

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной и  
инновационной деятельности  
ФГАОУ ВО «МАУ»

доктор экономических наук,  
канд. физ.-мат. наук, доцент  
Гогоберидзе Георгий Гививич



30.11.2023г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Мурманский арктический университет» (ФГАОУ ВО «МАУ») на диссертационную работу Шибанова Эдуарда Дмитриевича «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 в диссертационный совет 24.2.334.01 (Д 212.148.02), созданный на базе ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ».

На отзыв представлены диссертация и автореферат.

#### **Актуальность темы диссертационной работы**

Аддитивные технологии являются перспективным и важным направлением для стратегического развития страны, а пищевая 3D-печать относится к формирующимся рынкам будущего. Способность 3D-принтера печатать пищевой продукт с заданным составом актуальна при создании персонализированного питания. В последнее десятилетие интерес учёных к данной области непрерывно растёт. Преимущественно, исследования посвящены вопросам разработки новых рецептур сырья, на основе мучных, мясных, рыбных и растительных компонентов, а также разработке подающих механизмов – экструдеров. Большинство пищевых 3D-принтеров представляют собой прототипы, которые используются в лабораториях и не доступны для большинства пользователей.

Для массового применения пищевых аддитивных технологий необходимо проводить контроль качества получаемых блюд (микробиологические, органолептические и физико-химические показатели), чтобы обеспечить для потребителей товарный вид и безопасность продукции. На пищевых производствах такой контроль осуществляют специалисты, однако, данный способ не применим при использовании персональных пищевых 3D-принтеров.

Проведение такого контроля должно быть организовано в автоматизированном режиме непосредственно на месте приготовления пищи.

Исходя из этого, исследования, проводимые в области автоматизированного контроля технологического процесса пищевой 3D-печати, являются актуальными и перспективными, а предложенные автором алгоритмы и методы автоматизированного контроля, а также разработанная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D-печати шоколадом представляет особый научный интерес.

### **Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и достоверность результатов исследований**

Достоверность научных положений и обоснованность представленных в диссертационной работе результатов научного исследования, сформулированных на их основе выводов и рекомендаций, обеспечивается тщательной проработкой моделей исследуемого технологического процесса, применением классических положений и формализованных методов теории автоматического управления, математической постановкой решаемых задач, проводимыми экспериментами, а также результатами, полученными на основе методов, разработанных другими авторами.

Основные научные результаты и положения диссертационной работы Шибанова Э.Д. опубликованы в 10 работах, из которых 4 статьи – в российских рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Основные результаты диссертации апробированы, обсуждены и доложены в период с 2019 по 2023 год на всероссийских и международных научно-практических конференциях различного уровня.

### **Научная новизна работы**

Представленные результаты работы являются итогом исследований и разработок в области пищевых аддитивных технологий, проводимых лично автором и при его непосредственном участии в 2019-2023 гг. Научная новизна заключается в следующем:

- 1) Разработана функционально - структурная схема формирования качества получаемого блюда в процессе пищевой 3D-печати шоколадом с указанием факторов, влияющих на органолептические показатели качества.
- 2) Проведены экспериментальные исследования технологического процесса пищевой 3D-печати шоколадом, проведена математическая обработка результатов эксперимента рассматриваемого технологического процесса. Проведённые исследования позволили выявить основные типы возникающих дефектов, на основе которых предложена классификация, а также отмечены причины возникновения.

3) Разработан алгоритм оптимизации скорости выращивания трёхмерного изделия, основанный на проведении визуальной оценки состояния шоколада в процессе печати.

4) Разработана адаптивная система управления параметрами технологического процесса пищевой 3D-печати с использованием искусственных нейронных сетей и системы технического зрения.

### **Практическая значимость**

В рамках диссертационной работы разработаны и предложены: метод автоматизированной визуальной оценки состояния сырья в процессе пищевой 3D-печати, позволяющий оптимизировать скорость нанесения материала; интеллектуальный датчик визуального контроля органолептических показателей качества (внешний вид, форма, цвет, целостность) в режиме реального времени с использованием нейросетевых технологий, позволяющий распознавать внештатное протекание технологического процесса, классифицировать дефекты и выявлять брак; автоматизированная система коррекции управляющих параметров технологического процесса пищевой 3D-печати шоколадом в режиме реального времени на основе рекуррентной нейронной сети, позволяющая контролировать протекание технологического процесса без необходимости постоянного присутствия оператора; технические решения для реализации интеллектуальной автоматизированной системы управления органолептическими показателями качества в процессе пищевой 3D-печати; база данных, информационное, математическое и программное обеспечения автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ) технологическим процессом (ТП) пищевой 3D-печати шоколадом.

Разработанный программно-аппаратный комплекс может быть использован в научно-исследовательских работах, направленных на изучение технологического процесса пищевой 3D-печати, в том числе для работы с новыми ингредиентами. Предложенные технологии могут быть использованы в промышленности.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Представленная работа построена по традиционному принципу и состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов работы, списка сокращений, списка литературы, списка иллюстративного материала и четырёх приложений.

Диссертационная работа изложена на 160 страницах, иллюстрирована 43 рисунками, содержит 10 таблиц. Список литературы включает 128 источников, в том числе 46 – на иностранных языках. В 4 приложениях содержатся акты о внедрении в учебный процесс и производство.

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** проведён аналитический обзор источников научной литературы в области повышения качества изделий, полученных методом 3D-печати, и определены основные положения. Технологический процесс пищевой 3D-печати шоколадом рассмотрен как объект автоматизации и показана необходимость автоматизированного контроля. Проведена классификация основных операций ТП, разработаны функционально-структурные схемы влияния регулируемых параметров на качество шоколадных изделий, получаемых методом 3D-печати. Выбраны и обоснованы наиболее информативные показатели качества: форма и состояние верхнего слоя. Изучен опыт применения интеллектуальных технологий и систем компьютерного зрения в промышленности, а также в других областях аддитивного производства.

**Вторая глава** посвящена проведению экспериментальных исследований. Для этого была разработана лабораторная установка для пищевой 3D-печати на основе 3D-принтера iSL Mini. Проведён обзор существующих конструкций и механизмов подачи пищевого материала, отмечены их достоинства и недостатки. Изготовлен экструдер для пищевой 3D-печати шоколадной массой. Проведены экспериментальные исследования технологического процесса изготовления на 3D-принтере тонкостенных шоколадных изделий. Проведена математическая обработка результатов и установлены взаимосвязи параметров печати. На основе анализа распечатанных образцов разработана классификация дефектов, возникающих в процессе печати шоколадных изделий, а также описаны причины их возникновения.

**В третьей главе** разработаны методы автоматизированного визуального контроля органолептических показателей качества печатаемых шоколадных изделий.

Предложен алгоритм контроля формы изделия с помощью сравнения объекта с эталоном. Описан метод коррекции эталонного трёхмерного объекта на основе информации об изделии по части исполняемой программы. Рассмотрены основы формирования изображения, а также приведены математические формулы, связывающие системы координат принтера и эталонного изображения.

Предложен метод контроля агрегатного состояния нанесённого материала на основе анализа его оттенка. Поставлена математическая задача нахождения оптимальной скорости печати для каждого слоя в зависимости от визуальной оценки его состояния. На основании этого предложен алгоритм адаптивного управления скоростью.

Разработан модуль детекции поверхностных дефектов пищевой 3D-печати шоколадных изделий. Проведён обзор существующих архитектур нейронных сетей для работы с изображениями и выбрана современная модель YOLO v8. Подготовлена обучающая выборка и выполнено обучение нейронной сети для сегментации изображения. Разработанные модули позволяют комплексно решить задачу визуального контроля протекающего ТП 3D-печати.

*Четвёртая глава* посвящена разработке системы принятия решений для адаптивного управления ТП на основании информации, получаемой с датчиков и модулей органолептической оценки показателей качества. Определены ключевые параметры, используемые в системе АСКУ ТП пищевой 3D-печати, возможность воздействия на них в процессе печати, проведена их классификация. Рассмотрены базовые способы нейроуправления, на основании которых представлена схема внедрения нейронной сети в ТП пищевой 3D-печати шоколадом. Проведён обзор рекуррентных нейронных сетей. Разработана архитектура нейрорегулятора, основанного на рекуррентной нейронной сети с применением ячеек LSTM. Представлена структура данных для обучения нейронной сети.

*Пятая глава* посвящена технической и программной реализации АСКУ ТП пищевой 3D-печати шоколадных изделий, а также интеграции в систему управления 3D-принтером. Рассмотрены библиотеки, модули и программные компоненты, использованные при разработке ПО. Сконфигурирована и обучена нейронная сеть для сегментации и детекции поверхностных дефектов. Разработана база данных в системе MySQL для возможности функционирования АСКУ ТП 3D-печати шоколадом. Предложен способ интеграции АСКУ ТП в систему 3D-принтера, проведён выбор управляющей платы АСКУ ТП, материнской платы 3D-принтера, используемых видеокамер. Разработаны архитектура ПО и пользовательский интерфейс для управления АСКУ ТП пищевой 3D-печати шоколадных изделий.

В *заключении* работы сформулированы выводы по диссертационному исследованию.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертационной работы и отражает все необходимые положения в соответствии с требованиями ВАК РФ.

Диссертационная работа соответствует пунктам 2, 3, 4, 6, 11, 12 паспорта специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Диссертационная работа Шибанова Эдуарда Дмитриевича на тему «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы

технического зрения» имеет внутреннее единство изложения. Представленные в работе результаты являются перспективными для науки и производства.

### **Замечания по работе.**

По содержанию диссертационной работы и автореферата диссертации имеются следующие замечания:

- 1) В третьей главе предложен алгоритм оптимизации скорости печати в зависимости от состояния наносимого слоя, в четвёртой главе разработана нейросетевая система управления параметрами печати. Из текста диссертации неясно, каким образом взаимодействуют эти два алгоритма.
- 2) В тексте диссертации нет пояснений, каким образом предложенная система АСКУ ТП будет работать с другими 3D-принтерами.
- 3) Почему в качестве прошивки материнской платы 3D-принтера была выбрана Marlin? Существуют более прогрессивные варианты, например, Lerdge или Klipper.
- 4) В новизне диссертации написано, что разработан алгоритм оптимизации скорости выращивания трехмерного изделия. При этом в тексте работы не приведен критерий оптимальности.
- 5) Из текста диссертации неясно, что соискатель понимает под терминами «режим реального времени» и «цифровой двойник» (стр. 103).
- 6) В работе описана методика получения матрицы эталонного изображения путем реконструкции трехмерной модели из G-кодов. В чем состоит новизна предлагаемого решения?
- 7) Из текста диссертации следует, что предлагаемый метод оценки степени сходства сравнивает изображение текущего напечатанного слоя с ожидаемым видом слоя (эталонном). При таком подходе дефект будет зафиксирован по окончании процесса печати слоя и устранить его уже будет невозможно, а дальнейшая печать будет нецелесообразна.
- 8) В работе встречается ряд орфографических ошибок и смысловых неточностей.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не снижают научную и практическую ценность выполненной Шибановым Эдуардом Дмитриевичем работы.

**Заключение.** Диссертационная работа «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D-печати шоколадом с использованием системы технического зрения» соответствует требованиям пунктов 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 26.10.2023 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.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры автоматики и вычислительной техники ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет» – протокол № 3 от 16.11.2023 г.

Отзыв подготовлен:

Заведующий кафедрой  
автоматики и  
вычислительной техники



доктор технических наук, доцент  
Кайченов Александр Вячеславович

Сведения об университете:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский арктический университет»

Адрес: 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д.13.

Телефон: +7 (815-2) 40-32-01

Адрес электронной почты: [office@mauniver.ru](mailto:office@mauniver.ru)