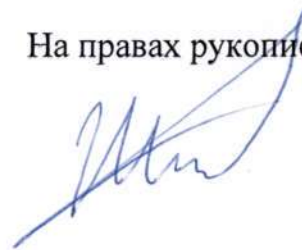


На правах рукописи



Шибанов Эдуард Дмитриевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ
ШОКОЛАДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)».

- Научный руководитель:** **Благовещенский Иван Германович**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Российский биотехнологический университет
(РОСБИОТЕХ)», профессор кафедры
«Информатика и вычислительная техника
пищевых производств».
- Официальные оппоненты:** **Петров Сергей Михайлович**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет
технологий и управления им. К.Г. Разумовского
(ПКУ)», профессор кафедры систем
автоматизированного управления
Копейкин Роман Евгеньевич,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет им Н. Э. Баумана», доцент кафедры
«Автономные информационные и управляющие
системы»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «**Мурманский арктический
университет**»

Защита состоится «28» декабря 2023 г. в 11 час. 00 мин. на заседании Диссертационного Совета 24.2.334.01 (Д212.148.02) при ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет» по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д.33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» и на сайте: <http://www.mgupp.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 11. ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ»

Автореферат разослан «21» ноября 2023 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета 24.2.334.01 (Д 212.148.02),

кандидат технических наук



Мокрушин С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Внедрение аддитивных технологий в различные отрасли современной промышленности и секторов малого бизнеса является одним из перспективных направлений развития инноваций. За последнее десятилетие возможности 3D печати значительно возросли, а спектр доступных материалов постоянно расширяется, отвечая самым нетривиальным запросам. Одним из примеров является использование пищевых ингредиентов для создания съедобных блюд при помощи 3D принтера.

На текущий момент пищевая 3D печать является малоизученной областью, однако привлекает внимание исследователей по всему миру, что подтверждает большое количество научных работ, посвящённых данной теме. Уже сейчас активно разрабатываются технологии 3D печати мясных, рыбных, мучных блюд, а также блюд на основе растительного сырья и т.д.

В стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030г. пищевые аддитивные технологии относят к формирующимся рынкам будущего. Их потенциал заключается, в возможности создавать индивидуальное персонализированное питание с заданными свойствами. Это открывает огромные перспективы для обеспечения функционального и индивидуального питания для большей доли населения страны.

Стоит заметить, что для повсеместного применения пищевых аддитивных технологий, в первую очередь, необходимо обеспечить безопасность получаемого продукта и обеспечить должный контроль качества каждого приготовленного блюда. Такое питание должно отвечать «органолептическим показателям качества». Для этого требуется контролировать качество используемого сырья, степень приготовления блюда, а также его «товарный вид».

Для решения задачи автоматизированного контроля технологического процесса пищевой 3D печати был выбран, исследован и проанализирован один из наиболее распространенных и доступных на текущий момент материалов – шоколад. Пищевая 3D печать шоколадом позволяет получать уникальные изделия, необычной и сложной формы, однако, параметры и настройки печати сильно зависят от формы печатаемого объекта, вида шоколада, температуры окружающей среды, скорости нанесения материала и т.д. Множество параметров и температурных настроек, которые влияют на результат и качество процесса 3D печати, на текущий момент подбираются оператором 3D принтера вручную для каждой конкретной марки шоколада. Это достаточно длительный и кропотливый процесс, требующий значительного количества времени и сырья. Именно по этой причине контролируемым объектом стал шоколад, как наиболее сложный в

настройке и в печати материал. Были изучены работы посвящённые 3D печати шоколадом и шоколадной глазурью, а также учтены практические рекомендации предыдущих авторов.

На сегодняшний день накоплен небольшой теоретический и практический объём информации по автоматизации контроля за процессом 3D печати, изложенный в работах (Delli U., Chang S., Holzmond O., Li X., Jin Z., Zhang Z., Gu G. X., Kazemian A., Yuan X., Davtalab O., Khoshnevis B., Malik A., Lhachemi H., Ploennigs J., Ba A., Shorten R.).

Однако, остаются не затронуты вопросы автоматизации управления качеством пищевой 3D печати. Не решён ряд проблем, связанных с созданием интеллектуальных автоматизированных систем контроля и управления органолептическими показателями качества 3D печати сложными многокомпонентными пищевыми массами.

Изложенное позволяет сделать вывод об актуальности темы диссертационной работы «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы технического зрения», а также актуальной научно-технической задачей специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.3, а именно пунктам: «2. Автоматизация контроля и испытаний», «3. Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.», «4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами», «6. Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами», «11. Методы создания, эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая базы данных и методы их оптимизации, промышленный интернет вещей, облачные сервисы, удаленную диагностику и мониторинг технологического оборудования, информационное сопровождение жизненного цикла изделия», «12. Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени».

Целью диссертационной работы является повышение эффективности контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати

шоколадом по средствам разработки интеллектуального модуля с применением ИНС и СТЗ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

1. Провести системный анализ методов и технических средств ТП пищевой 3D печати шоколадом.
2. Разработать лабораторную установку для пищевой 3D печати шоколадом, обеспечивающей стабильную подачу материала.
3. Провести теоретические и экспериментальные исследования технологического процесса пищевой 3D печати шоколадом и его математическое описание.
4. Разработать алгоритмы и методов автоматизированного контроля органолептических показателей качества технологического процесса пищевой 3D печати шоколадом в режиме реального времени в стационарных условиях при помощи системы технического зрения (СТЗ).
5. Разработать модели и методы автоматизированного управления ТП пищевой 3D печати шоколадом с применением нейросетевых технологий.
6. Провести интеграцию и адаптацию интеллектуального датчика в ТП пищевой 3D печати шоколадом.
7. Осуществить программную реализацию разработанных решений в систему управления процессом пищевой 3D печати шоколадом.

Объектами исследования являются 3D принтеры для пищевой 3D печати шоколадом.

Предметом исследования является совокупность теоретических, методологических и практических задач, связанных с разработкой интеллектуальной автоматизированной системы контроля и управления качеством пищевой продукции в процессе пищевой 3D печати шоколадом, и разработка соответствующего информационного, математического, алгоритмического и программного обеспечения.

Методы и средства исследований. Для проведения научных исследований в качестве лабораторной установки был использован 3D принтер ISL – Mini. Дополнительно для него был разработан пищевой экструдер для 3D печати шоколадом и установлен вместо штатного. Поставленные в работе задачи решены с использованием методологических и математических основ интеллектуальных систем управления, методики построения реляционных баз данных, основных положений теории автоматического управления, теории нейронных сетей, теории цифровой обработки изображений, элементов теории искусственного интеллекта. Численная и графическая обработка результатов исследований производилась с применением MS Excel, разработка ПО проводилась в среде PyCharm CE.

Научная новизна и теоретическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана функционально - структурная схема (ФСС) 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 ТП. Проведённые исследования позволили выявить основные типы возникающих дефектов, на основе чего была предложена их классификация, а также по результатам наблюдений и анализа были отмечены причины их 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 пищевой ТП 3D печати с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) и системы технического зрения (СТЗ).

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан метод автоматизированной визуальной оценки состояния сырья, в процессе 3D печати, что позволяет оптимизировать скорость нанесения материала.

2. Разработан интеллектуальный датчик визуального контроля органолептических показателей качества (внешний вид, форма, цвет, целостность) в режиме реального времени с применением нейросетевых технологий, позволяющий распознавать внештатное протекание ТП, классифицировать дефекты и выявить брак.

3. Разработана автоматизированная система коррекции управляющих параметров ТП пищевой 3D печати шоколадом в режиме реального времени на основе рекуррентной нейронной сети. Применение данной системы позволит контролировать протекание технологического процесса пищевой 3D печати шоколадом без необходимости постоянного присутствия оператора.

4. Проработаны технические решения для реализации интеллектуальной автоматизированной системы управления органолептическими показателями качества в процессе пищевой 3D печати. Осуществлен подбор технических средств. Использование данных решений возможно и в других направлениях пищевой 3D печати, в том числе при работе с другими пищевыми ингредиентами.

5. Разработана база данных АСКУ ТП пищевой 3D печати шоколадом. Использование предложенной базы данных позволяет аккумулировать информацию о всех протекающих процессах, с целью проведения дальнейших исследований.

6. Разработано информационное, математическое и программное обеспечение интеллектуальной автоматизированной системы управления технологическим процессом пищевой 3D печати.

Разработанная автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой трёхмерной печати, а также созданные методы, модели, алгоритмы и программные компоненты прошли апробацию и были переданы для внедрения на кондитерских предприятиях Холдинга «Объединенные кондитеры», что подтверждается соответствующими актами внедрения научно-технической продукции.

Разработанный программный модуль, предназначенный для управления процессом пищевой 3D печати, прошёл апробацию и внедрён в Лабораторию пищевых аддитивных технологий технопарка «Superfood технологии» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ».

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.

Научные и практические результаты, полученные в рамках настоящего исследования, внедрены в учебном процессе кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет» при подготовке бакалавров направлений 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 27.03.04 «Управление в технических системах», а также магистров направлений 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» и 27.04.04 «Управление в технических системах». Имеется соответствующий акт внедрения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы, модели и методы визуального контроля органолептических показателей качества шоколадных изделий, получаемых в процессе пищевой 3D печати, в режиме реального времени.
2. Адаптивный алгоритм оптимизации скорости выращивания шоколадных изделий в технологическом процессе пищевой 3D печати.
3. Интеллектуальный датчик визуального контроля, позволяющий распознавать дефекты, провести классификацию и выявить брак.

4. Автоматизированная система коррекции управляющих параметров ТП пищевой 3D печати шоколадом в режиме реального времени на основе рекуррентной нейронной сети.
5. Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати.

Личный вклад автора.

Представленные результаты работы являются итогом продолжительных исследований и разработок в области пищевых аддитивных технологий, проводимых лично автором и при его непосредственном участии в 2019 – 2023 гг.

Степень достоверности 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 автоматизированного управления, математической постановкой решаемых задач, проводимыми экспериментами, а также результатами, полученными на основе методов, разработанных другими авторами.

Апробация работы.

Основные результаты проведённых исследований и разработок были представлены на международных и всероссийских научно-практических конференциях: НПК с международным участием «Современные проблемы автоматизации технологических процессов и производств» - РОСБИОТЕХ, 2023; Международная специализированная конференция-выставка «Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности» - РОСБИОТЕХ, 2023; Международный научно-практический Форум Россия в XXI Веке: Глобальные вызовы, риски и решения в молодёжной секции в рамках РосБиоТех, 2022; 40 международный конкурс научно-исследовательских работ, 2021; IV Московский технологический форум - 2021; Международная специализированная конференция-выставка «Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности» - РОСБИОТЕХ, 2020; XV Всероссийский Фестиваль НАУКА 0+, 2020.

Результаты отдельных исследований, а также сама научно-квалификационная работа не раз представлялись и получали одобрение на

расширенных заседаниях кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ».

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 4 работы в рецензируемых научных периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы (128 источников, из которых 46 на иностранных языках) и 4 приложений. Работа изложена на 160 страницах, содержит 43 рисунка и 10 таблиц. В приложениях представлены акты о внедрении в учебный процесс и на производство.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении была обоснована актуальность темы диссертационного исследования, охарактеризована степень её проработанности, поставлена цель и определены задачи исследования. Осуществлён выбор предмета и объекта исследования, а также показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведён анализ предметной области. Изучена технология пищевой 3D печати шоколадных изделий, в результате чего определён ряд проблем, одни из которых:

- отсутствие методики и средств контроля качества продукта в области пищевой 3D печати;
- сложность в настройке и управлении технологическим процессом пищевой 3D печати ввиду постоянного изменения свойств используемого сырья (реология, влияние окружающей среды, геометрии печатаемой модели и т.д.);
- нестабильность результатов печати, при заданных настройках технологического процесса.

Определены понятия органолептических показателей качества пищевой 3D печати, рассматриваемые в рамках данного исследования.

Обоснована необходимость автоматизированного контроля ТП в режиме реального времени и применение интеллектуальных технологий. Было проведено детальное исследование технологического процесса пищевой 3D печати. Определены основные операции ТП и факторы, влияющие на проведение каждого этапа. Разработана функционально-структурная схема влияния всех операций ТП и факторов на качество конечного изделия (рисунок 1). Проведено исследование технологического процесса пищевой 3D печати шоколадных изделий, как объекта автоматизации.

Проведён анализ работ, посвящённых автоматизированному контролю технологического процесса 3D печати в машиностроительной отрасли. Изучен опыт применения автоматизированных систем контроля в других областях аддитивного производства. Также были изучены современные методы органолептических показателей качества с использованием интеллектуальных технологий и систем технического зрения (СТЗ), применяемых на промышленных производствах.

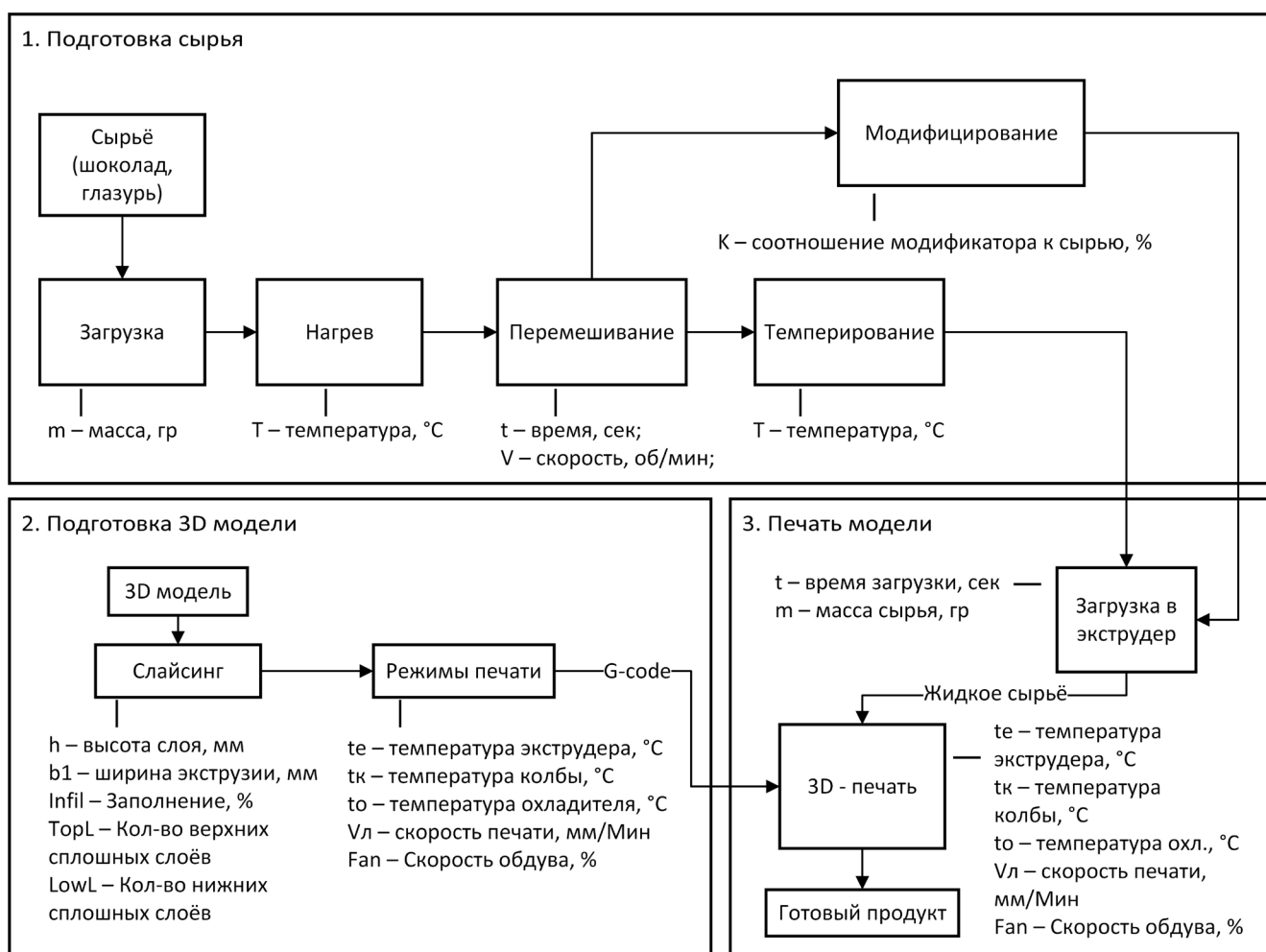


Рисунок 1. Функционально-структурная схема влияния параметров печати на результат.

Вторая глава посвящена разработке экспериментальной установки и проведению экспериментальных исследований ТП пищевой 3D печати шоколадных изделий.

Было разработано описание технологического процесса пищевой 3D печати шоколадом в нотации IDEF0, с указанием всех необходимых компонентов, требуемых для проведения практических экспериментов.

Проведён обзор основных типов подающих механизмов – экструдеров, способных работать с шоколадом. На основании изученной информации

разработан экструдер для печати пастообразными ингредиентами и установлен на 3D принтер ISL – Mini (рисунок 2).

Были проведены экспериментальные исследования 3D печати шоколадных образцов, с целью выявления математических взаимосвязей между параметрами печати и качеством напечатанного продукта. Для проведения исследования была разработана тонкостенная 3D модель, позволяющая наглядно оценить степень влияния регулируемых параметров.



Рисунок 2. Модернизированный 3D принтер ISL – Mini для печати шоколадных изделий.

Было проведено около 40 экспериментов, послуживших основой для получения числовых данных о ходе технологического процесса. Результаты экспериментов были математически обработаны. Проведён корреляционный анализ, позволивший установить наличие зависимости качества печати от переменных параметров. В таблице 1 представлена корреляционная матрица характеристик связей параметров ТП.

Таблица 1 - Корреляционная матрица характеристик связей

	Высота слоя, X1	Скорость печати, X2	Время печати, X3	Качество, Y
Высота слоя, X1	1	-0.83306	0	0
Скорость печати, X2	-0.83306	1	-0.56379	-0.51854
Время печати, X3	0	-0.56379	1	0.789008
Качество, Y	0	-0.51854	0.789008	1

На основании полученных данных (таблица 1) сделан вывод о существующих взаимосвязях. Для выбора оптимальных параметров и режимов протекания ТП пищевой 3D печати шоколадной массой необходимо учитывать, что скорость печати зависит от высоты наносимого слоя и напрямую влияет на качество и время печати. Качество сильно коррелирует со временем печати. Увеличение времени печати слоя приводит к повышению степени охлаждения наносимого материала, и вследствие к более точной геометрии получаемой фигуры.

В результате проводимых экспериментов была разработана классификация дефектов, возникающих в процессе пищевой 3D печати шоколадной массой тонкостенных фигур (таблица 2), а также проанализированы причины их возникновения.

Таблица 2 - Классификация дефектов

№	Тип дефекта	Характерные признаки	Причины возникновения
1	Переохлаждение		- Низкая температура печатающей головки - Высокая интенсивность охлаждения
2	Перегрев		- Высокая температура экструдера - Высокая скорость нанесения материала - Малая площадь слоя

3	Неравномерная экструзия, волнистая стенка		- Критически малый объём подаваемого материала - Высокая скорость нанесения - Несопоставимо большой диаметр сопла по отношению к высоте наносимого слоя
4	Пропуск экструзии		- Неоднородная структура сырья - Наличие примесей или пузырьков воздуха
5	Отсутствие подачи	Экструдер перемещается в холостую. Модель не строится.	- Возникновение пробки из-за низкой температуры - Наличие примесей в сырье - Отсутствие материала

Полученная классификация является основой для разработки модуля детекции поверхностных дефектов.

Третья глава посвящена разработке методов, алгоритмов и моделей контроля за ходом технологического процесса пищевой 3D печати шоколадом. Для решения этой задачи использована система технического зрения.

Контроль формы изделия

Модуль контроля формы позволяет обнаруживать значимые проблемы ТП, такие как прекращение подачи, сильный перегрев и т.д. Контроль геометрии печатаемого объекта предлагается путём сравнения двух изображений (эталона и результата печати).

Для этого фактическое изображение печатаемого объекта было представлено в виде матрицы $F(i, j)$, а эталонное изображение – в виде матрицы $E(i, j)$. Тогда, относительная погрешность геометрии построенного объекта находится по формуле (1.1):

$$\delta_E = \sum_i \sum_j \frac{[F(i, j) - E(i, j)]}{[E(i, j)]} * 100\% \quad (1.1)$$

Была предложена методика получения матрицы эталонного изображения, путём реконструкции трёхмерной модели из G-Code (рисунок 3).

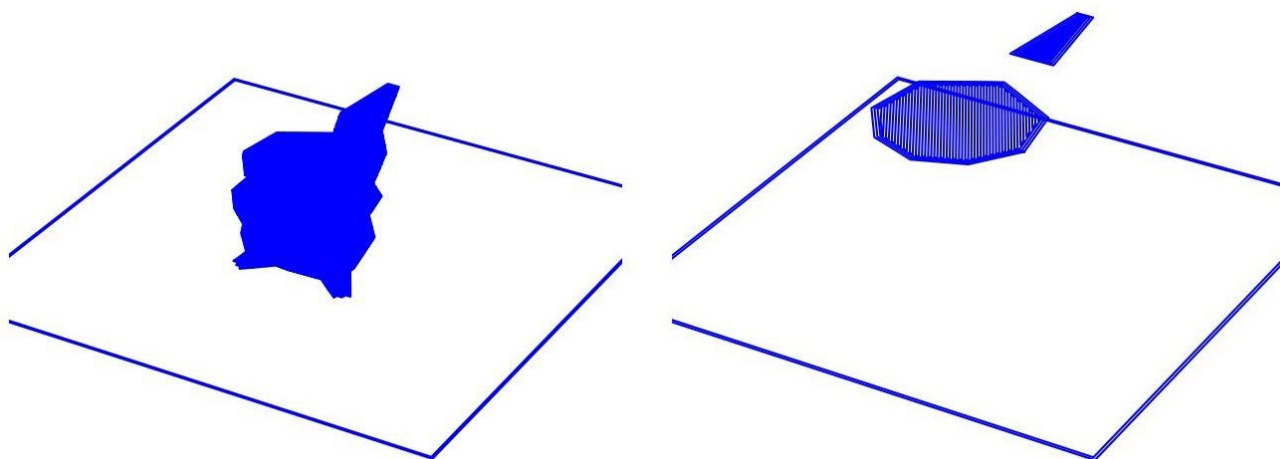


Рисунок 3. Пример построения трёхмерной реконструкции эталонной модели.

Использование данного модуля позволяет выявлять значимые проблемы протекания текущего ТП 3D печати шоколадом. Информация, полученная с камер, предварительно обрабатывается и попадает в модуль контроля формы изделия (рисунок 4).

Параллельно с этими данными поступает информация о текущем слое из файла G-Code. Это позволяет воссоздавать виртуальную трёхмерную модель текущей печати, так называемый эталон, который должен быть напечатан к текущему слою. Далее происходит поворот эталонной трёхмерной модели на соответствующий угол для получения эталонного изображения. После чего происходит сравнение двух изображений: фотографии с камеры и изображения идеального отпечатка, воссозданного по G-Code. В результате работы данного модуля на выходе появляется число от 0 до 1, характеризующее степень сходства.

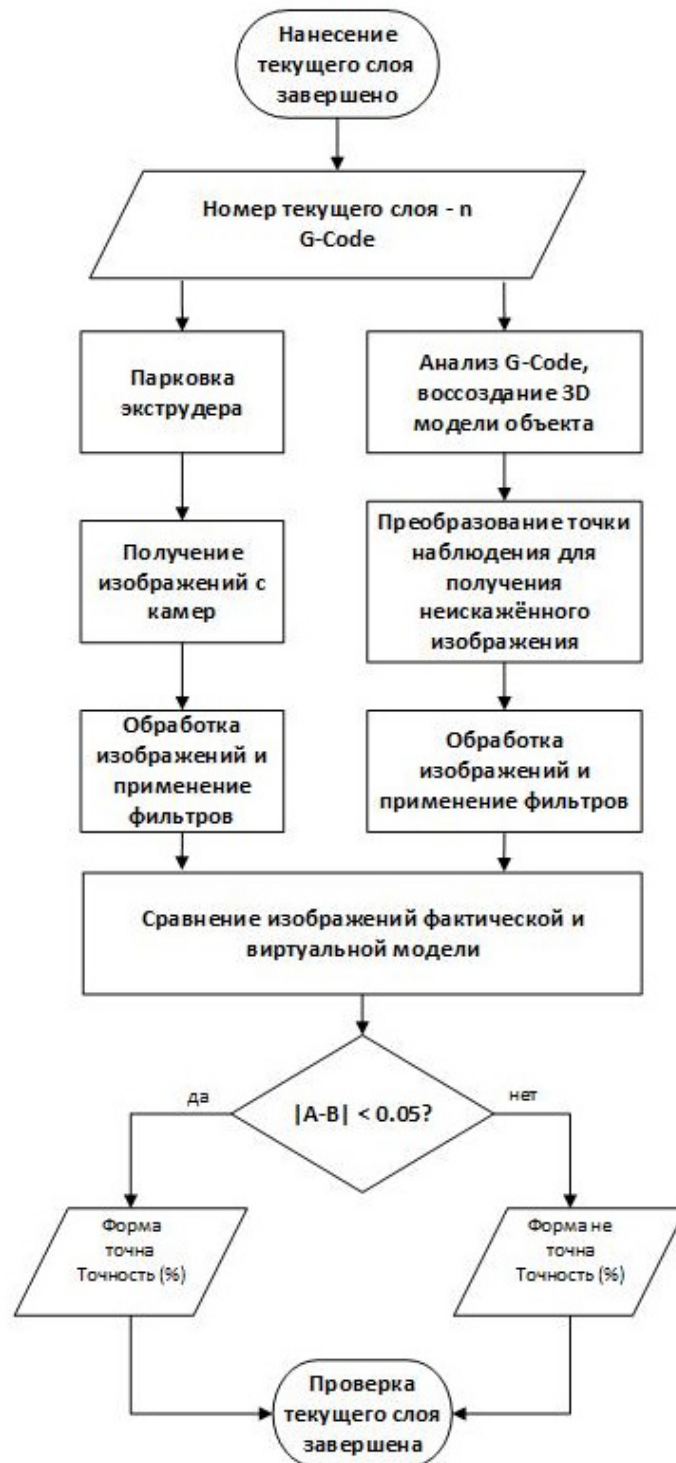


Рисунок 4. Алгоритм работы модуля контроля формы изделия.

Разработанный модуль позволяет реагировать на такие проблемы, как пропуск печати, перегрев материала, переохлаждение (искажение формы) и д.р.

Модуль оптимизации скорости печати

Анализ проведённых нами ранее исследований показал, что одной из проблем 3D печати шоколадом является низкая скорость застывания материала. В результате чего, печать одного изделия занимает довольно длительное время. В

противном случае, при увеличении скорости печати повышается вероятность возникновения поверхностных дефектов.

Для увеличения скорости 3D печати шоколадных десертов был разработан алгоритм (рисунок 5), который способен оценить степень застывания верхнего слоя печати и предложить оптимальную скорость, для текущих условий окружающей среды, для конкретного материала.

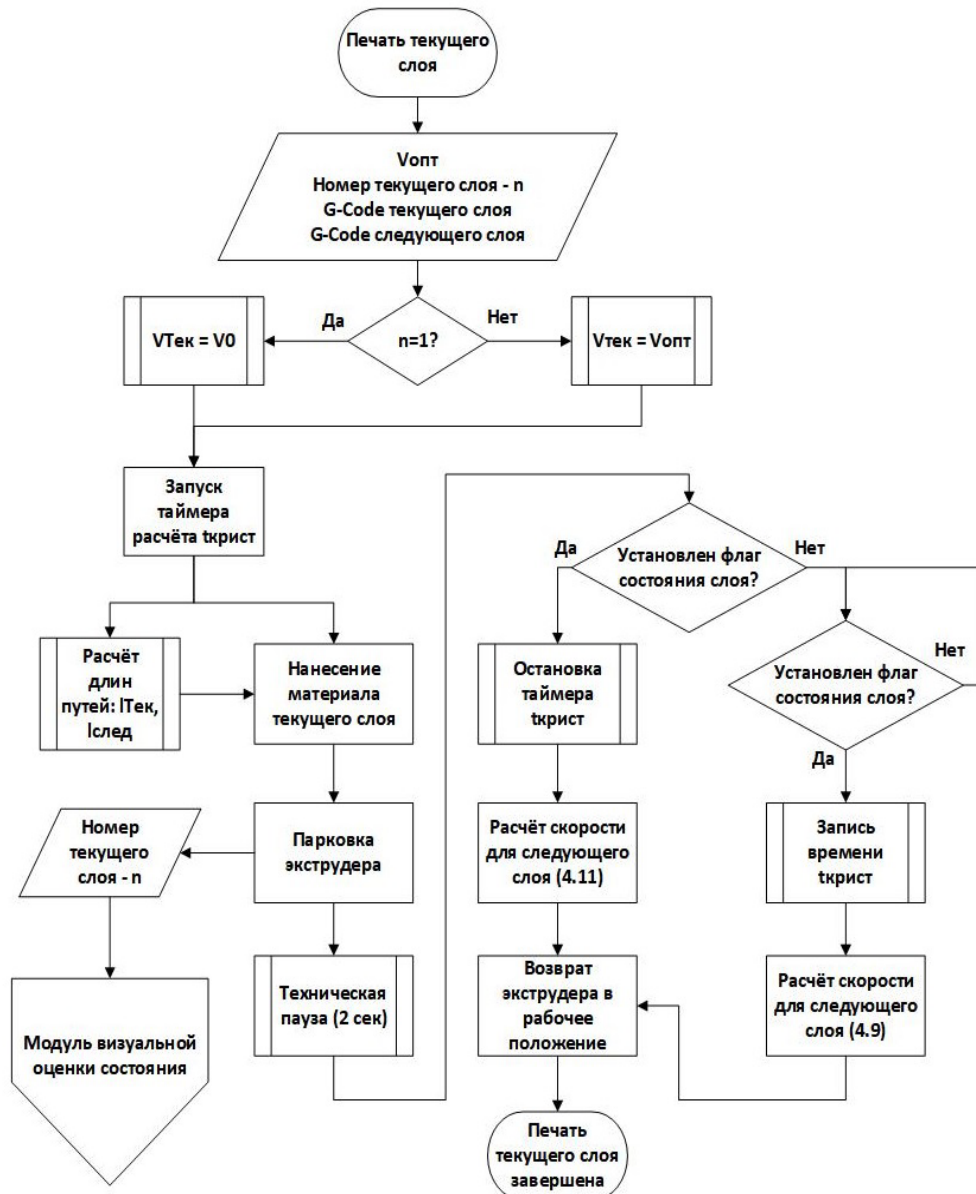


Рисунок 5. Алгоритм работы модуля оптимизации скорости печати.

Это позволяет добиться максимального качества, при минимально возможном времени печати.

На основании параметров ТП 3D печати были выведены формулы для нахождения оптимальной скорости печати:

$$v_{\text{опт}} = \frac{1.25 * l_{\text{пер}} + l_{\text{зап}}}{t_{\text{крист}}} * \frac{l_{\text{пер.след}} + l_{\text{зап.след}}}{l_{\text{пер.}} + l_{\text{зап.}}} \quad (4.9)$$

где: $l_{\text{пер.след}}$ – длина траектории периметра для следующего слоя;

$l_{\text{зап.след}}$ – длина траектории заполнения для следующего слоя.

$$v_{\text{опт}} = v_{\text{тек}} * a * \frac{l_{\text{пер.след}} + l_{\text{зап.след}}}{l_{\text{пер.}} + l_{\text{зап.}}} \quad (4.11)$$

где: $v_{\text{тек}}$ – скорость нанесения материала для текущего слоя;

a – коэффициент увеличения скорости.

Для осуществления корректной оценки состояния слоя решались несколько прикладных задач: захват изображения и выделение на нём области, относящейся к текущему слою; «непрерывная оценка средних цветовых составляющих» интересующей области; создание графика изменения цветности во времени и нахождение момента начала кристаллизации. Разработанный алгоритм представлен на рисунке 6.

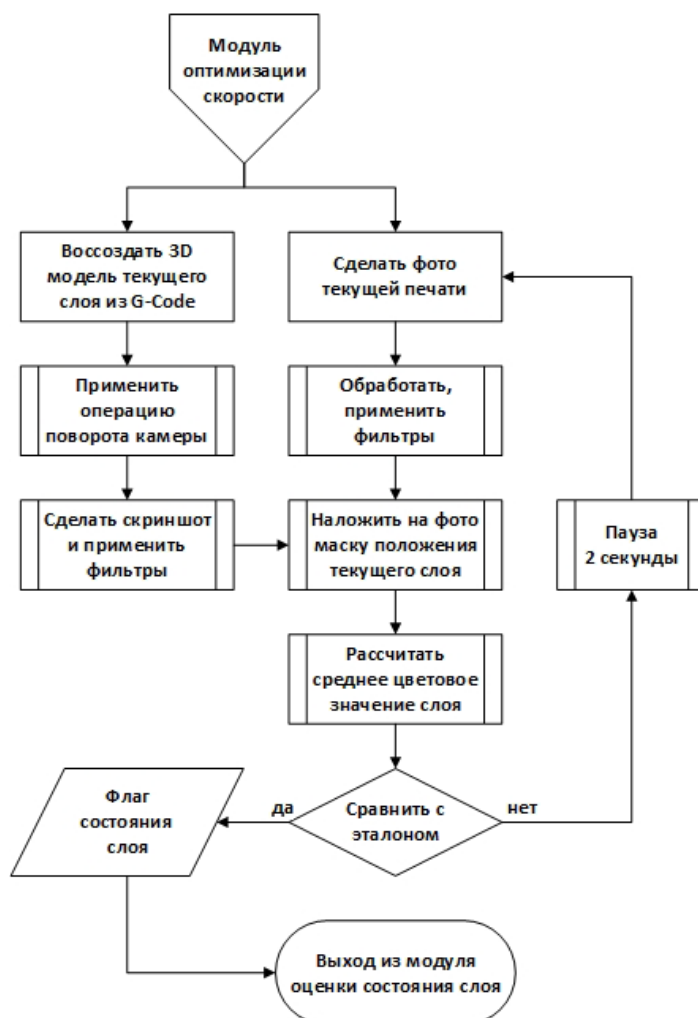


Рисунок 6. Алгоритм работы модуля оценки агрегатного состояния верхнего слоя нанесённого материала.

Комплекс предложенных мер, позволил достичь минимального времени печати необходимого для получения качественного шоколадного изделия.

Модуль детекции дефектов

На основании проведённых экспериментальных исследований, сделан вывод о необходимости дополнительного контроля внешнего вида получаемого изделия. Разработан алгоритм детекции поверхностных дефектов пищевой 3D печати шоколадом на основе нейросетевых технологий (рисунок 7). Он работает независимо от других и активируется после завершения печати каждого слоя. Он помогает распознавать дефекты, возникшие в результате пищевой 3D печати шоколадом.

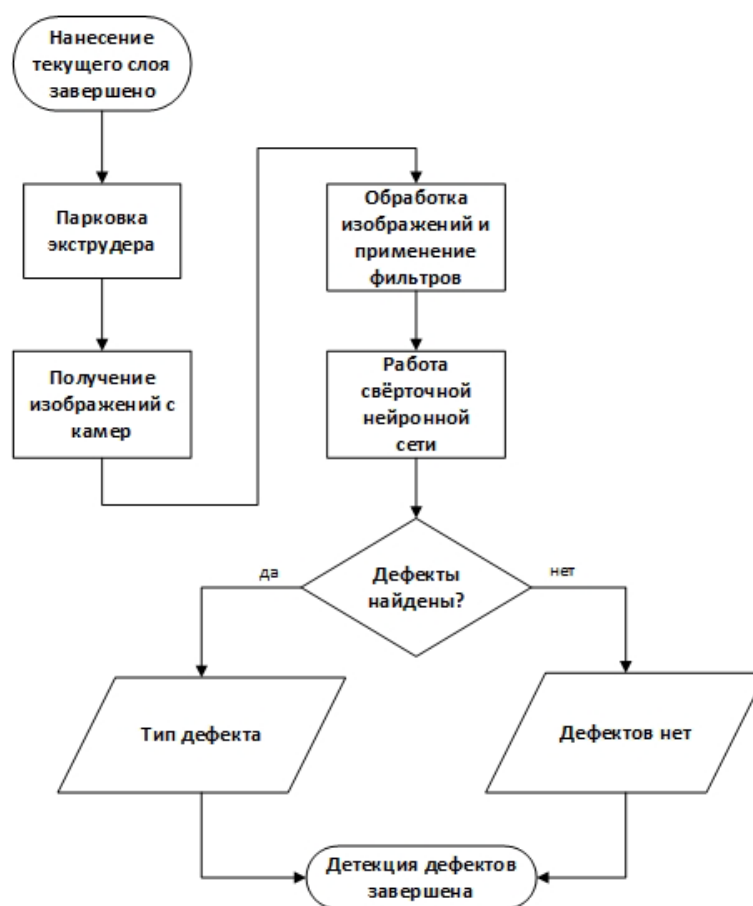


Рисунок 7. Алгоритм работы модуля поиска дефектов на печатаемой модели.

Проведён обзор существующих архитектур нейронных сетей для работы с изображениями, в результате которого была выбрана одна из самых современных и производительных моделей - YOLO v8. Для её обучения были подготовлены наборы данных для классификации и сегментации изображений, путём разметки и

аугментации. Таким образом были получены уникальные картинки с дефектами 3D печати шоколадных изделий:

- Число картинок с печатью без дефектов - 17640;
- Число картинок с дефектом пропуск экструзии - 20790;
- Число картинок с дефектом перегрев - 9450;
- Число картинок с дефектом волнистость - 26460;

После чего проведено обучение нескольких архитектур нейронной сети: для классификации дефектов и сегментации (рисунок 8).

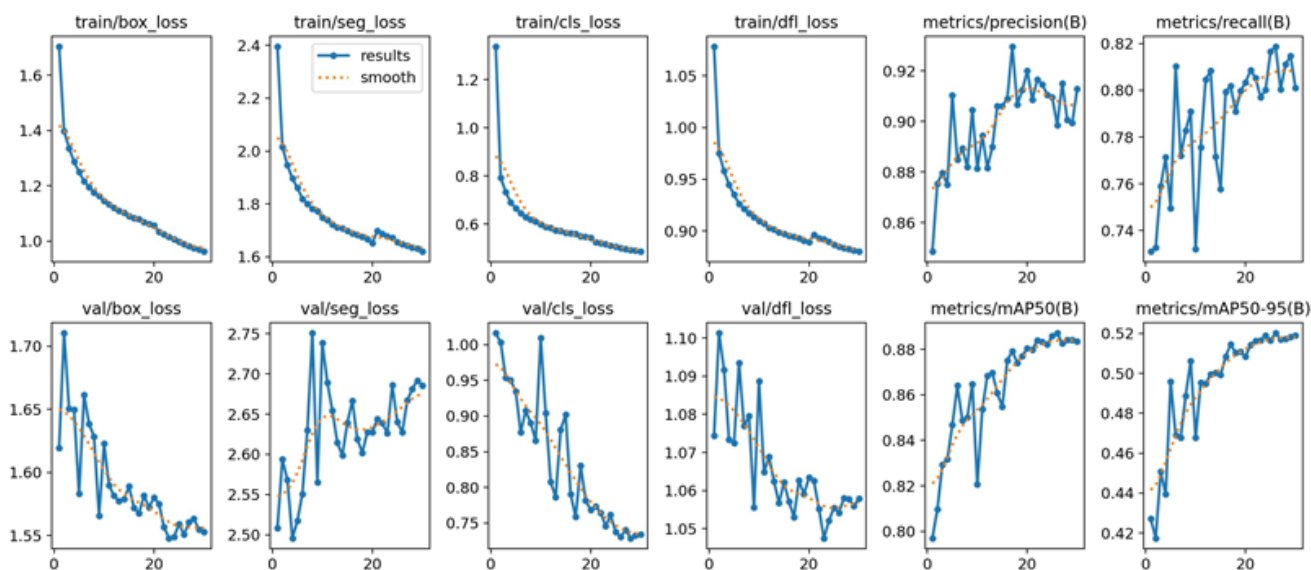


Рисунок 8. Графики обучения нейронной сети.

В результате нейронная сеть способна классифицировать изображения по категориям дефектов, а также осуществлять сегментацию и локализовать положение дефекта (рисунок 8).



Рисунок 8. Результат сегментации дефектов на контролируемом изображении.

Внедрение автоматической классификации необходимо для формирования базы данных о результатах печати, особенно это касается при работе с новым материалом. В случае некорректной печати будет накапливаться информация о возникающих дефектах и о режимах печати, при которых они были

зафиксированы. Накопление полученного опыта открывает возможность до обучать систему автоматизированного контроля в процессе эксплуатации.

Разработанные модули позволяют комплексно решить задачу визуального контроля протекающего ТП 3D печати. Стоит заметить, что такая оценка может быть применена не только для шоколада, но и для контроля состояния других ингредиентов, например: контроль степени приготовления мяса, или степени запекания теста.

Четвёртая глава посвящена разработке системы принятия решений необходимой для адаптивного управления текущим процессом 3D печати. Определены основные задачи СПР: автоматический контроль состояния печатаемого объекта на каждом слое на основе мониторинга информации в режиме реального времени; адаптивное управление параметрами технологического процесса для достижения оптимального качества печати (органолептический показатель – внешний вид); накопление информации о проводимых процессах печати с целью дальнейшего самостоятельного самообучения системы.

По результатам предыдущих глав были классифицированы основные параметры, используемые в АСКУ ТП пищевой 3D печати. К ним относятся входные параметры (информативные, управляемые, оценочные) и выходные параметры (управляемые) ТП. Сформулирована задача автоматизированного прогнозирования параметров управления ТП пищевой 3D печати шоколадом для каждого последующего слоя.

Были рассмотрены основные схемы нейроуправления, у которых в качестве регулятора выступает нейронная сеть. Предложена схема нейрорегулятора параметров ТП пищевой 3D печати (рисунок 9).

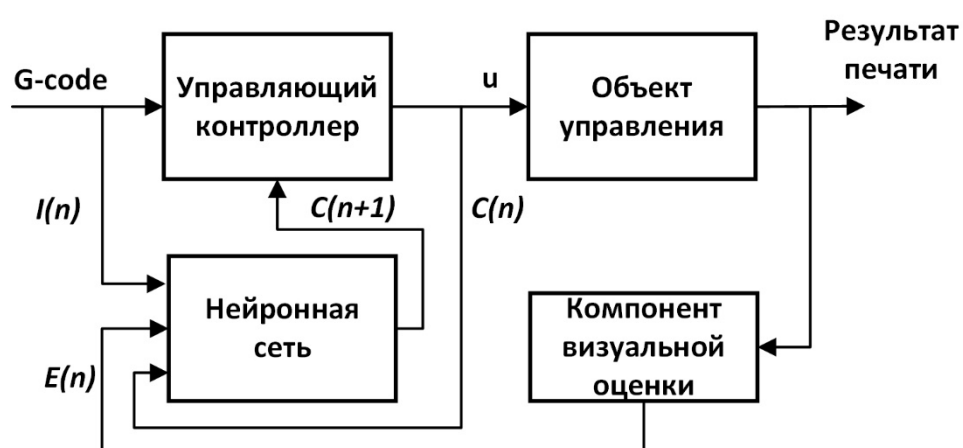


Рисунок 9. Схема нейрорегулятора.

В качестве входных данных для ИНС используются информативные параметры – I , получаемые из G-Code, основные параметры управления – C и

параметры оценки – E , основанные на данных визуального контроля результата печати.

$$\bar{I} = \{h_{\text{слоя}}, L_{\text{слоя}}, Time, t_{\text{о.с.}}\} \quad (4.2)$$

$$\bar{C} = \{t_{\text{сопла}}, t_{\text{стола}}, V_{\text{печати}}, w_{\text{экс}}, t_{\text{охл}}, V_{\text{охл}}\} \quad (4.3)$$

$$\bar{E} = \{\delta_E, t_{\text{крист}}, Ds\} \quad (4.4)$$

где: $h_{\text{слоя}}$ – высота текущего слоя; $L_{\text{слоя}}$ – длина пути текущего слоя; $Time$ – время печати текущего слоя; $t_{\text{о.с.}}$ – температура окружающей среды; $t_{\text{сопла}}$ – температура печатающей головки; $t_{\text{стола}}$ – температура платформы для печати; $V_{\text{печати}}$ – линейная скорость нанесения материала; $w_{\text{экс}}$ – ширина экструзии; $t_{\text{охл}}$ – температура охладителя; $V_{\text{охл}}$ – скорость вращения вентилятора обдува; $t_{\text{крист}}$ – условное время отверждения текущего слоя; Ds – класс дефекта; δ_E – относительная погрешность формы;

Представим входные данные о параметрах печати текущего слоя в виде вектора X , подаваемого в ИНС (4.5):

$$X_n = [I_n, C_n, E_n] \quad (4.5)$$

где: n – номер текущего слоя.

В качестве ответных данных на выходе нейрорегулятора формируется управляющее воздействие для печати следующего слоя (4.6), которое поступает в контроллер и исполняется им в приоритетном порядке, над существующими настройками.

$$Y_n = C_{(n+1)} \quad (4.6)$$

Таким образом на ИНС возлагается задача прогнозирования корректирующего управляющего воздействия для каждого вновь наносимого слоя, за исключением первого (4.7):

$$C_{(n+1)} = f(I_n, C_n, E_n) \quad (4.7)$$

Процесс 3D печати был представлен в виде периодически повторяющихся операций нанесения текущего слоя, которые повторяются до полного завершения печати. Каждая операция может иметь свои показатели качества и собственные настройки ТП. Внезапно возникший дефект, изменение условий окружающей среды или изменение реологических свойств сырья требуют немедленной корректировки настроек процесса. В результате чего возникает коррекция изделия и адаптация новых параметров. Однако этот процесс обладает инерцией. Таким образом при внесении управленческих воздействий СПР должна в состоянии учитывать результаты печати предыдущих слоёв.

Для решения этой задачи используется рекуррентная нейронная сеть (РНС), обладающая обратной связью, в отличие от многослойного перцептрона. Рекуррентные нейронные сети способны обрабатывать последовательность изображений, временные ряды, аудиофайлы и т.д. В нашей задаче РНС «запоминает» предыдущие состояния слоёв, что позволяет избежать перерегулирования и исключить пагубного влияния «запаздывания».

На рисунке 10 представлена архитектура разработанной нейронной сети с обратной связью с одним скрытым слоем.

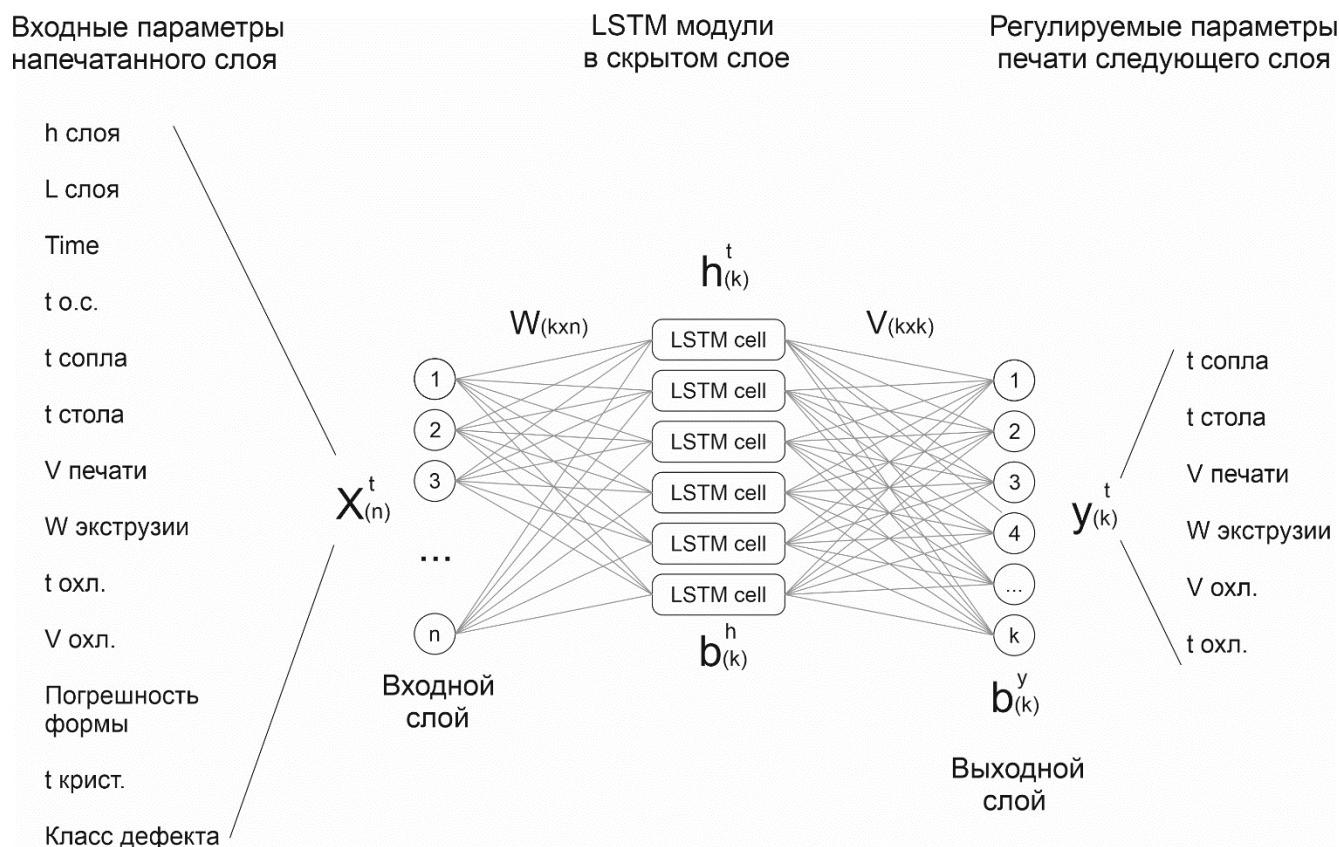


Рисунок 10. Архитектура рекуррентной нейронной сети для предсказания значений управляющих параметров печати следующего слоя.

В качестве входных данных (вектор X) выступают доступные параметры печати текущего слоя, а также неизменные в течение процесса данные и данные автоматических измерений, характеризующих состояние ТП. Всего использовано 13 параметров. На выходе РНС формирует выходные сигналы с параметрами печати для следующего слоя. К ним относятся (температура сопла, температура платформы, скорость нанесения материала, коэффициент подачи, температура обдува, скорость обдува).

Структура обучающих данных для рекуррентной нейронной сети представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Структура обучающих данных.

N	n	Входные данные обучения X												Требуемые значения Y							
		Информативные - I				Управляемые - C(n)						Оценка - E			Управляемые - C(n+1)						
		h _{слоя}	L _{слоя}	Time	t _{о.с.}	t _э	t _п	V _п	w	t _{охл}	V _{охл}	δE	Ds	t _{кр}	t _э	t _п	V _п	w	t _{охл}	V _{охл}	
1	1																				
	2																				
	...																				
	a																				
2	1																				
	2																				
	...																				
	b																				
...	...																				
k	...																				

В самом первом столбце - N указаны порядковые номера результатов распечатанных моделей. Второй столбец указывает количество слоёв для какой-либо конкретной модели и зависит от высоты изделия. Каждый слой имеет свои собственные входные параметры X и ожидаемые предсказания Y.

Такой набор данных собирается в процессе работы оборудования с оператором, во время проведения обычного технологического процесса пищевой 3D печати. Чем обширнее и разнообразнее будет собран набор данных о ТП, тем эффективнее система будет способна управлять ТП, и правильнее реагировать на возмущающие воздействия.

Пятая глава посвящена технической и программной реализации системы автоматизированного контроля и управления ТП пищевой 3D печати шоколадом. Рассмотрены программные компоненты и библиотеки, вошедшие в состав разработанного модуля визуального контроля органолептических показателей качества печатаемого продукта. Сконфигурирована и обучена нейронная сеть для классификации поверхностных дефектов вошедшая в этот модуль (рисунки 10 и 11). Проработана и реализована конфигурация рекуррентной нейронной сети, лежащей в основе системы принятия управленческих воздействий. Представлена структура обучающих данных.

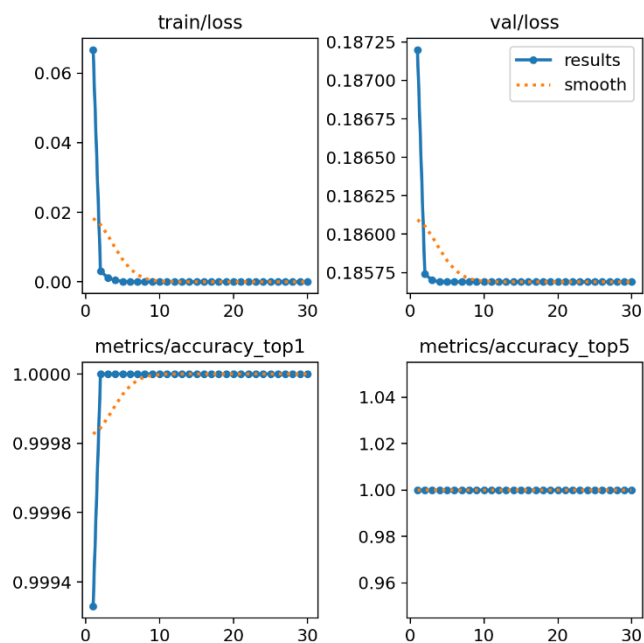


Рисунок 10. График процесса обучения нейронной сети YOLOv8 для классификации поверхностных дефектов.

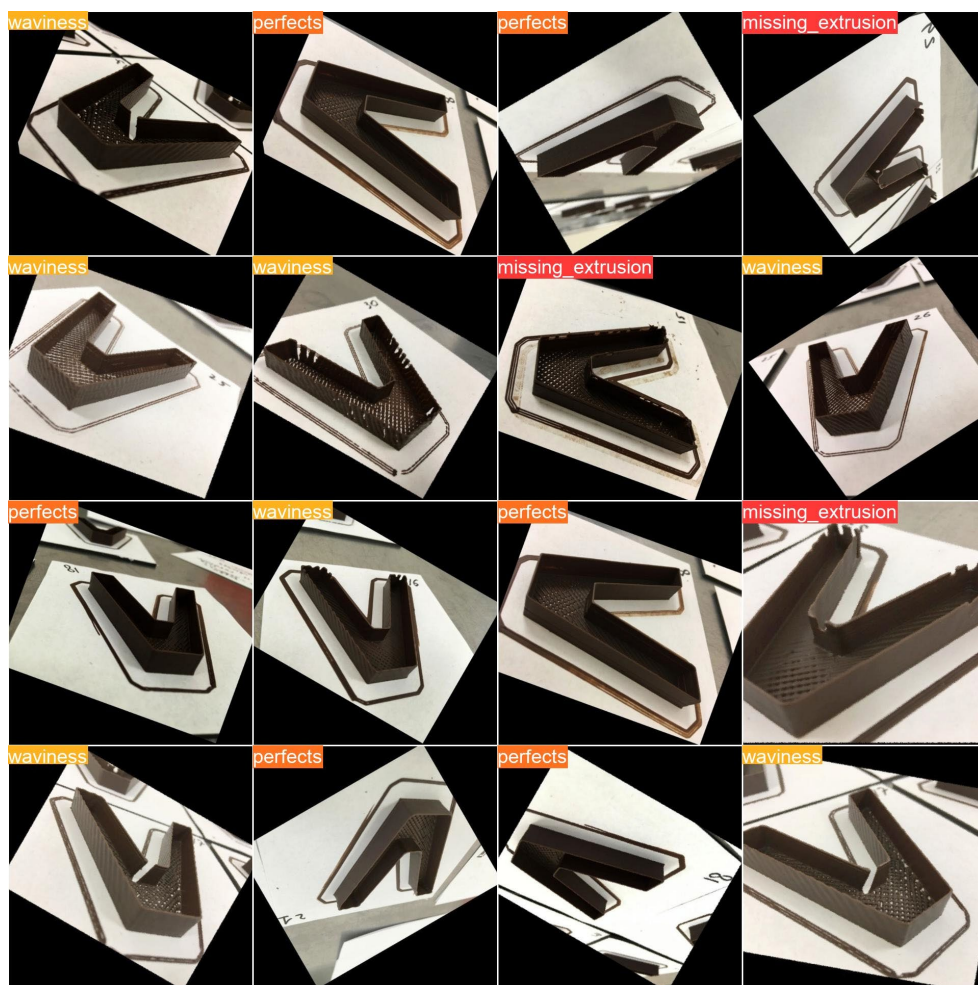


Рисунок 11. Результат классификации нейронной сетью YOLO v8.

Для корректного функционирования АСКУ ТП 3D печати шоколадом разработана база данных в MySQL (рисунок 12). В БД также учтена возможность накопления информации о новых результатах печати, с целью проведения дальнейших исследований технологического процесса пищевой 3D печати, в том числе и с новыми материалами. Такой подход позволяет до обучать нейронные сети на основе вновь приобретённого опыта.

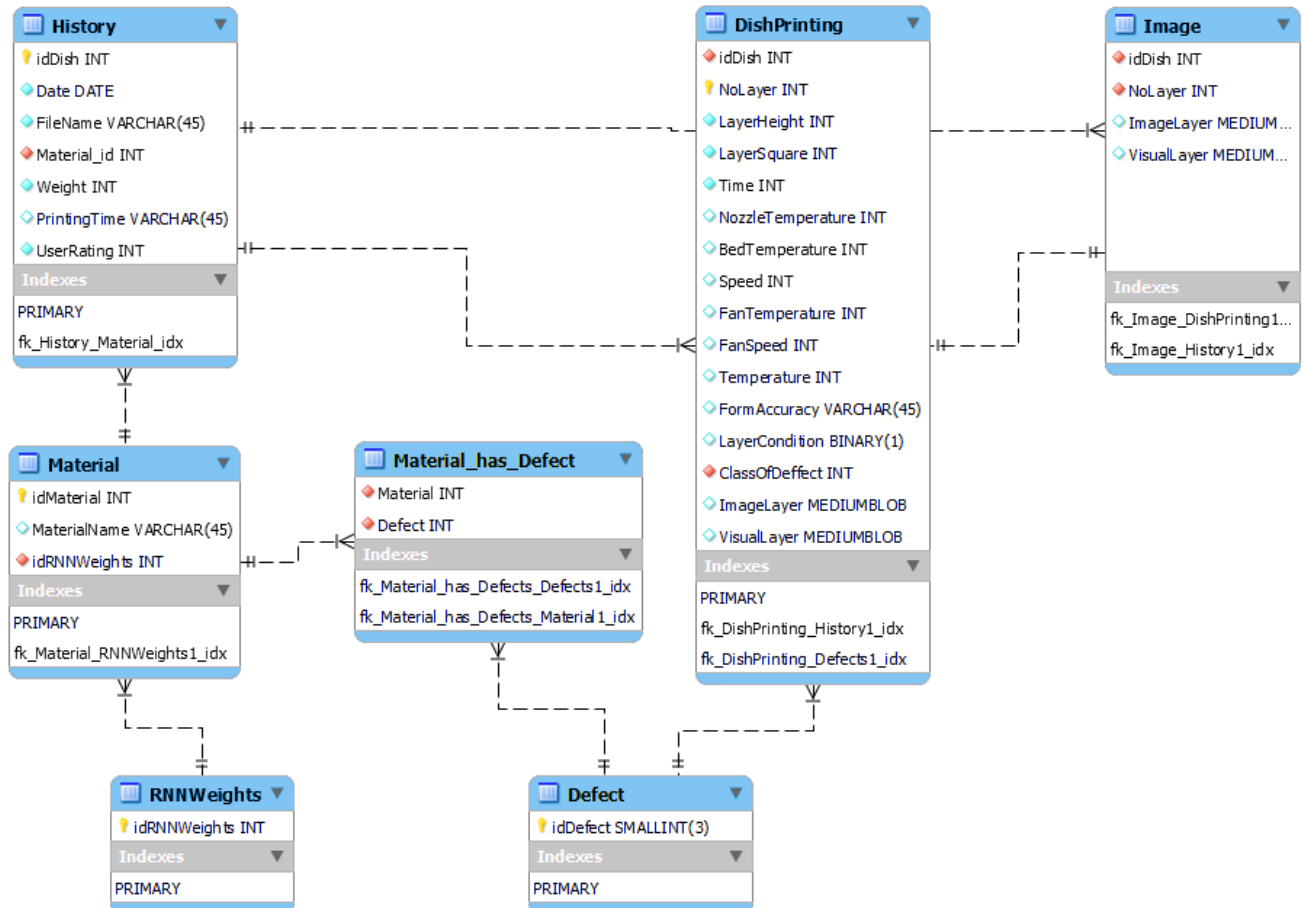


Рисунок 12. Архитектура БД АСК ТП пищевой 3D печати.

Предложен способ интеграции АСКУ ТП в систему 3D принтера. Использование микрокомпьютера, оптимальным решением для автоматизированного контроля за процессом 3D печати. Это возможно благодаря полной совместимости внешнего контроллера и материнской платы принтера (посредством USB соединения) и относительно невысокой стоимости микрокомпьютеров, а также благодаря их доступности. Операционная система Linux обеспечивает отдельное преимущество при разработке ПО. Для решения поставленных в данной работе задач выбран микрокомпьютер Raspberry Pi3B, подключенный к плате управления 3D принтером по средством USB соединения. В качестве материнской платы 3D принтера была выбрана BTT SKR Mini E3 V3, а в качестве её базовой прошивки Marlin 2.0. В качестве визуальных датчиков

выступают 2 видеокамеры NCM-198F R1.3. На рисунке 13 представлена аппаратная часть реализованной системы.

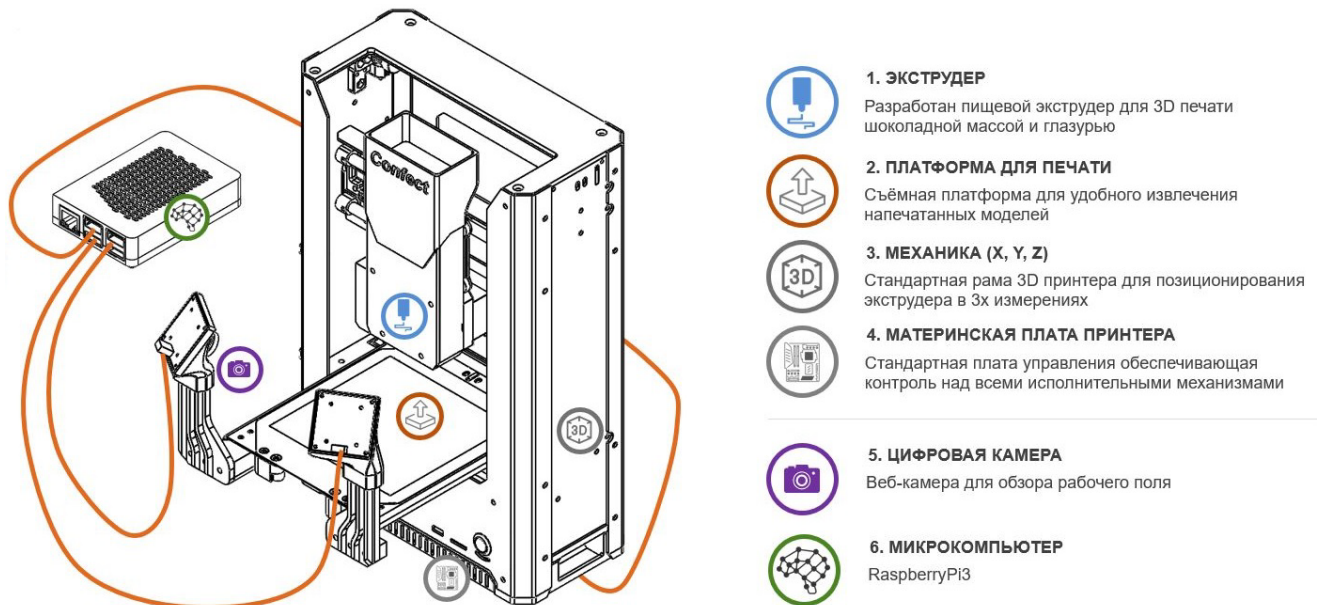


Рисунок 13. Пищевой 3D принтер с автоматизированной системой контроля органолептических показателей качества.

Разработана архитектура ПО, и детально описан принцип работы всех компонентов входящих в АСКУ ТП 3D печати (рисунок 14). Для разработки программного обеспечения и всех представленных алгоритмов выбран язык программирования Python в среде PyCharm SE, ввиду максимальной распространённости данного языка, а также из-за большого количества совместимых библиотек.

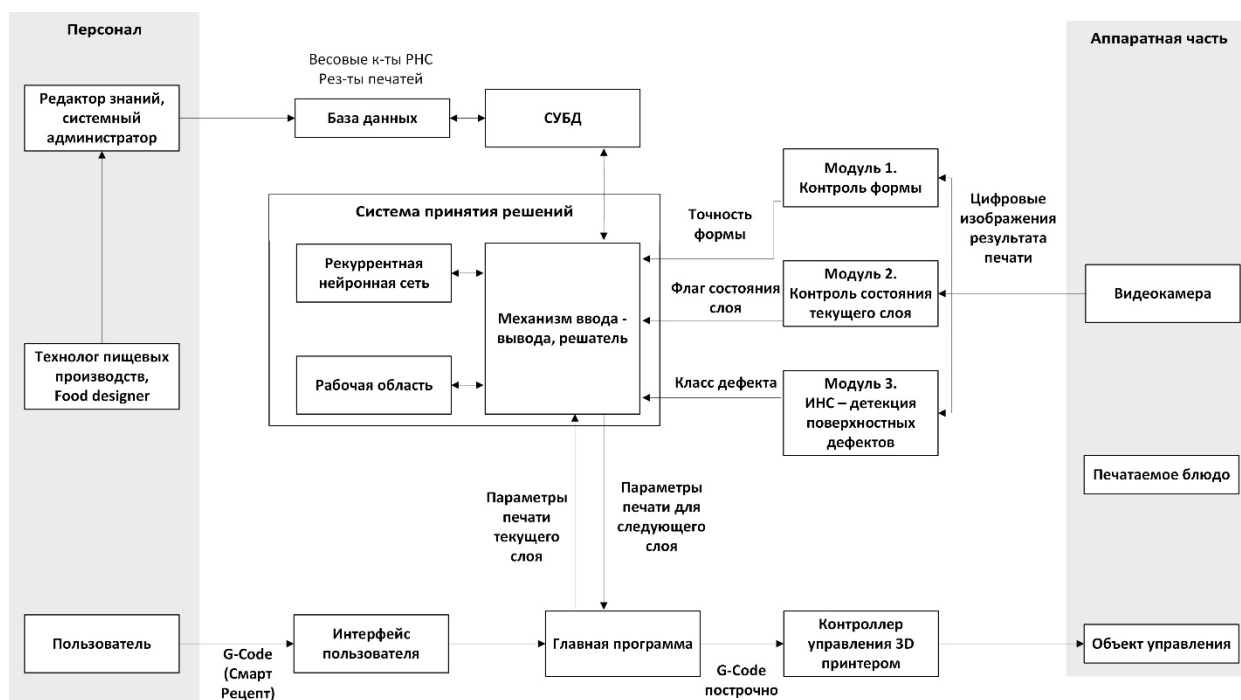


Рисунок 14. Архитектура ПАК АСКУ ТП 3D печати шоколадом.

При нормальном режиме работы программно-аппаратный комплекс используется следующим образом. Сперва пользователь подготавливает сырьё, загружает в принтер и отправляет желаемый G-Code (смарт рецепт) через интерфейс пользователя на принтер для начала печати. Затем в теле главной программы запускается механизм чтения файла и построчной передачи его на принтер. Параллельно с этим передаются параметры печати текущего слоя и текущий статус в СПР. Механизм ввода-вывода СПР обращается через СУБД к базе данных, для получения весовых коэффициентов РНС, обученных для определённого материала, и загружает в нейронную сеть. После печати первого слоя, цифровые изображения, полученные видеокамерой, передаются в модули визуального контроля (Модуль 1, 2 и 3), в которых происходит обработка информации и извлечение органолептических показателей качества. Результат передаётся в СПР. Механизм ввода – вывода СПР подаёт полученные входные параметры X на вход РНС и получает прогноз в виде выходных параметров Y . После чего эти параметры передаются в тело главной программы для печати следующего слоя. Печать следующего слоя начинается с новыми параметрами печати. Эта процедура циклична и равна общему числу слоёв печатаемого изделия. Таким образом происходит автоматизированный контроль, на протяжении всего ТП пищевой 3D печати.

Для управления всей системой был разработан графический пользовательский интерфейс, позволивший проводить точную настройку технологического процесса путём управления алгоритмами контроля (рисунок 15).

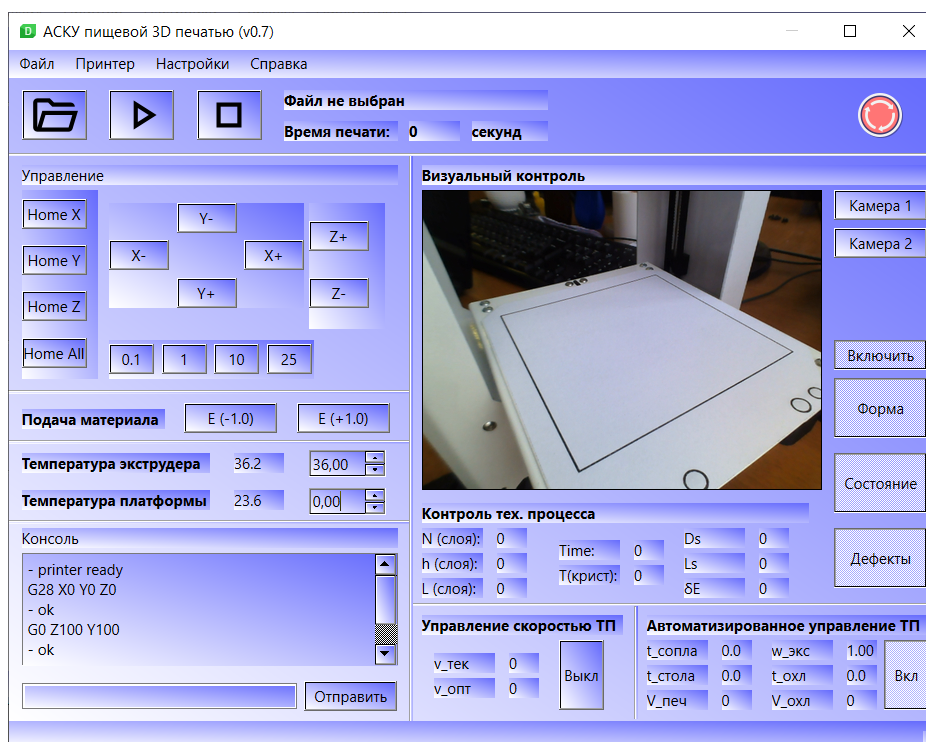


Рисунок 15. Пользовательский интерфейс АСКУ ТП 3D печати шоколадом.

Реализованный интерфейс позволяет осуществлять управление исполнительными механизмами 3D принтера, запускать, ставить на паузу или отменять печать выбранного файла. Для ручного ввода команд реализована консоль. В правой части приложения расположено окно вывода изображения с видеокамер, а также элементы управления алгоритмами визуального контроля и модулями автоматизированного управления ТП.

Разработанная АСКУ ТП 3D печати имеет модульное строение и является универсальной, что позволяет адаптировать её для новых материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе исследования получены следующие результаты:

1. Исследован и проанализирован технологический процесс пищевой 3D печати. Выявлены и систематизированы особенности данного производства, рассмотрены проблемы управления сложными по структуре пищевыми смесями и дана характеристика основных стадий ТП 3D печати шоколадной массой.
2. Разработана функционально-структурная схема влияния параметров технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом на органолептические показатели качества готового блюда.
3. Проведён анализ существующих экструдеров для пищевой 3D печати, изучены преимущества и недостатки. На основе этого разработана лабораторная установка

для пищевой 3D печати шоколадом, для проведения экспериментальных исследований.

4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса пищевой 3D печати шоколадом с дальнейшей математической обработкой полученных результатов. На основании распечатанных образцов предложена классификация дефектов тонкостенных шоколадных изделий, полученных методом пищевой 3D печати.

5. Разработаны алгоритмы и методы автоматизированного контроля показателей качества технологического процесса на примере пищевой 3D печати шоколадом в режиме реального времени в стационарных условиях с помощью системы технического зрения (СТЗ).

6. Разработана модель адаптивной системы принятия решений по управлению ТП процессом пищевой 3D печати на основе рекуррентной нейронной сети.

7. Представлен способ интеграции интеллектуального датчика в процесс пищевой 3D печати. Разработано программное обеспечение АСКУ ТП Пищевой 3D печати шоколадом.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Шибанов Э.Д., Благовещенский И.Г., Назойкин Е.А. Визуальная оценка состояния шоколадной массы при помощи системы технического зрения // Хранение и переработка сельхозсырья. (в редакции)
2. Шибанов Э.Д., Рылов С.А., Благовещенский И.Г. Алгоритм автоматизированного контроля и управления процессом 3D печати шоколадной массой // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2023. – Т16, – №8. – С. 57-63. – DOI 10.32603/2071-8985-2023-16-8-57-63.
3. Шибанов Э.Д. Классификация дефектов 3D печати тонкостенных фигур из шоколадной глазури // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2023. – № 8-2. – С. 146-151. DOI 10.37882/2223-2982.2023.8-2.37.
4. Благовещенский И. Г., Шибанов Э. Д., Загородников К. А. Оптимизация 3D-печати на примере использования шоколадной глазури // Пищевая промышленность. – 2020. – № 12. – С. 70-73. – DOI 10.24411/0235-2486-2020-10147. – EDN ZZVVRE.

Публикации в других изданиях:

5. Обзор систем технического зрения, применяемых в 3D-печати / Э. Д. Шибанов, И. Г. Благовещенский, М. М. Благовещенская // Цифровизация агропромышленного комплекса: Сборник научных статей II международной научно-практической конференции в 2-х т., Тамбов, 21–23 октября 2020 года. Том I. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 264-268. – EDN MEUCTU.
6. Некоторые аспекты обеспечения безопасности продуктов, изготавливаемых с применением пищевых аддитивных технологий / Т. В. Тулякова, В. В. Озерова, Э. Д. Шибанов // Заметки ученого. – 2021. – № 2. – С. 84-92. – EDN HRDDLГ.
7. Обзор систем технического зрения, применяемых в 3D-печати / Э. Д. Шибанов, И. Г. Благовещенский, М. М. Благовещенская // Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности: Юбилейный сборник научных докладов II Международной специализированной конференции - выставки. – Москва, 2021. – С. 356-366.
8. Поршневой экструдер для пищевой 3D печати шоколадом / Э. Д. Шибанов, И. Г. Благовещенский, А. В. Кучумов // Информатизация и автоматизация в пищевой промышленности: Сборник научных докладов Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 18 мая 2022 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2022. – С. 83-87. – EDN VOEAEM.
9. Обзор систем контроля за процессом FDM(FFF) 3D печати / Э. Д. Шибанов, И. Г. Благовещенский, А. С. Носенко [и др.] // Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности : Сборник научных докладов III Международной специализированной конференции - выставки, Москва, 29 марта 2022 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2022. – С. 346-354. – EDN YBMRXI.
10. Экструдер для 3d-печати пищевой продукции / Э. Д. Шибанов, И. Г. Благовещенский // Цифровизация агропромышленного комплекса: Сборник научных статей III международной научно-практической конференции в 2-х т., Тамбов, 25–27 октября 2022 года. Том I. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2022. – С. 120-123.