

В диссертационный совет 24.2.334.01  
(Д 212.148.02) при ФГБОУ ВО  
«Российский биотехнологический  
университет (РОСБИОТЕХ)»

### **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук, профессора Петрова Сергея Михайловича на диссертационную работу Шибанова Эдуарда Дмитриевича на тему «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы технического зрения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

На отзыв представлены диссертация и автореферат диссертации.

#### **Актуальность темы исследования**

Автоматизация контроля качества пищевой продукции является актуальной задачей, так как от этого зависит восприятие продукта потребителем, его безопасность и возможность масштабирования производства. Шибановым Э.Д. выбрана новая, интересная область для исследований и разработок – пищевые аддитивные технологии. Их перспективность заключается в возможности приготовления персонализированного, индивидуального питания, и на текущий момент, большая часть исследования посвящена разработке рецептур сырья и проектированию подающих устройств. Однако для масштабирования пищевых аддитивных технологий, необходима проработка вопросов безопасности и стабильности качества продукта, получаемого данным способом.

Автором были подняты вопросы автоматизированного контроля органолептических показателей качества шоколадного изделия, создаваемого методом наплавления (fused deposition modeling, FDM) на 3D принтере. Процесс FDM применяется во многих областях, таких как биомедицинская, аэрокосмическая, автомобильная, фармацевтическая, текстильная и энергетическая. Предложенные автором алгоритмы, методы и система контроля способны проводить визуальную оценку состояния печати в режиме реального времени и корректировать настройки технологического процесса, в зависимости от окружающих условий и состояния материала, что исключает

необходимость постоянного присутствия оператора для контроля качества и получения заданного результата качества изделия.

Известные исследования предсказывает, что более 25 % производимых конечных изделий будут продаваться в цифровом виде в виде файлов для 3D-печати, а не физических продуктов. Ожидается, что к 2030 году более 10 % всей прибыли от произведенной продукции будет приходиться на продукты, напечатанные на 3D-принтере. При этом 3D-печать станет более доступной, утонченной, целенаправленной и распространенной. В этой связи рассматриваемая диссертационная работа является актуальной и современной, и представляет несомненный научный интерес.

### **Содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа изложена на 160 страницах и состоит из введения, пяти глав, выводов, заключения, списка используемых сокращений, списка литературы, содержащего в себе 128 наименований (46 из которых на иностранных языках) и 4 приложений.

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель и сформулированы задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, выносимые на защиту положения, сведения об апробации работы и публикациях автора.

В первой главе был проведён анализ предметной области и выбран материал, с которым проводилась дальнейшая работа. Определено понятие качества изделия в рамках данной диссертационной работы. Технологический процесс пищевой 3D печати шоколадом был рассмотрен как объект автоматизации, разработаны функционально-структурные схемы влияния параметров ТП на органолептические показатели качества. Показана необходимость проведения автоматизированного контроля за процессом пищевой 3D печати, а также проведён обзор существующих решений.

Вторая глава посвящена разработке экспериментальной установки для исследования ТП пищевой 3D печати. Был разработан экструдер для работы с шоколадным сырьём. Проведены практические эксперименты по 3D печати шоколадных изделий, осуществлена математическая обработка результатов и построена корреляционная матрица взаимосвязи основных параметров печати. На основании проведённых экспериментов разработана классификация дефектов 3D печати шоколадных тонкостенных фигур, а также по результатам наблюдений, описаны причины их возникновения.

В третьей главе автором были разработаны методы и алгоритмы контроля геометрии печатаемого объекта в режиме реального времени. **Первый** дифференциальный метод контроля основан на сравнении шоколадной фигуры с эталоном. Он позволяет получить значение

относительной погрешности формы фактического изделия. На основании этой оценки возможно обнаруживать глобальные дефекты такие как прекращение подачи, сильная деформация модели и др. При помощи **второго** метода проводится визуальная оценка агрегатного состояния текущего слоя, основанная на изменении цветности материала. **Третий** алгоритм основан на работе искусственной нейронной сети, которая способна распознавать и классифицировать дефекты, возникающие на печатаемом изделии.

Четвёртая глава посвящена разработке системы принятия управленческих решений, в основу которой входит нейрорегулятор. На вход нейрорегулятора подаются параметры печати текущего слоя: информативные параметры, параметры исполнительных механизмов и параметры визуальной оценки органолептических показателей качества (рассмотренные в 3-й главе) для текущего слоя. На выходе формируются параметры управления для исполнительных механизмов, для печати следующего слоя.

В пятой главе рассматривается программная реализация разработанных методов и алгоритмов, а также представлена архитектура всего программно-аппаратного комплекса. Проведён подбор технических средств, необходимых для реализации автоматизированной системы контроля и управления за процессом пищевой 3D печати шоколадных изделий.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы и сформулированы выводы по работе в целом.

В приложениях имеются акты о внедрении результатов работы на производстве и в учебный процесс.

### **Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы, апробация и публикации**

Достоверность и обоснованность теоретических выводов и практических результатов, полученных автором в диссертационной работе, подтверждается корректным использованием методов исследования, результатами апробирования и проведённых экспериментальных исследований, а также обеспечивается применением методов теории автоматизированного управления, математической постановкой задач и валидацией моделей, тщательным всесторонним анализом исследуемого технологического процесса и сравнительным анализом с результатами других исследователей.

Результаты работы изложены в 10 публикациях автора, 4 из которых - публикации в журналах, входящих в перечень ВАК. Основные результаты диссертации были апробированы, обсуждены и доложены в период с 2020 по 2023 года на выставках, научно-практических и научно-технических конференциях всероссийского и международного уровней.

## **Научная новизна**

Представленные в работе результаты, несомненно, обладают научной новизной, которая может быть сформулирована следующим образом:

1. Был проведён комплексный анализ исследуемого ТП, с последующей разработкой функционально-структурной схемы (ФСС) формирования качества, получаемого в процессе 3D печати шоколадного изделия, с указанием факторов, влияющих на органолептические показатели качества.

2. На основании проведённых автором практических экспериментов была предложена классификация дефектов пищевой 3D печати шоколадных фигур, а также проведён анализ и описаны причины их возникновения.

3. Предложен метод оптимизации скорости нанесения слоя материала, основанный на проведении визуальной оценки состояния шоколадной массы в момент печати.

4. Разработана адаптивная система управления параметрами ТП 3D печати с использованием рекуррентной нейронной сети (РНС) и системы технического зрения (СТЗ).

## **Практическая значимость**

Практическая значимость диссертационной работы Шибанова Э.Д. заключается:

- в разработанном интеллектуальном датчике визуального контроля органолептических показателей качества (форма и внешний вид) во время построения изделия, что позволяет распознавать внештатное протекание ТП и детектировать дефекты, в случае их возникновения;

- в предложенном методе автоматизированной визуальной оценки состояния наносимого сырья в процессе 3D печати, что позволяет оптимизировать скорость нанесения следующего слоя материала;

- в разработанной адаптивной системе коррекции управляющих параметров ТП пищевой 3D печати шоколадом в режиме реального времени, основанной на рекуррентной нейронной сети, что позволяет исключить необходимость постоянного присутствия оператора, контролирующего весь процесс;

- в разработанной базе данных, хранящей записи о режимах и результатах пищевой 3D печати, позволяющей проводить сбор и накопление информации, с целью дальнейших исследований в области пищевых аддитивных технологий;

- в предложенных математических моделях, технических решениях, разработанном программном обеспечении и реализации автоматизированной системы контроля и управления процессом пищевой 3D печати шоколадных десертов.

## Замечания по диссертационной работе

1. Во введении автор утверждает, что «разработанные в настоящей диссертационной работе алгоритмы и методы визуального контроля состояния печатаемого продукта являются универсальными и могут быть использованы для автоматизированного контроля ТП 3D печати другими пищевыми ингредиентами». Необходимо более подробное пояснение.

2. Из текста диссертации не ясно, что имеет ввиду автор, говоря «если шоколад застыл, а печать всё ещё продолжается, значит есть потенциал для ускорения печати» (стр.79)? Это значит, что принтер печатает уже застывшим шоколадом? Как такое возможно? Требуется разъяснение.

3. На стр. 45 используется понятие «ретракт», однако отсутствует его объяснение.

4. В разделе 3.2.4, на рисунке 3.10 представлен алгоритм работы модуля визуальной оценки состояния шоколадной массы на текущем слое, в конце которого выполняется «сравнение с эталоном», и, если значение равно – устанавливается флаг «состояние слоя». А в тексте работы говорится о понятии «порог чувствительности». Необходимо разъяснить, что имелось ввиду.

5. Не указана погрешность термостатирования шоколадной массы при  $T=36\text{ }^{\circ}\text{C}$  (таблица 2.1.) в экструдере с использованием термистора NTC-100k.

6. Степень обдува шоколадного изделия, указанная в качестве регулируемого параметра управления, в одном случае выражается уровнем мощности, подаваемой на вентилятор (стр. 106), а в табл. 5.2 (стр. 125)  $V_{\text{обдува}}$  имеет размерность %. В обоих случаях существует неопределенность данного параметра для его воспроизведения в других устройствах 3D печати.

7. В работе очень часто встречаются словосочетания «пищевая 3D печать шоколадом», «технологический процесс пищевой 3D печати» и т.д. Следовало бы сократить эти формулировки, заменить аббревиатурами, либо исключать в участках текста, в которых и так по смыслу понятно, о чем идёт речь.

8. Хотя в целом работа написана технически грамотным языком, но по тексту диссертации встречаются неудачные формулировки: «пастообразными и полужидкими растворами», с.17; «правильную внутреннюю структуру материала» в процессе отверждения, с. 25 и др.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы автора.

## Заключение

Обобщая результаты анализа оппонируемой диссертации, автореферата и публикаций автора следует отметить, что представленная работа является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выносимые на защиту. Область исследований, выбранная автором, является новой, актуальной и имеет важное значение для развития направления пищевых аддитивных технологий.

Работа соответствует пунктам 2, 3, 4, 6, 11, 12 паспорта специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Автореферат диссертации полностью отражает содержание работы.

Диссертационная работа «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы технического зрения» соответствует требованиям п. 9 – 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 18.03.2023 г.), а её автор, Шибанов Эдуард Дмитриевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры «Системы автоматизированного управления» ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ)», доктор технических наук (05.18.12 – Процессы, машины и агрегаты пищевой промышленности), профессор

Петров Сергей Михайлович



«01» 12 2023 г.

Адрес: РФ, 123007, г. Москва, пр. 3-й Хорошевский, д. 1, к. 3, пом. №309.

Телефон: 8(495)640-54-36 доб. 4460, 4461

E-mail: [s.petrov@mgutm.ru](mailto:s.petrov@mgutm.ru)

Подпись Петрова С.М. заверяю:

И.о. Декана ФУТ Лихачев В.В.

«01» декабря 2023г.

