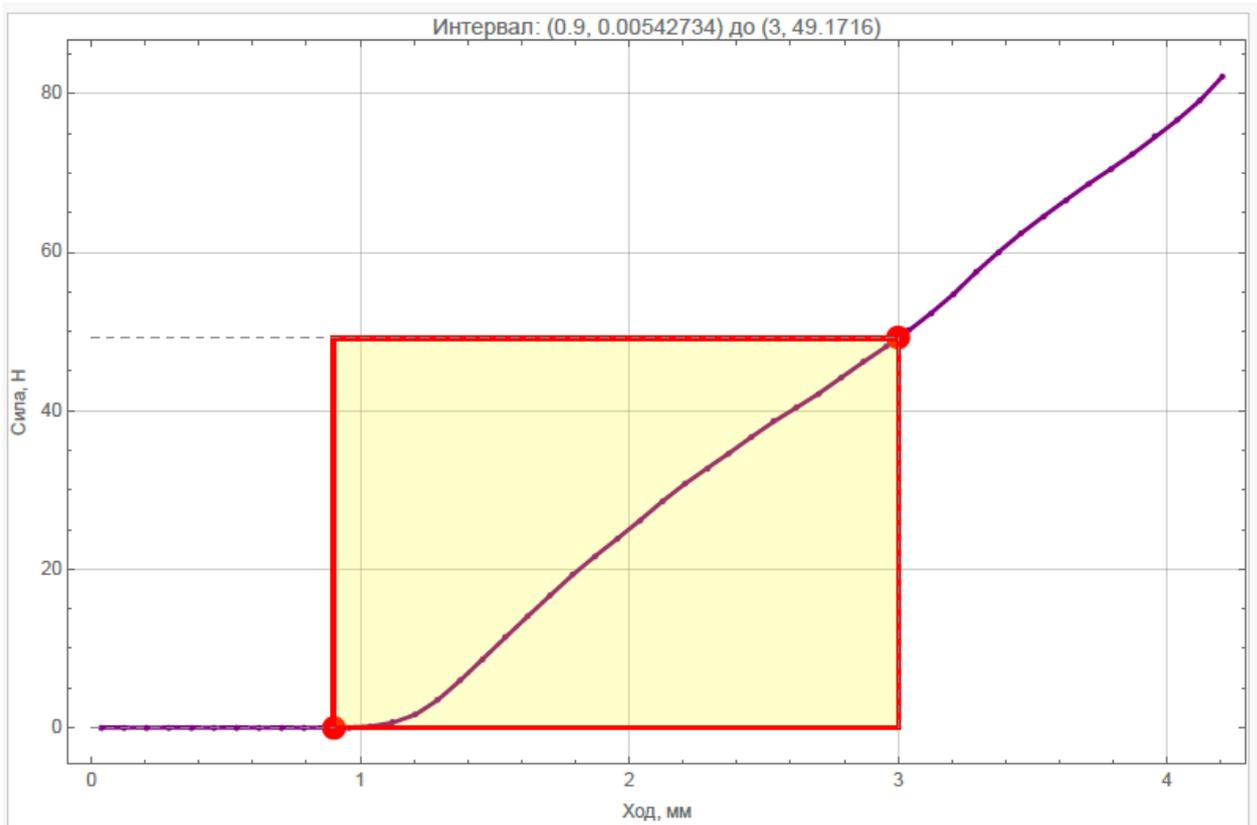


Рисунок 3.45 – Диаграмма сжатия образца 1

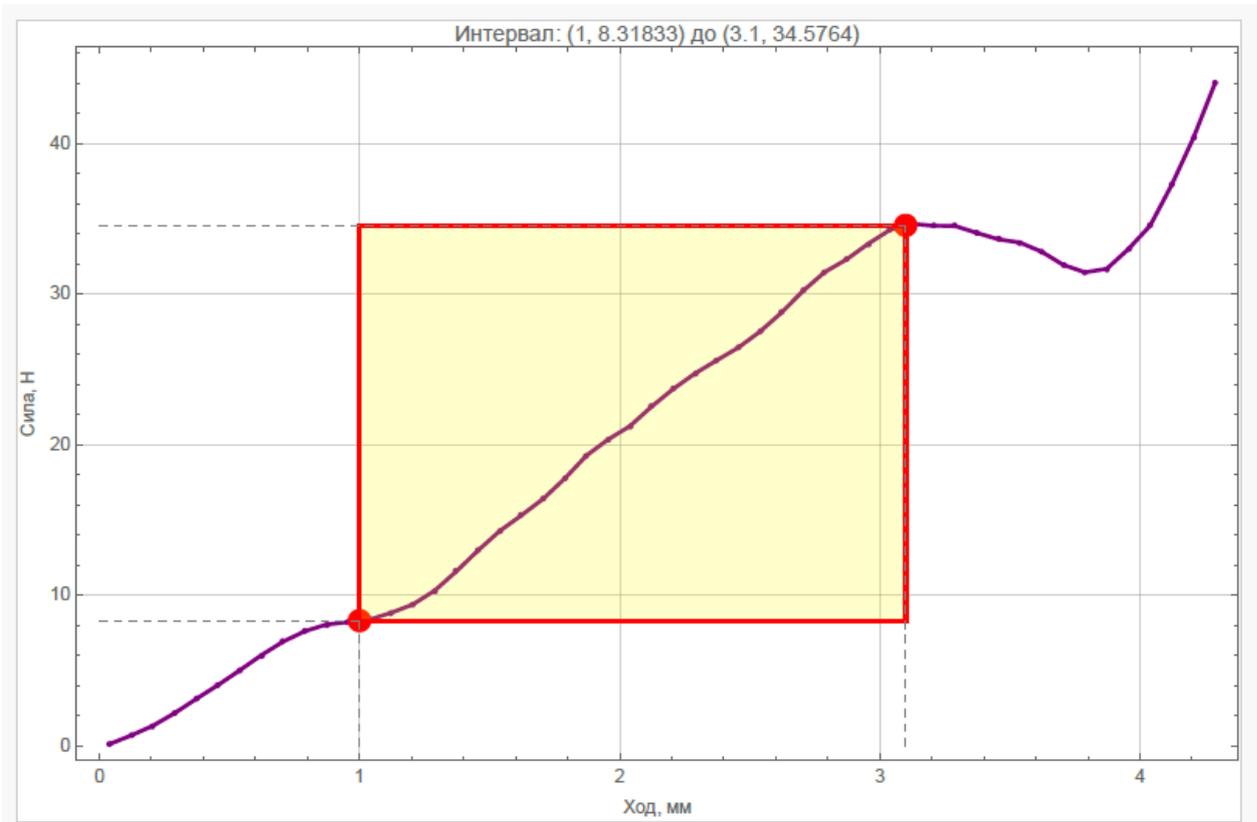


Рисунок 3.46 – Диаграмма сжатия образца 2

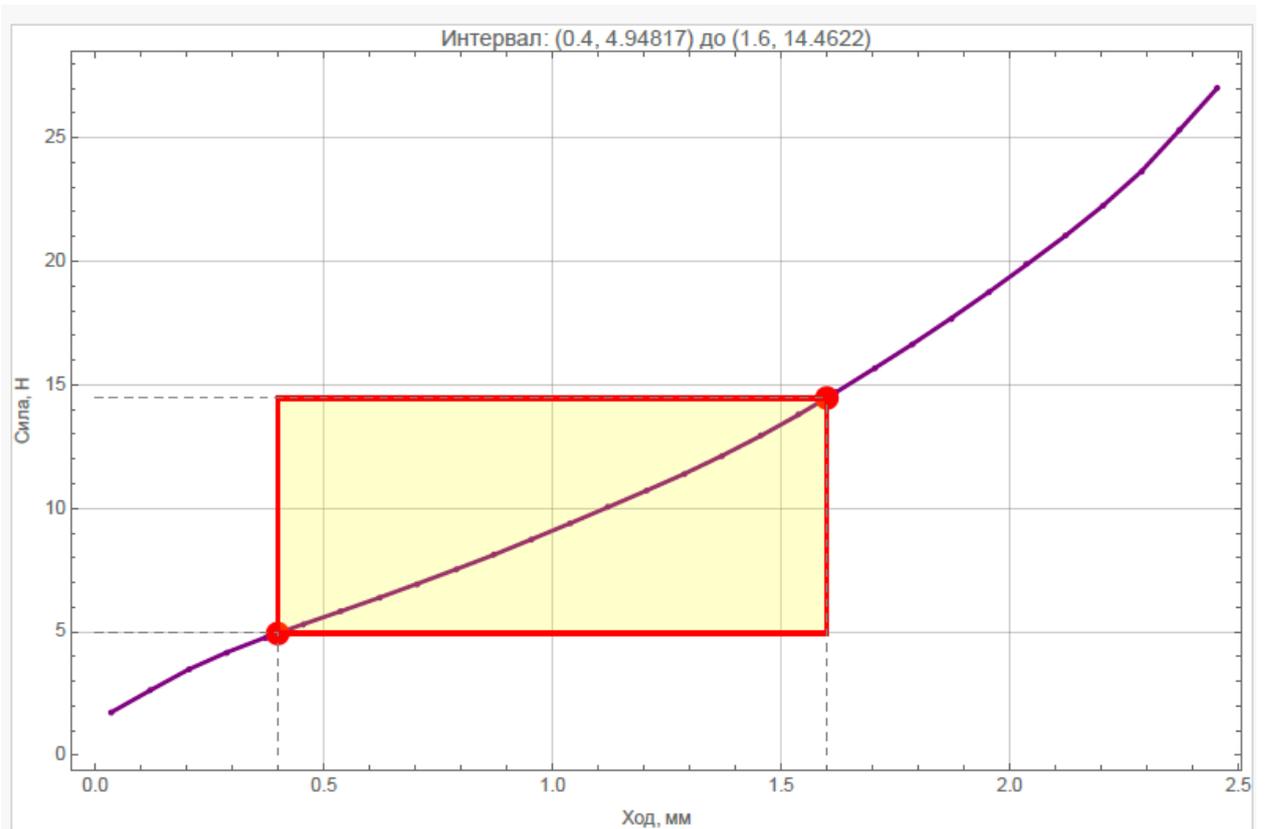


Рисунок 3.47 – Диаграмма сжатия образца 3

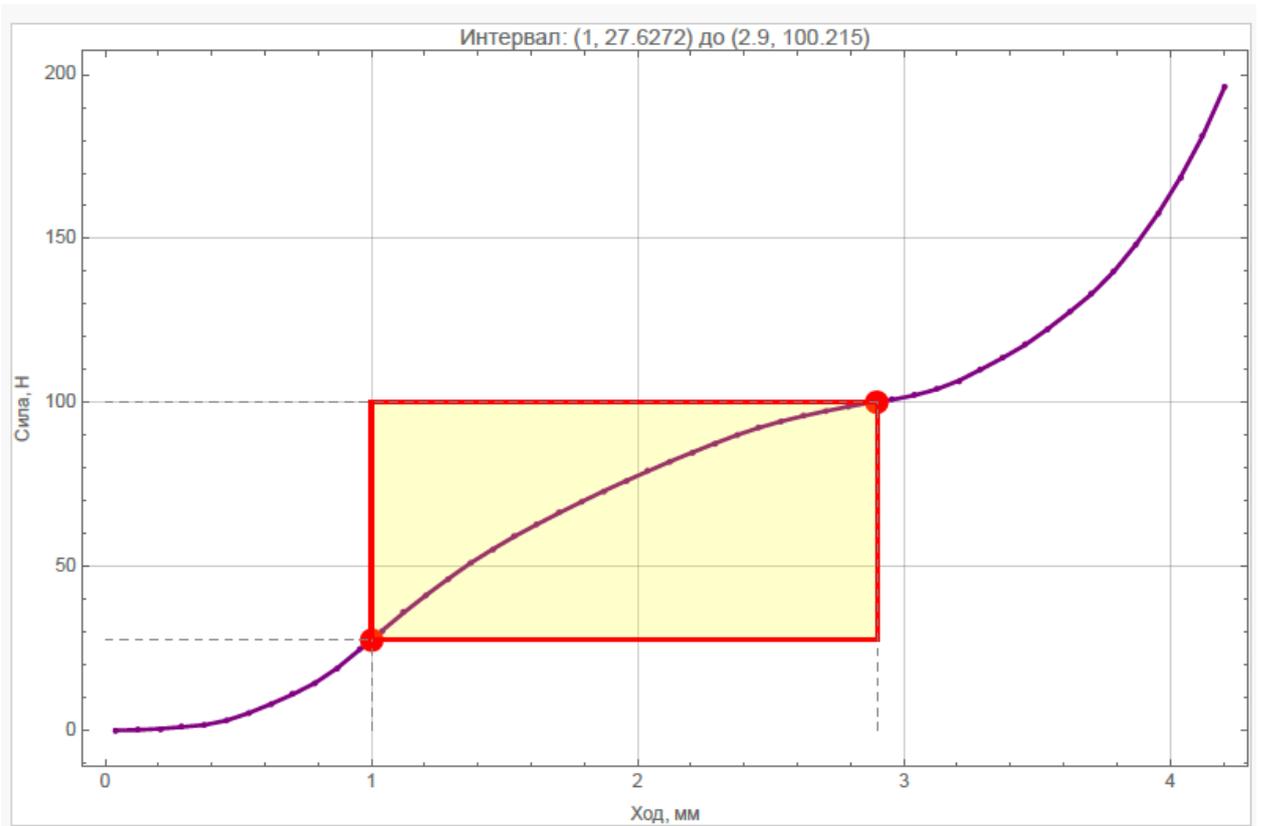


Рисунок 3.48 – Диаграмма сжатия образца 4

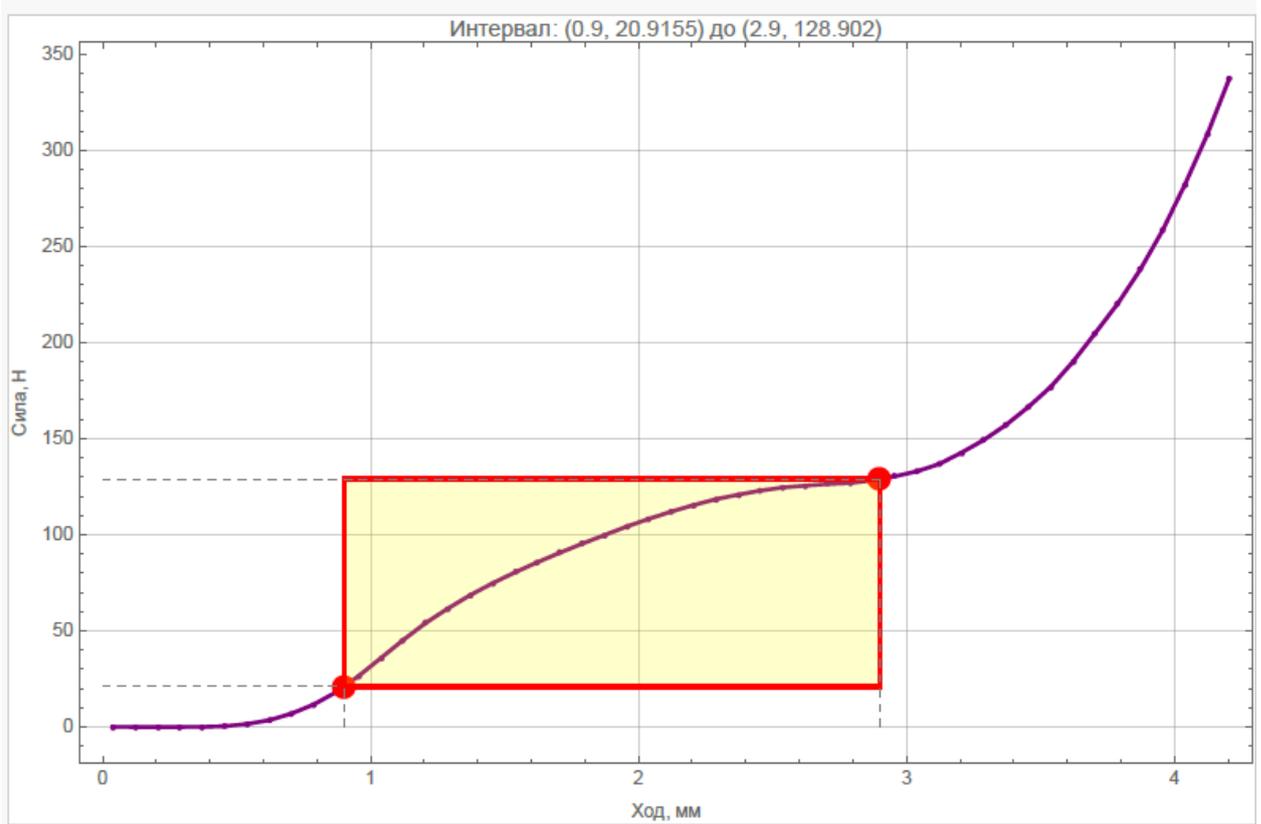


Рисунок 3.49 – Диаграмма сжатия образца 5

Исследование 3D печатных систем на растяжение

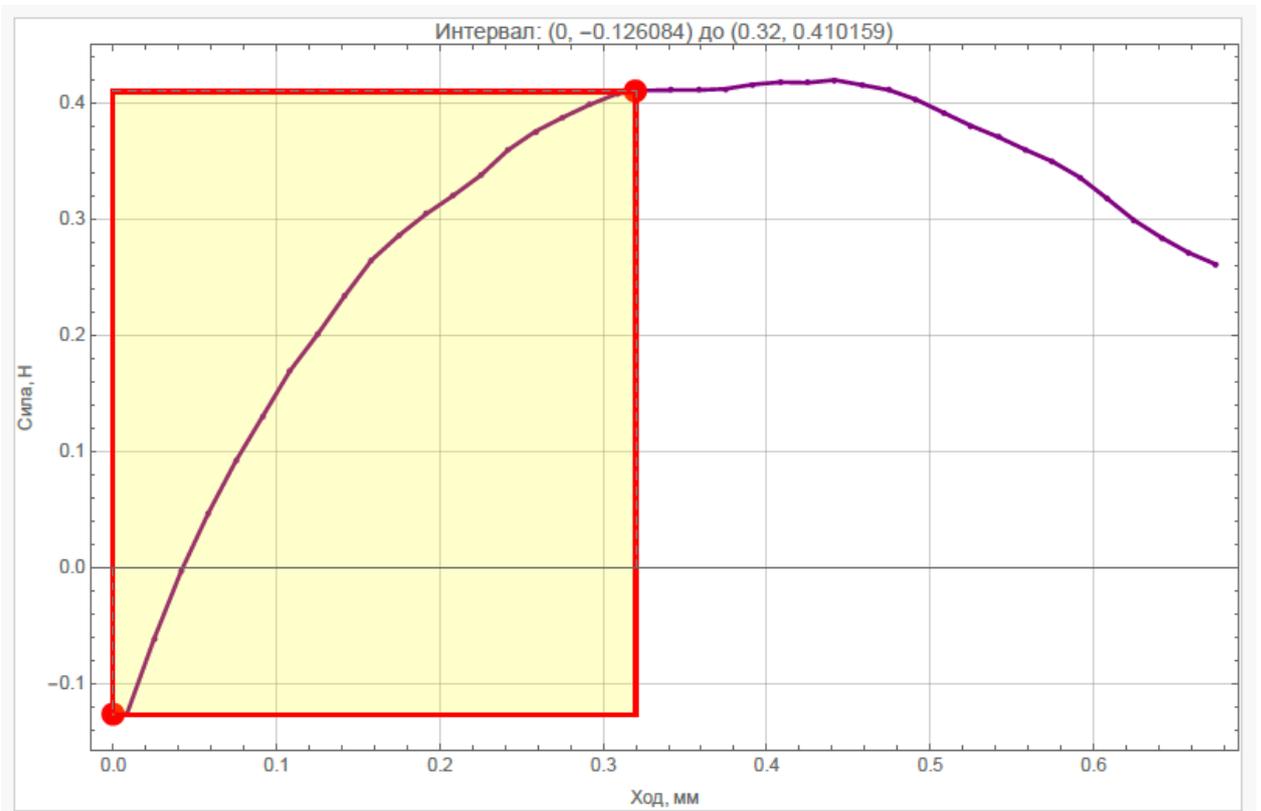


Рисунок 3.50 – Диаграмма растяжения образца 0

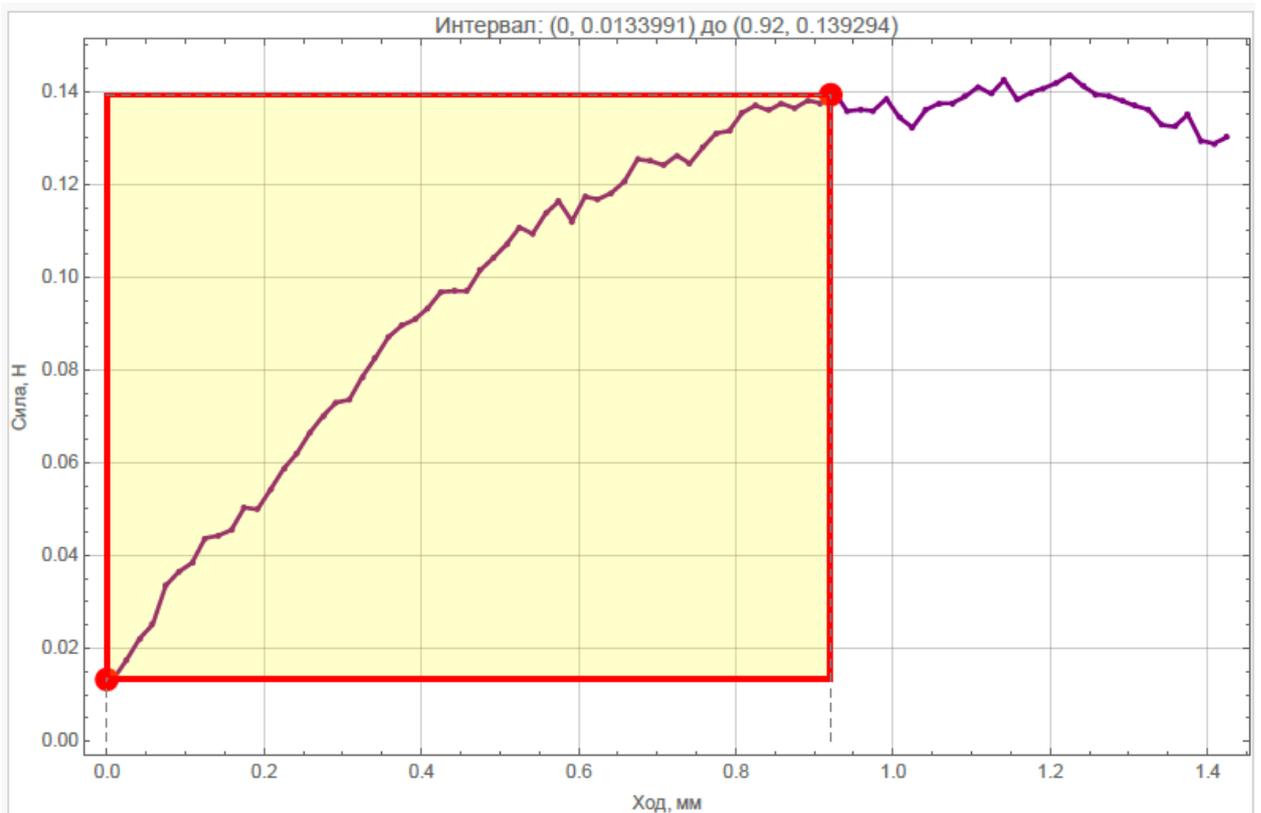


Рисунок 3.51 – Диаграмма растяжения образца 1

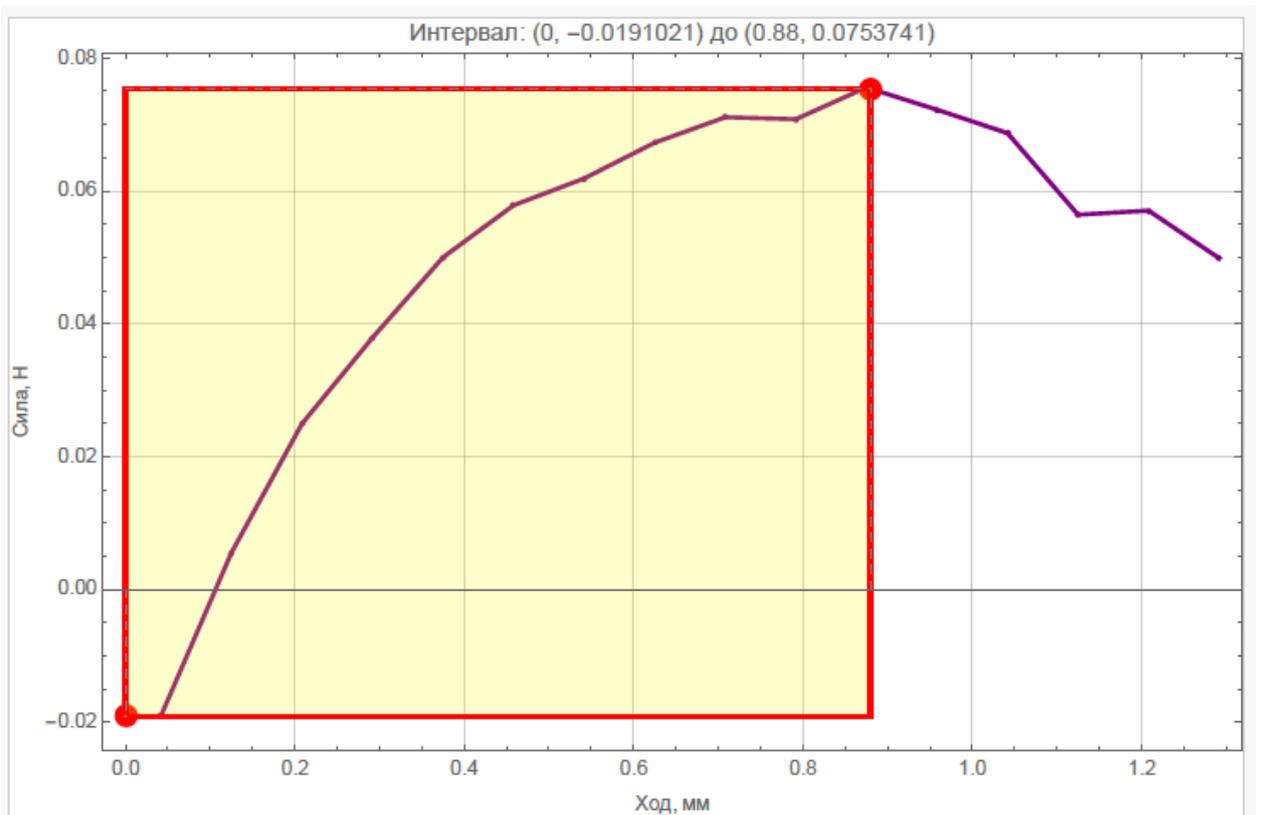


Рисунок 3.52 – Диаграмма растяжения образца 2

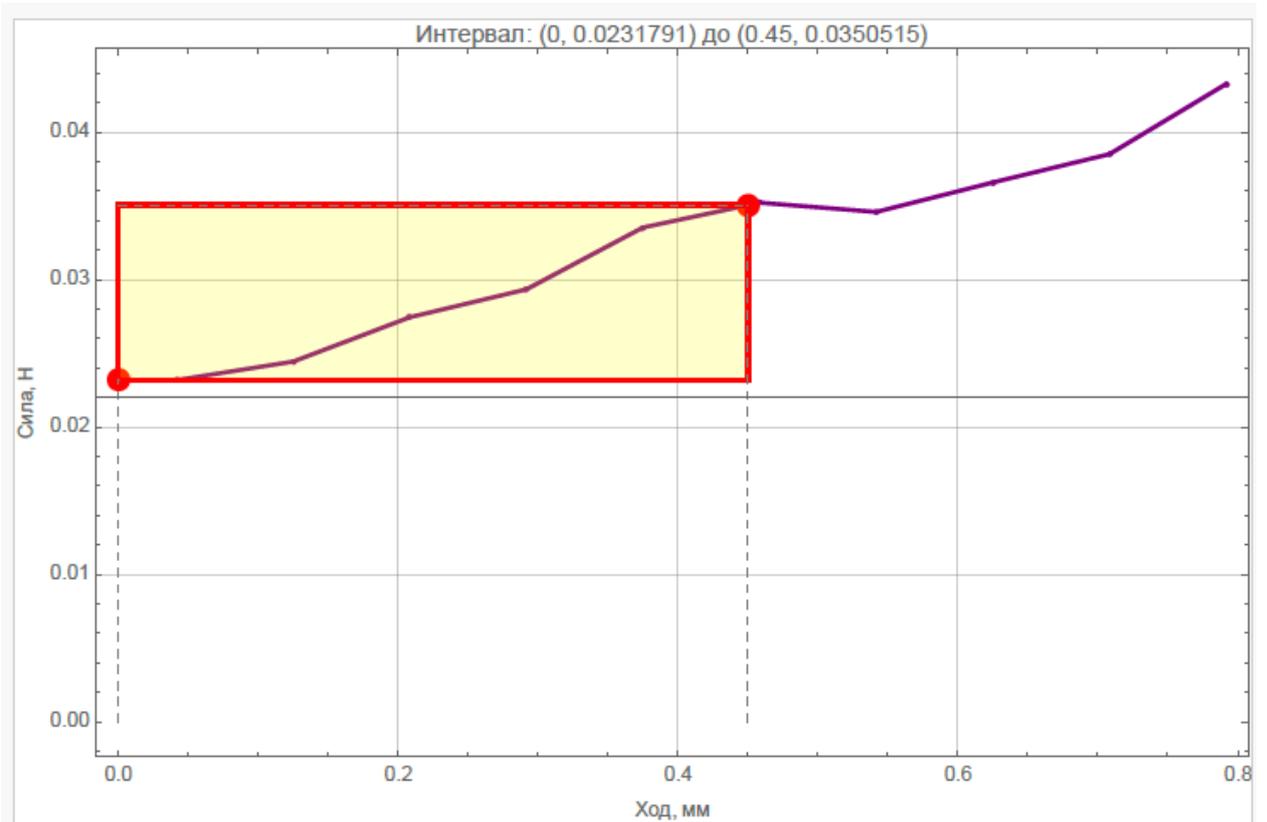


Рисунок 3.53 – Диаграмма растяжения образца 3

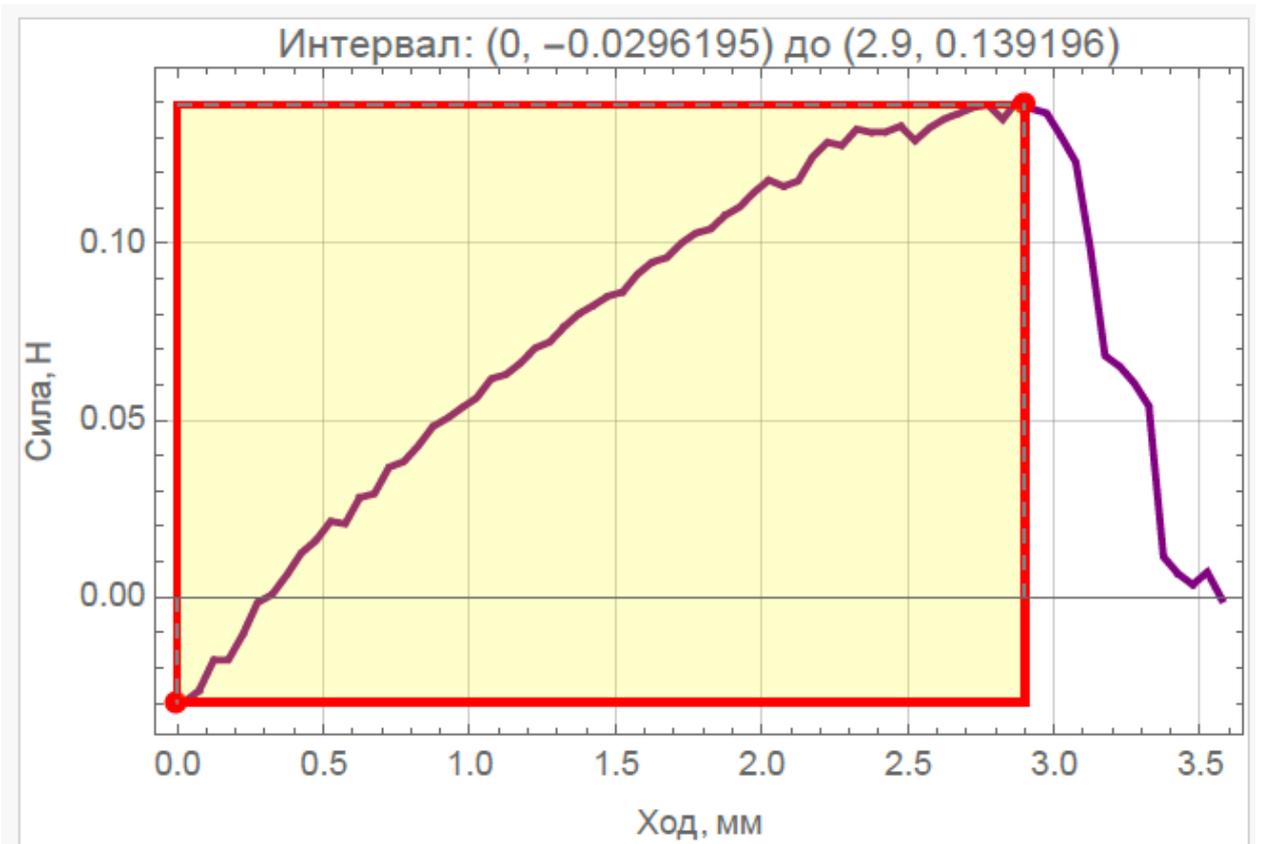


Рисунок 3.54 – Диаграмма растяжения образца 4

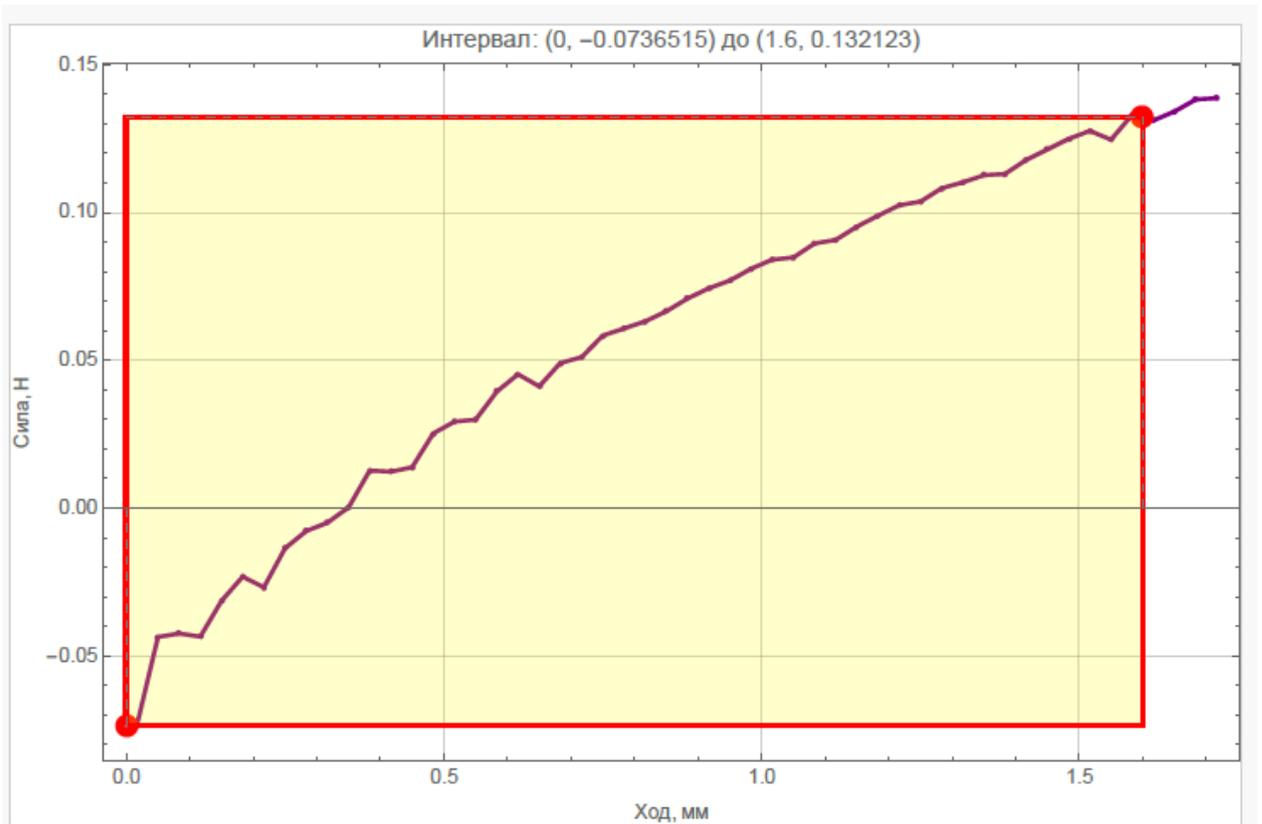


Рисунок 3.55 – Диаграмма растяжения образца 5

В Таблице 3.7 отображены значения сил, соответствующие предельным точкам, определенным на графиках выше. Далее в таблицах пересчитаны соответственно значения напряжений в этих точках. Во второй таблице мы произвели сравнения вычисленных предельных значений напряжений согласно теоретической модели и экспериментальных значений.

Таблица 3.7 – Значения сил, соответствующие предельным точкам

№ обр.	Сдвиг		Растяжение		Сжатие	
	Площадь сечения 0,0004 м ²		Площадь сечения 0,00002 м ²		Площадь сечения 0,0004 м ²	
	Сила, Н	σ_t , Па	Сила, Н	σ_t , Па	Сила, Н	σ_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 δ) 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 3.8).

Таблица 3.8 – Сравнение экспериментальных данных для предельных значений напряжений и расчетных (модельных) значений предельных напряжений

№ обр.	Сдвиг		Растяжение		Сжатие	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
	σ_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 предел текучести в материале, полученный экспериментально, согласно полученным данным (Таблица 3.8) значительно больше расчетного значения предела текучести. Из данных Таблицы 3.8 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.

На заключительном этапе исследования было произведено сравнительное сопоставление двух массивов данных – максимальные модельные значения напряжений и полученные данные из теоретических расчетов. Сочетая экспериментальные данные по определению предела текучести с проверкой теорий предельных напряжений, были получены надежные способы оценки поведения изделия за пределами упругости при сложных нагрузках, возможность предсказать их дальнейшую работоспособность. Результаты, полученные для кубического образца под действием гравитационных сил и гидростатического давления 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 (пределных напряжений текучести) для заданных геометрических параметров кубика.

3.8 Разработка модели взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств материала

Интерфейс программы по взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств материала представлен на Рисунках 3.56, 3.57 и 3.58.

Определение параметров кубика

Плотность материала 

Плотность наполнителя 

g = 9.81

Уравнения:

$$\sigma_{сдв} = \rho_2 g a \frac{(1 - 2\gamma)^2}{2\gamma}$$

$$\sigma_{сжт} = \rho_1 g a \frac{\gamma + 4(\gamma - \gamma^2)(1 - 2\gamma)}{4(\gamma - \gamma^2)}$$

Рисунок 3.56 – Интерфейс программы по взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств материала

На Рисунке 3.56 представлены зависимости напряжения сдвига и сжатия (растяжения) от значений плотности материала и коэффициента, введенного выше. При помощи данных уравнений возможно решение как прямой задачи, так и обратной.

1. Прямая задача

Сторона кубика, мм 

γ 

Решение

$\sigma_{\text{сдв}} = 15.46$

$\sigma_{\text{сжт}} = 83.95$

Рисунок 3.57 – 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 этом, задавая размер кубика, можно получать толщину стенки и наоборот.

2. Обратная задача

$\sigma_{\text{сдв}}$ 

$\sigma_{\text{сжт}}$ 

Решение

$a = 10.00$ мм — сторона кубика

$\delta = 3.30$ мм — толщина стенки

Рисунок 3.58 – Интерфейс программы по взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств материала

Та же программа позволяет выполнять обратное действие. 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>

3.9 Технологический процесс получения пищевого 3D продукта

Первым этапом приготовления ПЧ являлось получение сгустка (калье). Сырое молоко пастеризовали при температуре (78 ± 2) °С с выдержкой от 15 до 20 сек. Далее охлаждали до температуры заквашивания (30 ± 2) °С и вносили закваску, приготовленную на чистых культурах лактококков. 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 МЕ на 1000 г составила 1 мг. Продолжительность перемешивания смеси после заквашивания составила около 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 ± 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 полученное калье перемешивали и направляли на составление смеси или в холодильную камеру. Далее приступали к приготовлению 3D чернил по рецептуре 2 (Таблица 3.9), определенной как базовой, поскольку именно этот вариант обладал как наилучшими органолептическими свойствами, так и

демонстрировал наилучшую целостность и стабильность структуры. Рецептuru смеси ПЧ, предназначенная для 3D печати продукта приведена в Таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Рецептuru 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
ИТОГО	1000

Технологический процесс проводили следующим образом. Сначала в емкость загружали калье и воду, перемешивали. Далее смешивали все сухие компоненты согласно рецептuru 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±2) °С в течение 5-ти минут. После чего пищевые чернила загружали в левый картридж экструдера с насадкой диаметром выходного отверстия 2 мм. В правый картридж, оснащённый насадкой с диаметром выходного отверстия 1 мм, помещали жидкий наполнитель. Для избегания дефектов, до начала печати из чернил и наполнителя многократным возвратно-поступательным движением поршней в картриджах были предварительно удалены захваченные при заполнении пузырьки воздуха. Затем встроенными средствами 3D-принтера нагрели содержимое левого и правого картриджа до температуры 80 и 35 °С, соответственно, с последующей стабилизацией температурного режима в течение всего процесса печати. Далее приступили к послойной печати 3D изделия. В процессе печати работой левого картриджа формировали дно продукта, а также боковые грани. После этого печать продолжали правым картриджем, заполняя наполнителем внутренний объём продукта в режиме прямой подачи. Печать заканчивали левым картриджем до завершения процесса.

Изделие сразу после напечатания полностью готово к употреблению и может быть направлено на реализацию, либо подлежит хранению в закрытых емкостях при температуре (4 ± 2) °С. Физико-химические показатели, которым должен соответствовать продукт представлены в Таблице 3.10, технологическая схема представлена на Рисунке 3.59.

Таблица 3.10 Физико-химические показатели готового продукта

Наименование показателя	Значение показателя
Массовая доля жира в сухом веществе, %, не менее	13,0
Массовая доля влаги, %, не более:	56,3
Массовая доля поваренной соли, %, не более:	9,5
Активная кислотность, рН	От 5,4 до 6,5
Температура продукта при выпуске с предприятия, °С	4 ± 2

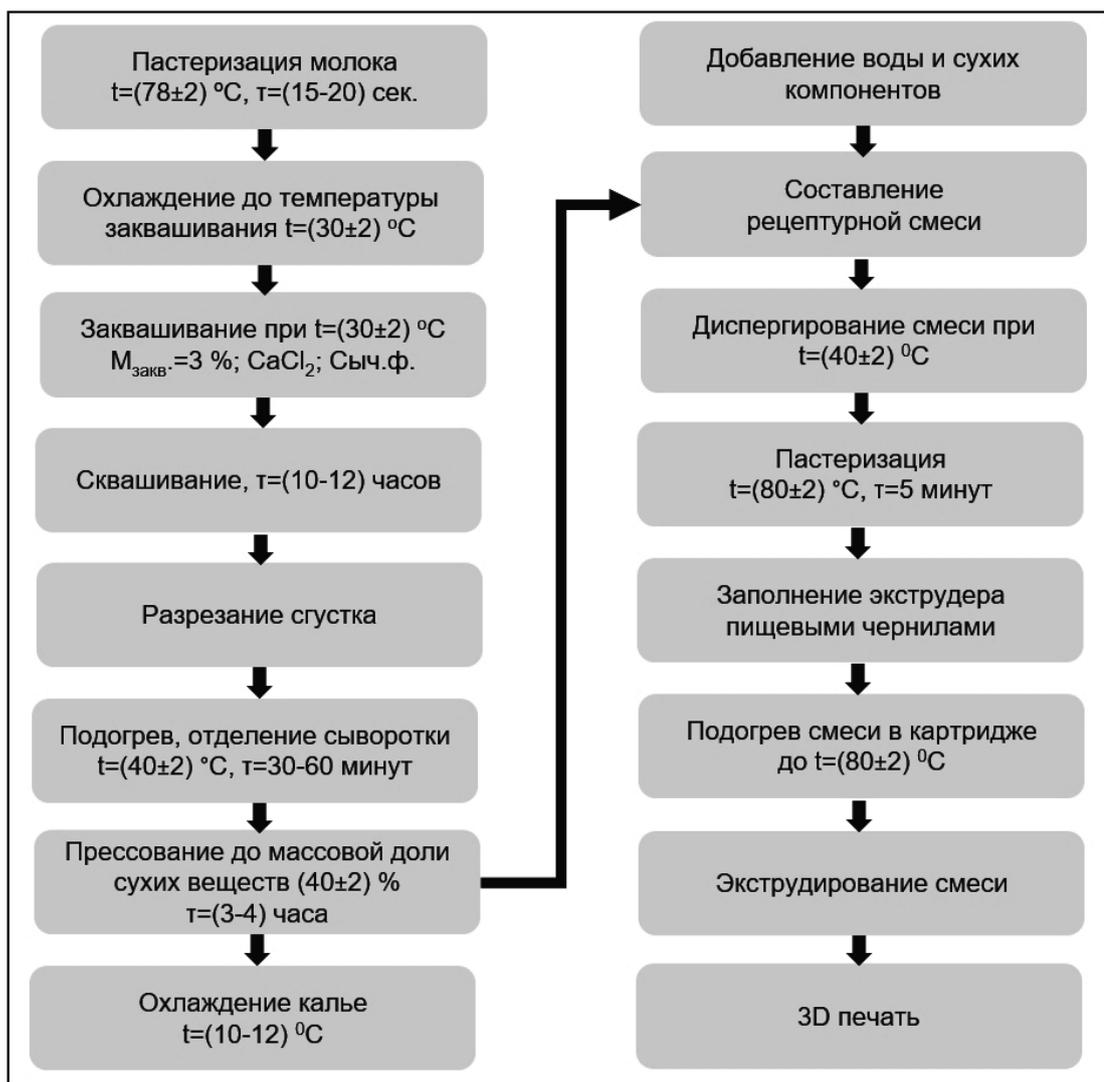


Рисунок 3.59 – Технологическая схема изготовления 3D продукта

Полученный продукт был заложен на хранение в холодильную камеру при температуре (4 ± 2) °С для исследования органолептических и микробиологических показателей (Таблицы 3.11 - 3.12).

Оценка органолептических показателей готового 3D продукта показала, что на протяжении всего срока наблюдения они оставались неизменными (Таблица 3.11.) Однако по истечению 7 суток зафиксировано превышение количества плесеней сверх регламентированного ТР ТС 033 для данного вида продукта (Таблица 3.12), поэтому согласно МУК 4.2.1847–04 для разработанного 3D изделия может быть рекомендован срок годности 5 суток.

Таблица 3.11 Органолептическая оценка готового 3D продукта

Наименование показателя	Периодичность контроля		
	Сутки хранения		
	Фон	5-е сутки	7-модль-е сутки
Внешний вид и консистенция 3D продукта	Продукт правильной кубической формы, поверхность ровная, ненарушенная, с видимой различимостью печатных слоёв. Консистенция плотная, в меру упругая	Продукт правильной кубической формы, поверхность ровная, ненарушенная, с видимой различимостью печатных слоёв. Консистенция плотная, в меру упругая	Продукт правильной кубической формы, поверхность ровная, ненарушенная, с видимой различимостью печатных слоёв. Консистенция плотная, в меру упругая
Вкус и запах	Умеренно выраженный сырный, с привкусом пастеризации	Умеренно выраженный сырный, с привкусом пастеризации	Умеренно выраженный сырный, с привкусом пастеризации
Цвет	Светло-жёлтый, равномерный	Светло-жёлтый, равномерный	Светло-жёлтый, равномерный

Уровни потенциально опасных веществ нормируются в соответствии с ТР ТС 033 «О безопасности молока и молочной продукции».

Для серийного производства и реализации необходимо оформить документ по стандартизации. Нормативно-правовая база аддитивных продуктов питания находится в стадии формирования, тем не менее состав и технологические приемы,

используемые при его производстве, продукта позволяют, согласно действующему на данный момент ТР ТС 033 «О безопасности молока и молочной продукции» позиционировать его как плавленый сыр, ориентируясь на нормы, применимые к данному виду продукта.

Таблица 3.12 Результаты микробиологических испытаний готового 3D продукта

Наименование показателя	Норма по ТР ТС 033	Периодичность контроля		
		Сутки хранения		
		Фон	5-е сутки	8-е сутки
Общее количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, КОЕ/г	Не более $5,0 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^3$
Бактерии группы кишечных палочек, в 0,1 г	-	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
Патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонелла, в 25,0 г	Не допускаются	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
Дрожжи, КОЕ/г	50	Менее $1,0 \cdot 10^1$	Менее $2,0 \cdot 10^1$	Менее $2,0 \cdot 10^1$
Плесени, КОЕ/г	50	Менее $1,0 \cdot 10^1$	Менее $3,0 \cdot 10^1$	Более $5,0 \cdot 10^1$

Обобщающим результатом проведенных исследований стала разработка документа по стандартизации ТУ 10.51.40-111-00419785-2025.

3.10 Расчет экономической эффективности разработанной технологии

В рамках исследования проведен предварительный экономический расчет разработанной технологии. Рассчитаны базовые прямые и косвенные затраты на приобретение специализированного оборудования, его эксплуатации и срок окупаемости в сравнении с традиционной моделью работы. Техно-экономические показатели представлены в Таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Сроки окупаемости разработанной технологии в сегменте HoReCa (сентябрь 2025 года)¹

Показатель	Традиционная модель (функция повара)	Инновационная модель (3D-принтер)
Капитальные инвестиции (разовые)	0	780 000 руб.
Затраты на ФОТ (за 1 год)	1 456 057,2 руб. (121 338,1 руб./мес. * 12 мес.)	0
Надбавка к заработной плате за совмещение функций оператора 3D-печати (за 1 год)	0	145 605,72 руб. (12 133,81 руб./мес. * 12 мес.)
Дополнительные затраты на электричество, расходные материалы, доработку G-кода, покупку готовых 3d-моделей (за 1 год)	0	30 480 руб. (2540 руб./мес. * 12 мес.)
Техническое обслуживание оборудования (за 1 год)	0	78 000 руб. (6500 руб./мес. * 12 мес.)
Срок окупаемости		≈ 7,8 мес.

На основе данных обоснована эффективность частичной замены персонала на предприятиях общественного питания пищевым 3D-принтером FELIX Food Switch Head.

Расчет технико-экономических показателей производили по Формуле 26:

$$PP = \frac{CI}{(\Delta S - \Delta C)}, \quad (26)$$

где PP – срок окупаемости (месяцы); CI – первоначальные капитальные инвестиции, руб.; ΔS – ежемесячная экономия на фонде оплаты труда, руб./мес.; ΔC – ежемесячные затраты, связанные с новой технологией (электричество, расходные материалы и т.д.), руб./мес.

Финансовые расчеты срока окупаемости:

- CI: 780 000 руб.
- $\Delta S = 121\,338,1 - 12\,133,81 = 109\,204,29$ руб./мес.

¹ <https://moskva.gorodrabot.ru/salaries/povar>

- $\Delta C = 2540 + 6\,500 = 9\,040$ руб./мес.
- PP (срок окупаемости) = $780\,000 / 100\,164,29 \approx 7,78$ месяца.

Проведённые расчёты демонстрируют, что в условиях среднерыночных параметров разработанная технология, замещающая функции одного повара, позволяет проекту достичь точки безубыточности уже в пределах 8 месяцев. Для упрощения модели не учитывалась стоимость сырья, так как считается эквивалентной.

Индустрия общественного питания (HoReCa) традиционно характеризуется высокой долей затрат на оплату труда и значительной зависимостью от человеческого фактора, что создаёт риски стабильности производства, сдерживает возможности для масштабирования услуг и ограничивает потенциал развития бизнеса.

Внедрение специализированного 3D-принтера FELIX Food Switch Head представляет собой технологическую инвестицию с коротким сроком окупаемости, которая основана прежде всего на замещении значительной части фонда оплаты труда. Дополнительные выгоды в виде масштабируемости проекта, возможность круглосуточной работы оборудования и способность предлагать клиентам персонализированные продукты создают долгосрочные конкурентные преимущества для предприятия.

Таким образом, комплексный анализ финансовой целесообразности интеграции аддитивных технологий в ресторанный бизнес выявил положительную динамику ключевых показателей. Высокая рентабельность в сочетании с исключительно 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 критическим 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Б – белок

ИСБ – изолят сывороточного белка

КМЦ – карбоксиметилцеллюлоза

K_{cd} – 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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lipton, J. I. Additive manufacturing for the food industry / J. I. Lipton // Trends in Food Science & Technology. – 2015. – Vol. 43 – №1. – P. 114-123.
2. Семипятный, В. К. Анализ трендовых схем переработки пищевых отходов / В. К. Семипятный, М. Н. Стрижко, Д. С. Рыскин // Пищевая промышленность. – 2023. – № 2. – С. 61-65. – DOI 10.52653/PPI.2023.2.2.014. – EDN RBWOXP.
3. Garcia, S.N. One health for food safety, food security, and sustainable food production / S.N. Garcia, B.I. Osburn, M.T. Jay-Russell // Frontiers in Sustainable Food Systems. – 2020. – Vol. 4 –P. 1.
4. Макаревич, М. Л. Качество и безопасность пищевых продуктов как необходимые условия обеспечения продовольственной безопасности России / М.Л. Макаревич // Актуальные проблемы науки и практики. – 2015. – №. 1. – С. 28-35.
5. Herrero, M. et al. Innovation can accelerate the transition towards a sustainable food system / M. Herrero et al // Nature Food. – 2020. – Vol. 1. – №. 5. – С. 266-272.
6. Fung, F. et al Food safety in the 21st century / F. Fung et al // Biomedical journal. – 2018. – Vol. 41. – №. 2. – P. 88-95.
7. Nyarugwe, S. P. et al. An intercontinental analysis of food safety culture in view of food safety governance and national values / S. P. Nyarugwe // Food Control. – 2020. – Vol. 111. – P. 107075.
8. Koester, U. FAO Food Loss Index methodology and policy implications /U. Koester, E. Galaktionova //Studies in Agricultural Economics. – 2021. – Vol. 123. – №. 1. – P. 1-7.
9. Canton, H. Food and agriculture organization of the United Nations—FAO //The Europa directory of international organizations 2021. – Routledge, 2021. – P. 297-305.
10. 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.

11. Oliveira, S. M. Printability, microstructure, and flow dynamics of phase-separated edible 3D inks / S. M. Oliveira, L. H. Fasolin, A. A. Vicente, P. Fucinos, L. M. Pastrana //Food Hydrocolloids. – 2020. – Vol. 109. – P. 106120.
12. Dou X., Ren J. The application of dairy products and their derivatives as edible inks in 3D printing technology: A review //International Journal of Food Science and Technology. – 2024. – Т. 59. – №. 11. – С. 8630-8644.
13. Zhang, J. Y. Advancements in 3D food printing: a comprehensive overview of properties and opportunities / J. Y. Zhang, J. K. Pandya, D. J. McClements, J. Lu, A. J. Kinchla //Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2022. – Vol. 62. – P. 4752-4768.
14. Agunbiade, A. O. Potentials of 3D extrusion-based printing in resolving food processing challenges: a perspective review / A. O. Agunbiade, L. J. Song, J. O. Agunbiade et al. //Journal of Food Process Engineering. – 2022. – Vol. 45. – №. 4. – P. e13996.
15. Zhang, L. Z. Application and challenges of 3D food printing technology in manned spaceflight: a review / L. Z. Zhang, H. S. Dong, Y. B. Yu, L. Y. Liu, P. Zang //International Journal of Food Science and Technology. – 2022. – Vol. 57. – P. 4906-4917.
16. Sun, J. An overview of 3D printing Technologies for Food Fabrication / J. Sun, W. B. Zhou, D. J. Huang, J. Y. H. Fuh, G. S. Hong //Food and Bioprocess Technology. – 2015. – Vol. 8. – P. 1605-1615.
17. Xu, M. H. Exploring the mechanism of variation in 3D printing accuracy of cassava starch gels during freezing process / M. H. Xu, S. Y. Ji, Y. Li et al //Food Hydrocolloids. – 2023. – Vol. 140. – P. 108657.
18. Ji, S. Investigation of the mechanism of casein protein to enhance 3D printing accuracy of cassava starch gel / S. Ji, T. Xu, Y. Liu et al.//Carbohydrate Polymers. – 2022. – Vol. 295. – P. 119827.
19. Li, G. H. Effect of induction mode on 3D printing characteristics of whey protein isolate emulsion gel / G. H. Li, B. Wang, W. Q. Lv, R. Y. Mu, Y. L. Zhong //Food

- Hydrocolloids. – 2024. – Vol. 146. – P. 109255.
20. Kim, S. M. Formulation and evaluation of cold-extruded chocolate ganache for three-dimensional food printing / S. M. Kim, J. H. Woo, H. W. Kim, H. J. Park //Journal of Food Engineering. – 2022. – Vol. 314. – P. 110785.
 21. Kim, H. W. Reprint of: classification of the printability of selected food for 3D printing: development of an assessment method using hydrocolloids as reference material / H. W. Kim, H. Bae, H. J. Park //Journal of Food Engineering. – 2018. – Vol. 220. – .
 22. De Farias, P. M. Bibliometric mapping analysis of Pickering emulsion applied in 3D food printing / P. M. De Farias, J. R. V. Matheus, B. C. Maniglia et al //International Journal of Food Science and Technology. – 2024. – Vol. 59. – P. 2186-2196.
 23. Lanaro, M. 3D printing chocolate: properties of formulations for extrusion, sintering, binding and ink jetting / M. Lanaro, M. R. Desselle, M. A. Woodruff //Fundamentals of 3D Food Printing and Applications. – 2019. – P. 151-173.
 24. Joshi, S. Assessment of 3D printability of composite dairy matrix by correlating with its rheological properties / S. Joshi, J. K. Sahu, M. A. Baren. et al. //Food Research International. – 2021. – Vol. 141. – P. 110111.
 25. Joshi, S. Modulating the 3D printability of vitamin D3-nanoemulsion-based dairy gels: influence of emulsifier on gel structure, printing behaviour and vitamin D3 retention/ S. Joshi, J. K. Sahu, S. Prakash, S. N. Naik //Journal of Food Engineering. – 202.
 26. Du, Y. W. Effect of whey protein on the 3D printing performance of konjac hybrid gel/ Y. W. Du, M. Zhang, H. Z. Chen //LWT – Food Science and Technology. – 2021. – Vol. 140. – P. 110716.
 27. Chandan, R. C. CHAPTER 1: Properties of milk and its components/ R. C. Chandan //Dairy-Based Ingredients. – 1997.
 28. Chen, Y. Starch as edible ink in 3D printing for food applications: a review / Y. Chen, D. J. McClements, X. Peng et al. //Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2024. – Vol. 64. – №. 2. – P. 456-471.

29. Jiang, H. 3D food printing: main components selection by considering rheological properties / H. Jiang, L. Y. Zheng, Y. H. Zou, Z. B. Tong, S. Y. Han, S. J. Wang //Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2019. – Vol. 59. – P. 2335-2347.
30. Bhat, Z. F. 3D printing: development of animal products and special foods / Z. F. Bhat, J. D. Morton, S. Kumar, H. F. Bhat, R. M. Aadil, A. Bekhit //Trends in Food Science & Technology. – 2021. – Vol. 118. – P. 87-105.
31. Ross, M. M. Parameters affecting the printability of 3D-printed processed cheese / M. M. Ross, S. V. Crowley, S. Crotty, J. Oliveira, A. P. Morrison, A. L. Kelly //Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2021. – Vol. 72. – P. 102730.
32. Joshi, S. Unravelling the synergistic effect of incorporation of inulin and high intensity ultrasound treatment on restructuring heat desiccated milk protein with 3D printing / S. Joshi, M. A. Baren, J. K. Sahu, S. Prakash, S. N. Naik //Journal of Food E.
33. Riantiningtyas, R. R. 3D printing of a high protein yoghurt-based gel: effect of protein enrichment and gelatine on physical and sensory properties / R. R. Riantiningtyas, V. F. Sager, C. Y. Chow, C. D. Thybo, W. L. P. Bredie, L. Ahrne //Food Research Int.
34. Le Tohic, C. Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese / C. Le Tohic, J. J. O'sullivan, K. P. Drapala et al. //Journal of Food Engineering. – 2018. – Vol. 220. – P. 56-64.
35. Ji, S. Y. Atmospheric pressure plasma jet pretreatment to facilitate cassava starch modification with octenyl succinic anhydride / S. Y. Ji, T. Xu, W. S. Huang et al. //Food Chemistry. – 2022. – T. 370. – P. 130922.
36. Sasaki, T. Impact of chemical and rheological properties on 3D printability and starch digestibility of potato pastes from different cultivars / T. Sasaki //International Journal of Food Science and Technology. – 2023. – Vol. 58. – P. 1912-1921.
37. Rahman, J. M. H. Rheological and mechanical properties of edible gel materials for

- 3D food printing technology / J. M. H. Rahman, M. N. I. Shiblee, K. Ahmed, A. Khosla, M. Kawakami, H. Furukawa //Heliyon. – 2020. – Vol. 6. – P. e05859.
38. Wang, D. X. Whey protein isolate nanofibrils as emulsifying agent to improve printability of Cheddar cheese for 3D printing / D. X. Wang, J. X. Guo, Y. X. Wang et al.//Food Hydrocolloids. – 2023. – Vol. 142. – P. 108807.
39. Wang, J. L. 3D printed agar/calcium alginate hydrogels with high shape fidelity and tailorable mechanical properties/ J. L. Wang, Y. Liu, X. T. Zhang et al. //Polymer. – 2021. – Vol T. 214. – P. 123238.
40. Wong, R. B. K. Viscoelastic behavior of wheat-starch pastes / R. B. K. Wong, J. Lelievre //Rheologica Acta. – 1981. – Vol. 20. – P. 299-307.
41. Yang, F. Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters / F. Yang, M. Zhang, B. Bhandari, Y. Liu //LWT – Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 87. – P. 67-76.
42. Zhu, S. C. Extrusion-based 3D printing of food pastes: correlating rheological properties with printing behaviour / S. C. Zhu, M. A. Stieger, A. J. van der Goot, M. A. I. Schutyser //Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2019. – Vol. 58. – P.
43. Ziaee, M. Binder jetting: A review of process, materials, and methods / M. Ziaee, N. B. Crane //Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 28. – P. 781-801.
44. Lim, W. S. Ready-to-use granule-based food ink system for three-dimensional food printing / W. S. Lim, H. W. Kim, H. J. Park //Journal of Food Engineering. – 2022. – Vol. 330. – P. 111092.
45. Wang, L. Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing / L. Wang, M. Zhang, B. Bhandari, C. H. Yang //Journal of Food Engineering. – 2018. – Vol. 220. – P. 101-108.
46. Li, G. S. 3D printing properties and printability definition of Pennahiaargentata surimi and rice starch / G. S. Li, J. Q. Zhan, Z. H. Hu et al. //Food Bioscience. – 2022. – Vol. 48. – P. 101748.
47. Le-Bail, A. Recent advances and future perspective in additive manufacturing of foods based on 3D printing / A. Le-Bail, B. C. Maniglia, P. Le-Bail //Current

- Opinion in Food Science. – 2020. – Vol. 35. – P. 54-64.
48. Lee, C. P. 3D printing of milk-based product / C. P. Lee, R. Karyappa, M. Hashimoto //RSC Advances. – 2020. – Vol. 10. – P. 29821-29828.
 49. Sun, J. Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control / J. Sun, W. B. Zhou, L. K. Yan, D. J. Huang, L. Y. Lin //Journal of Food Engineering. – 2018. – Vol. 220. – P. 1-11.
 50. Taneja, A. Innovations and applications of 3-D printing in food sector / A. Taneja, R. Sharma, K. Ayush et al. //International Journal of Food Science and Technology. – 2022. – Vol. 57. – P. 3326-3332.
 51. Yang, F. Internal structure and textural properties of a milk protein composite gel construct produced by three-dimensional printing / F. Yang, Y. Cui, Y. Guo, W. J. Yang, X. Liu, X. X. Liu //Journal of Food Science. – 2021. – Vol. 86. – P. 1917-1927.
 52. Athira, V. A. A brief review on 3D printing of chocolate / V. A. Athira, C. T. Udayarajan, G. Goksen, C. S. Brennan, P. Nisha //International Journal of Food Science and Technology. – 2023. – Vol. 58. – P. 2811-2828.
 53. Chen, Y. Improving 3D/4D printing characteristics of natural food gels by novel additives: A review / Y. Chen, M. Zhang, Y. Sun, P. Phuhongsung //Food Hydrocolloids. – 2022. – Vol. 123. – P. 107160.
 54. Holland, S. Selective recrystallization of cellulose composite powders and microstructure creation through 3D binder jetting / S. Holland, C. Tuck, T. Foster //Carbohydrate Polymers. – 2018. – Vol. 200. – P. 229-238.
 55. Kafle, A. 3D/4D printing of polymers: fused deposition modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA) / A. Kafle, E. Luis, R. Silwal, H. M. Pan, P. L. Shrestha, A. K. Bastola //Polymers. – 2021. – Vol. 13. – P. 3101.
 56. Sun, J. 3D Food Printing—An Innovative Way of Mass Customization in Food Fabrication / J. Sun, Z. Peng, L. Yan, J. Fuh, G. S. Hong //International Journal of Bioprinting. – 2015. – Vol. 1. – P. 27-38.
 57. Charoo, N. A. Selective laser sintering 3D printing - an overview of the technology and pharmaceutical applications / N. A. Charoo, S. F. B. Ali, E. M. Mohamed et al.

- //Drug Development and Industrial Pharmacy. – 2020. – Vol. 46. – P. 869-877.
58. Awad, A. 3D printing: principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering / A. Awad, F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, A. W. Basit //International Journal of Pharmaceutics. – 2020. – Vol. 586. – P. 119594.
 59. Do, T. A. L/ Structural characteristics of cocoa particles and their effect on the viscosity of reduced fat chocolate/ T. A. L. Do, J. Vieira, J. M. Hargreaves, J. R. Mitchell, B. Wolf //LWT – Food Science and Technology. – 2011. – Vol. 44. – P. 1207-1211.
 60. Liu, Y. W. Rheological and mechanical behavior of milk protein composite gel for extrusion-based 3D food printing/ Y. W. Liu, Y. Yu, C. S. Liu, J. M. Regenstein, X. M. Liu, P. Zhou //LWT – Food Science and Technology. – 2019. – Vol. 102. – P. 338-346.
 61. Liu, Z. B. 3D printing: printing precision and application in food sector / Z. B. Liu, M. Zhang, B. Bhandari, Y. C. Wang //Trends in Food Science & Technology. – 2017. – Vol. 69. – P. 83-94.
 62. Vadodaria, S. Jetting-based 3D printing of edible materials / S. Vadodaria, T. Mills //Food Hydrocolloids. – 2020. – Vol. 106. – P. 105857.
 63. Godoi, F. C. 3d printing technologies applied for food design: status and prospects / F. C. Godoi, S. Prakash, B. R. Bhandari //Journal of Food Engineering. – 2016. – Vol. 179. – P. 44-54.
 64. Guinee, T. P. Effect of pH and calcium concentration on some textural and functional properties of mozzarella cheese / T. P. Guinee, E. P. Feeney, M. A. E. Auty, P. F. Fox //Journal of Dairy Science. – 2002. – Vol. 85. – P. 1655-1669.
 65. Ross, M. M. Potential applications of dairy products, ingredients and formulations in 3D printing / M. M. Ross, A. L. Kelly, S. V. Crowley //Fundamentals of 3D food printing and applications. – 2019. – P. 175-206.
 66. Foegeding, E. A. Functional properties of proteins and lipids / E. A. Foegeding, E. A. Gwartney, A. D. Errington //Functional Properties of Whey Proteins in Forming Networks. – 1998.
 67. Hussain, S. Extrusion-based 3D food printing: technological approaches, material

- characteristics, printing stability, and post-processing / S. Hussain, S. Malakar, V. K. Arora //Food Engineering Reviews. – 2022. – Vol. 14. – P. 100-119.
68. Nobel, S. Instantaneous gelation of acid milk gels via customized temperature-time profiles: screening of concentration and pH suitable for temperature triggered gelation towards 3D-printing / S. Nobel, B. Seifert, K. Daffner, J. Schafer, J. Hinrichs //Fo.
69. Mcsweeney, P. L. H. Advanced Dairy Chemistry: Volume 1A: Proteins: Basic Aspects / P. L. H. Mcsweeney, P. F. Fox //Springer Science & Business Media. – 2013.
70. Gwartney, E. A. Sensory texture and mechanical properties of stranded and particulate whey protein emulsion gels / E. A. Gwartney, D. K. Larick, E. A. Foegeding //Journal of Food Science. – 2004. – Vol. 69. – P. S333-S339.
71. Ronholt, S. The effect of butter grains on physical properties of butter-like emulsions / S. Ronholt, P. Buldo, K. Mortensen, U. Andersen, J. C. Knudsen, L. Wiking //Journal of Dairy Science. – 2014. – Vol. 97. – P. 1929-1938.
72. Daffner, K. Characterising the influence of milk fat towards an application for extrusion-based 3D-printing of casein-whey protein suspensions via the pH-temperature-route / K. Daffner, L. Ong, E. Hanssen, S. Gras, T. Mills //Food Hydrocolloids. – 2021. –.
73. Daffner, K. Design and characterization of casein-whey protein suspensions via the pH-temperature-route for application in extrusion-based 3D-printing / K. Daffner, S. Vadodaria, L. Ong et al //Food Hydrocolloids. – 2021. – Vol. 112. – P. 105850.
74. Severini, C. Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects / C. Severini, A. Derossi, I. Ricci, R. Caporizzi, A. Fiore //Journal of Food Engineering. – 2018. – Vol. 220. – P. 89.
75. Sager, V. F. Formulation of heat-induced whey protein gels for extrusion-based 3D printing/ V. F. Sager, M. B. Munk, M. S. Hansen, W. L. P. Bredie, L. Ahrne //Food. – 2021. – Vol. 10. – P. 8.
76. Fan, F. H. Structural characterization and fluidness analysis of lactose/whey protein isolate composite hydrocolloids as printing materials for 3D printing / F. H. Fan, S.

- Li, W. L. Huang, J. Z. Ding //Food Research International. – 2022. – Vol. 152. – P.
77. Liu, Y. The formation of rice starch/casein complex by hydrothermal and stabilizing high internal phase emulsions with 3D printing property / Y. Liu, Z. F. Tan, X. B. Xu, J. Q. Liu, B. W. Zhu, X. P. Dong //Food Hydrocolloids. – 2023. – Vol. 144. – P. 1089.
78. Marchesseau, S. Influence of pH on protein interactions and microstructure of process cheese / S. Marchesseau, E. Gastaldi, A. Lagaude, J. L. Cuq //Journal of Dairy Science. – 1997. – Vol. 80. – P. 1483-1489.
79. Hu, L. D. Effect of enzymatic-ultrasonic hydrolyzed chitooligosaccharide on rheology of gelatin incorporated yogurt and 3D printing / L. D. Hu, F. Y. Ding, W. W. Liu et al //Food Hydrocolloids. – 2022. – Vol. 132. – P. 107851.
80. Uribe-Alvarez, R. Evaluation of rennet-induced gelation under different conditions as a potential method for 3D food printing of dairy-based high-protein formulations / R. Uribe-Alvarez, N. O'shea, C. P. Murphy, C. Coleman-Vaughan, T. P. Guinee //Food Hyd.
81. Wang, Y. H. Impact of pH on pea protein-hydroxypropyl starch hydrogel based on interpenetrating network and its application in 3D-printing / Y. H. Wang, Q. Liu, Y. Y. Yang, C. Qiu, A. Q. Jiao, Z. Y. Jin //Food Research International. – 2023. – Vol. 170. –.
82. Ji, S. Y. Effect of starch molecular structure on precision and texture properties of 3D printed products/ S. Y. Ji, T. Xu, Y. Li, H. Y. Li, Y. H. Zhong, B. Y. Lu //Food Hydrocolloids. – 2022. – Vol. 125. – P. 107387.
83. Lille, M. Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing / M. Lille, A. Nurmela, E. Nordlund, S. Metsa-Kortelainen, N. Sozer //Journal of Food Engineering. – 2018. – Vol. 220. – P. 20-27.
84. Wedamulla, N. E. Effect of pectin on printability and textural properties of potato starch 3D food printing gel during cold storage / N. E. Wedamulla, M. Q. Fan, Y. J. Choi, E. K. Kim //Food Hydrocolloids. – 2023. – Vol. 137. – P. 108362.
85. Arltoft, D. Interactions between carrageenans and milk proteins: a microstructural and rheological study / D. Arltoft, R. Ipsen, F. Madsen, J. De Vries

- //Biomacromolecules. – 2007. – Vol. 8. – P. 729-736.
86. Rohart, A. Designing microstructure into xanthan gum-enriched acid milk gels / A. Rohart, C. Michon //Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2014. – Vol. 25. – P. 53-57.
 87. Cai, Q. Y. Co-incorporation of probiotics into 3D printed custard cream with hydrophilic and hydrophobic bioactives / Q. Y. Cai, Y. L. Zhong, Q. R. Huang, G. Y. Huang, X. X. Lu //Food Hydrocolloids. – 2023. – Vol. 142. – P. 108809.
 88. Cai, Q. Y. 3D printed high oil custard cream: effects of whey protein isolate, hydroxypropylated starch and carrageenan on physicochemical properties and printing performance / Q. Y. Cai, Y. L. Zhong, M. L. Xu, Q. R. Huang, X. X. Lu //LWT – Food Science a.
 89. Merachli, F. Impact of Cocoa Fibers on the Stability and Rheological Properties of Chocolate Ganaches / F. Merachli, J. Devienne, R. Delmas, L. Plawinski, F. Leal-Calderon, M. Delample //LWT – Food Science and Technology. – 2021. – Vol. 139. – P. 110505.
 90. Karyappa, R. Chocolate-based ink three-dimensional printing (Ci3DP) / R. Karyappa, M. Hashimoto //Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9. – P. 14178.
 91. Baren, M. A. Assessment of 3D printability of heat acid coagulated milk semi-solids ‘soft cheese’ by correlating rheological, microstructural, and textural properties / M. A. Baren, S. Joshi, J. K. Sahu, S. Prakash, B. Bhandari //Journal of Food Enginee.
 92. Bryant, C. M. Molecular basis of protein functionality with special consideration of cold-set gels derived from heat-denatured whey / C. M. Bryant, D. J. McClements //Trends in Food Science & Technology. – 1998. – Vol. 9. – P. 143-.
 93. Lin, L. Calcium-induced skim milk gels: impact of holding temperature and ionic strength / L. Lin, M. Wong, H. C. Deeth, H. E. Oh //International Dairy Journal. – 2020. – Vol. 104. – P. 104657.
 94. Ross, M. M. Applications of micellar casein concentrate in 3D-printed food structures / M. M. Ross, S. V. Crowley, A. L. Kelly //Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2022. – Vol. 82. – P. 103182.

95. Uribe-Alvarez, R. Evaluation of ionic calcium and protein concentration on heat- and cold-induced gelation of whey protein isolate gels as a potential food formulation for 3D food printing / R. Uribe-Alvarez, C. P. Murphy, C. Coleman-Vaughan, N. O'shea //.
96. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести : учебник для вузов / Н. Н. Малинин. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 402 с.
97. Людвик П. Основы технологической механики. – В кн.: Расчеты на прочность. Вып. 15, «Машиностроение», 1971, с.132-166.
98. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. советгК.В. Фролов (пред.) и др.*М.: Машиностроение* М 38 Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. Т. 1-3. В 2-х кн. Кн. 1 / К.С. Колесников, Д.А. Александров, В.К. Асташев и др.; Под общ. ред. К.С. Колесни.
99. Rabotnov, Yu. N. Application of the nonlinear theory of heredity to the description of time effects in polymeric materials / Yu. N. Rabotnov, L. Kh. Papernik, E. I. Stepanychev // Polymer Mechanics. – 1971. – Vol. 7, No. 1. – P. 63-73. – DOI 10.1007/bf008.
100. Гольдштейн, Ю. Б. Основы механики твердого деформируемого тела: Учеб. Пособие / Ю. Б. Гольдштейн; ПетрГУ. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. – 872 с.
101. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров: Учеб, для хим.-технолог. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство «Лабиринт», 1994. – 367 с.: ил. ISBN 5–8704–020–7.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»
(ФГАНУ «ВНИМИ»)

ОКПД2 10.51.40.170

ОКС 67.100.10 Группа Н17

УТВЕРЖДАЮ



Директор ФГАНУ «ВНИМИ»

А. Г. Галстян
А. Г. Галстян

«15» *Сентября* 2025 г

СЫР ПЛАВЛЕННЫЙ «ПРИНТЧИЗ»

Технические условия

ТУ 10.51.40-111-00419785-2025

Дата введения в действие – 15.10.2025

РАЗРАБОТАНО

ФГАНУ «ВНИМИ»

Инженер лаборатории технологий
функциональных продуктов

Д. С. Архипов
Д. С. Архипов

Зав. лабораторией биотехнологии
молока и молочных продуктов

Е. Ю. Агаркова
Е. Ю. Агаркова

Инженер-исследователь

С. В. Мотылев
С. В. Мотылев

Москва

2025

УТВЕРЖДАЮ Директор ФГАНУ «ВНИМИ» А.Г. Галстян «26» ноября 2025 г.	УТВЕРЖДАЮ Генеральный директор ООО «ГСК ФУД» Р.В. Гаспарян «28» ноября 2025 г.
---	--

Акт о производстве «ПринтЧиз» с наполнителем,
вырабатываемого с применением 3D принтера FELIX Food Switch Head

В рамках развития инновационного направления ООО «ГСК ФУД» в период с 20 октября 2025 года по настоящее время успешно проведена промышленная апробация и коммерциализация технологии производства сырного продукта с наполнителем «ПринтЧиз».

Технологический процесс был развернут на собственной производственной площадке компании на основе полученного комплекса технической документации (ТУ 10.51.40-111-00419785-2025), специализированного оборудования и ноу-хау. Ключевым элементом производства стало использование пищевого 3D-принтера FELIX Food Switch Head, что позволило обеспечить точное формование кубиков продукта с интегрированным жидким наполнителем (цветочный мед).

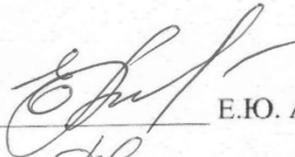
За указанный период было изготовлено и выведено на рынок свыше 4000 экспериментальных единиц продукции. Рыночный тест подтвердил как технологическую состоятельность решения (стабильность формы, сохранность наполнителя, высокие органолептические показатели), так и его потребительскую привлекательность. Отдельно отмечен интерес потребителя к визуальному восприятию процесса приготовления.

Продукт получил значительное количество положительных отзывов от конечных потребителей, что свидетельствует о соответствии вкусовых качеств и концепции продукта рыночному спросу.

По итогам проведенной работы, включавшей экспертную оценку технологических параметров и анализ потребительской обратной связи, принято стратегическое решение о масштабировании данной технологии. В ближайшей перспективе планируется ее тиражирование и внедрение на всех предприятиях общественного питания, входящих в структуру компании, с целью диверсификации меню и усиления конкурентных преимуществ.

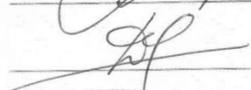
От ФГАНУ «ВНИМИ»:

Зав. лаб. биохимии
молока и молочных продуктов



Е.Ю. Агаркова

Инженер



Д.С. Архипов

УТВЕРЖДАЮ
 Директор ФГАНУ «ВНИМИ»
 А.Г. Галстян
 «01» сентября 2025 г.



Акт о опытном производстве
 «ПринтЧиз» с медом на 3D принтере на базе
 буфета «МОЛОКО» ФГАНУ ВНИМИ

В рамках апробации результатов исследований диссертационной работы Архипова Д.С. в период с 05 мая до 01 августа 2025 года на базе буфета «МОЛОКО» ФГАНУ «ВНИМИ» были осуществлены выработки кубиков плавленого сыра с медом и фруктовыми наполнителями «ПринтЧиз».

Технологический процесс осуществлялся в соответствии с технической документацией на опытную выработку (ТУ 10.51.40-111-00419785-2025 (ОВ)) с применением пищевого 3D-принтера FELIX Food Switch Head, Нидерланды.

За указанный период было изготовлено и опробовано свыше 1500 экспериментальных единиц продукции. Анализ потребительского интереса к новой продукции позволил фиксировать его рыночную перспективность и особый интерес со стороны посетителей.

Продукт получил множество положительных отзывов от конечных потребителей, что свидетельствует о соответствии вкусовых качеств и концепции продукта рыночному спросу.

По итогам проведенной работы, включавшей экспертную оценку технологических параметров и анализ потребительской обратной связи, принято решение о дальнейшей коммерциализации технологии.

От ФГАНУ «ВНИМИ»:

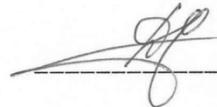
Зав. лаб. биохимии

молока и молочных продуктов



Е.Ю. Агаркова

Инженер



Д.С. Архипов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024667797

**«ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ
ТАБЛЕТИРОВАННЫХ ФОРМ МОЛОЧНЫХ
ПРОДУКТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ БАЗОВОЙ
ФИГУРЫ ОБЪЕКТА»**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ» (RU)**

Авторы: **Архипов Данила Сергеевич (RU), Пряничникова Наталия
Сергеевна (RU), Семипятный Владислав Константинович (RU),
Галстян Арам Генрихович (RU)**

Заявка № 2024666142

Дата поступления 09 июля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 июля 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

