

В диссертационный совет
24.1.515.01 при ФГАНУ
«Всероссийский научно-
исследовательский институт
молочной промышленности»,
115093, г. Москва, ул.
Люсиновская, д.35, корп. 7

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата химических наук, **Захаровой Василины Александровны** на диссертационную работу **Архипова Данилы Сергеевича** на тему: «**Моделирование и разработка 3D-печатного комбинированного продукта на молочной основе**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.3 Пищевые системы (технические науки)

Актуальность темы диссертации

Вопрос обеспечения населения качественными пищевыми продуктами является одной из ключевых задач устойчивого развития, особенно в контексте глобального демографического роста и возрастающей нагрузки на агропродовольственные системы. В связи с этим одним из перспективных направлений является переход к персонализированному питанию и внедрению аддитивных технологий, в частности 3D-печати пищевой продукции.

Продукты молочной промышленности обладают значительным потенциалом для их использования в качестве основы при создании “чернил” для 3D-печати благодаря ряду уникальных структурообразующих свойств, белковых и липидных компонентов. Однако, создание пищевых чернил на молочной основе может быть сопряжено с рядом осложнений: необходимостью обеспечения оптимальных реологических параметров для равномерной экструзии “чернил”, а также формирования возможности быстрого структурирования 3D-печатного конструкта после нанесения слоя. Преодолению существующих ограничений может способствовать не только эмпирический подбор технологических параметров и рецептур, но и глубокое понимание физико-химических и реологических закономерностей, а также разработки инструментальных методов оценки стабильности печатных форм. Диссертационная работа Архипова Д.С., направленная на моделирование и создание 3D-печатного комбинированного продукта на молочной основе для сегмента HoReCa, является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Постановка цели и задач диссертации выполнена на высоком методическом уровне, с опорой на фундаментальные труды отечественных и зарубежных специалистов в области структурообразования пищевых систем, реологии и механики материалов (Гольдштейн Ю.Б., Зобкова З.С., Малинин Н.Н., Работнов Ю.Н., Петров А.Н., Семипятный В.К., Харитонов В.Д., а также Dou X., Liu Z.B., Ross M.M., Sun J. и др.). Автором проведена глубокая теоретическая проработка вопросов получения многокомпонентных молочных систем, пригодных для 3D-печати.

Выбранные методы исследования (стандартные физико-химические, реологические, статистические, а также оригинальные подходы с использованием функции желательности Харрингтона и моделирования напряжённого состояния) согласуются с поставленными задачами. Экспериментальные результаты получены на сертифицированном оборудовании (3D-принтер FELIX Food Switch Head, универсальная испытательная машина Shimadzu EZ-LX-1) с многократной повторяемостью. Выводы логично следуют из представленных данных и не противоречат современным физико-химическим представлениям. Научные положения, выносимые на защиту, обоснованы теоретически и подтверждены экспериментально.

Достоверность и научная новизна результатов исследования

Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объёмом экспериментальных данных, многократной повторностью и статистической обработкой с использованием критериев Стьюдента и Фишера, применением функции желательности Харрингтона для многокритериальной оптимизации, успешной апробацией в рецензируемых изданиях (4 статьи в журналах из перечня ВАК) и сборниках международных конференций.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем: разработана и обоснована концептуальная модель производства комбинированного 3D-печатного продукта на молочной основе для сегмента NoReCa, интегрирующая геометрические, реологические и технологические параметры. Экспериментально подтверждена определяющая роль массовой доли белка в формировании структурно-механических свойств пищевых чернил; с использованием функции желательности Харрингтона установлены оптимальные диапазоны содержания белка: для чернил на основе СОМ – не менее 22,56 %, для чернил на основе СЦМ – интервал 21,11–24,05 %. Показано, что присутствие жировой составляющей (на примере СЦМ) меняет кинетику деформационных процессов с сигмоидной на экстремальную, что свидетельствует о нелинейном и ранее не описанном влиянии жира на стабильность 3D-печатных форм. Предложен новый методический подход к

оценке прочностных характеристик 3D-продуктов, расширяющий традиционную реологическую оценку показателями напряжения сдвига, сжатия и растяжения; доказана его применимость к продукции аддитивных технологий. На основе теории упругопластических деформаций разработаны теоретические модели, описывающие предельные значения напряжений при переходе материала в пластическое состояние, что позволило количественно оценить запас устойчивости 3D-изделий. Создана математическая и программная модель взаимосвязи геометрических характеристик и упругопластических свойств напечатанного материала, позволяющая решать как прямую задачу (расчёт оптимальных размеров изделия при известных свойствах материала), так и обратную (определение требуемых механических свойств при заданной геометрии).

Анализ содержания работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, основных результатов и раздела с выводами, список сокращений, библиографический список (101 наименование) и четыре приложения. Работа изложена на 122 страницах, содержит 64 рисунка и 14 таблиц.

Введение содержит обоснование актуальности, анализ степени разработанности темы, формулировку поставленной цели и задач, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов диссертации.

Первая глава представляет собой систематический аналитический обзор, в котором рассмотрены перспективы развития 3D-печати в пищевой индустрии, свойства молочных продуктов и их компонентов как сырья для пищевых чернил, факторы, влияющие на качество печати (вязкость, предел текучести, рН, температура), а также основные технологические аспекты аддитивного производства. Автором обоснован выбор экструзионной печати как наиболее подходящей технологии для молочных систем. Выявлено, что, несмотря на успехи в других пищевых отраслях, использование молочных систем в 3D-печати ограничено и недостаточно изучено, что определяет необходимость настоящего исследования.

Вторая глава содержит описание организации экспериментов, схему исследований, перечень объектов (калье, КСБ, СОМ, СЦМ, мёд, соли-плавители), оборудования (3D-принтер, испытательная машина, рН-метр, хроматограф) и методов исследования. Автор использует как стандартные методики контроля молочной продукции, так и оригинальные подходы (анкетирование, SWOT-анализ, испытания на сдвиг, сжатие и растяжение). Приведено описание конструкции камеры для испытаний на сдвиг, что представляет самостоятельный методический интерес.

Третья глава содержит основные экспериментальные результаты. На основе анкетирования 1211 респондентов из 12 стран выявлен портрет потенциального потребителя (35–45 лет, семья с детьми, проживание в

крупных городах, интерес к кулинарным экспериментам). Проведён SWOT-анализ, выявивший больше сильных сторон и возможностей, чем слабых и угроз.

Разработана методология проектирования 3D-модели кубической формы с внутренней полостью в AutoDesk 3ds Max и её трансформация в G-код с последующей корректировкой для оптимизации печати (переход от послойного заполнения к сплошному после 12-го слоя).

Исследованы 6 образцов чернил на СОМ и 6 на СЦМ. Введён коэффициент спонтанной деформации ($K_{сд}$). Показано, что минимальные значения $K_{сд}$ достигаются в определённых диапазонах массовой доли белка. С использованием функции желательности Харрингтона установлены оптимальные интервалы: для СОМ – не менее 22,56 %; для СЦМ – 21,11–24,05 %. Органолептическая оценка выявила преимущество образцов на СОМ (более нежный вкус, отсутствие липкости).

На основе теории упругопластических деформаций разработаны теоретические модели для расчёта напряжений сдвига, растяжения и сжатия в кубической форме. Экспериментально измерены пределы текучести для всех рецептур. Сравнение расчётных и экспериментальных значений показало существенный запас устойчивости (расчётные напряжения значительно ниже пределов текучести).

Разработана модель взаимосвязи геометрических характеристик и упруго-пластичных свойств, реализованная в виде программы для ЭВМ. Представлена технологическая схема производства и рецептура плавленого сыра «ПринтЧиз» с начинкой (мёд). Представлен экономический расчёт.

Практическая значимость результатов

Разработаны и утверждены технические условия на сыр плавленый «ПринтЧиз», что позволяет серийно выпускать продукт. Создана программа для ЭВМ, позволяющая инженерам и технологам рассчитывать оптимальные геометрические параметры 3D-изделий в зависимости от свойств материала или подбирать рецептуру под заданную форму. Технология внедрена в предприятиях сегмента HoReCa (имеются акты внедрения и положительные отзывы). Экономическая эффективность подтверждена расчётом срока окупаемости менее 8 месяцев.

Апробация работы

Основные результаты доложены на международных и всероссийских конференциях. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, включая 4 статьи в журналах из перечня ВАК РФ, 1 монографию, 2 статьи в изданиях, индексируемых РИНЦ, а также 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертации.

Вопросы и замечания по диссертации

В процессе ознакомления с работой возникли следующие вопросы:

1. Каковы критерии выбора предварительного рецептурного состава пищевых «чернил»?
2. На основании каких данных в работе выдвигается гипотеза о «превалирующей роли белка» в формировании потребительских свойств 3D-печатных продуктов?
3. В органолептическую оценку введён дескриптор «цельность» (раздел 3.5). Каковы его количественные критерии? и как он коррелирует с полученными экспериментально значениями коэффициента спонтанной деформации?
4. Часть иллюстративного материала следовало бы перенести в приложение или обобщить в виде таблиц.
5. Какие из разработанных подходов (методология расчёта физико-механических параметров, программы ЭВМ) могут быть применены при осуществлении анализа формоустойчивости 3D-печатных конструктив некубической формы, например, цилиндрической, сферической др.?
6. Чем объясняется выбор мёда в качестве наполнителя изделия. Рассматривались ли другие наполнители и их влияние на гидростатическое давление и устойчивость стенок?
7. Рассматривались ли дополнительные факторы и условия, способствующие увеличению сроков хранения разработанных 3D-печатных изделий?

Указанные вопросы и замечания имеют рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки выполненного диссертационного исследования.

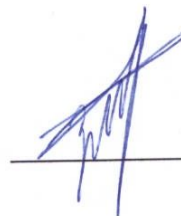
Заключение

Диссертационная работа Архипова Даниила Сергеевича является завершённым научно-квалификационным исследованием, в котором на основании теоретических и экспериментальных данных решена актуальная научно-техническая задача – создание методологии моделирования и разработка 3D-печатного комбинированного продукта на молочной основе для сегмента HoReCa с интегрированным подходом к оценке структурно-механических свойств и геометрической устойчивости.

Автором получены новые фундаментальные данные о влиянии массовой доли белка на коэффициент спонтанной деформации, впервые установлены оптимальные диапазоны содержания белка для чернил на основе СОМ и СЦМ, разработаны теоретические модели напряжённого состояния кубических 3D-изделий, создан программный инструмент для расчёта геометрических параметров, пригодный для практического использования. Доказана эффективность разработанной технологии как с технологической, так и с экономической точек зрения.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9–14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Архипов Данила Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 4.3.3 Пищевые системы (технические науки).

Официальный оппонент:
кандидат химических наук,
младший научный сотрудник
лаборатории № 302 лаб.
гетероцепных полимеров
(ЛГЦП, Отдел высокомолекулярных
соединений)
ФГБУН Институт
элементоорганических соединений
им. А.Н. Несмеянова
Российской академии наук
(ИНЭОС РАН)



к.х.н. Захарова В. А.

Адрес: 119334, г. Москва,
ул. Вавилова, д. 28
Телефон: +7 (499) 135-92-10
E-mail: zaharova@ineos.ac.ru

Подпись к.х.н. Захаровой В.А. заверяю
Ученый секретарь ИНЭОС РАН



к.х.н. Гулакова Е. Н.