

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(РОСБИОТЕХ)»**

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

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Благовещенский И. Г.  
доктор технических наук, доцент,

Москва – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>                                                                                                                                                             | <b>6</b>  |
| <b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ ШОКОЛАДОМ И ПРОБЛЕМЫ ЕЁ АВТОМАТИЗАЦИИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ .....</b> | <b>16</b> |
| 1.1 Обзор технологии пищевой 3D печати шоколадных изделий .....                                                                                                                  | 16        |
| 1.1.1. Особенности оборудования и основные этапы пищевой 3D печати .....                                                                                                         | 16        |
| 1.1.2. Понятие качества пищевого изделия напечатанного на 3D принтере.....                                                                                                       | 20        |
| 1.2. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТРЁХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ШОКОЛАДОМ КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ.....                                                                  | 22        |
| 1.2.1. Анализ факторов, влияющих на ухудшение органолептических показателей качества объекта .....                                                                               | 22        |
| 1.2.2. Обоснование необходимости контроля процесса печати шоколадом в режиме реального времени.....                                                                              | 24        |
| 1.2.3. Определение основных операций процесса трёхмерной печати шоколадных изделий и выбор факторов, определяющих эффективность этих операций .....                              | 25        |
| 1.2.4. Функционально-структурные схемы влияния факторов исходного сырья и промежуточных операций на качество готовой модели .....                                                | 28        |
| 1.3. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ, МОДЕЛЕЙ, МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ 3D ПЕЧАТИ.....                                                                     | 30        |
| 1.3.1. Оценка и контроль результатов пищевой 3D печати шоколадных изделий .....                                                                                                  | 31        |
| 1.3.2. Роль интеллектуальных технологий в решении задачи контроля и управления динамически изменяющимся объектом в режиме реального времени .....                                | 32        |
| 1.3.3. Обзор существующих методов контроля технологического процесса 3D печати в режиме реального времени .....                                                                  | 33        |

|                                                                                                                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.4. ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ .....                                                                                                                                                               | 37        |
| <b>ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ,<br/>ПРОВЕДЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ,<br/>МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ<br/>ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ ШОКОЛАДОМ .....</b> | <b>39</b> |
| 2.1 РАЗРАБОТКА ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ ШОКОЛАДНОЙ МАССОЙ<br>В НОТАЦИИ IDEF0. ....                                                                                                   | 39        |
| 2.2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ<br>УСТАНОВКИ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ ШОКОЛАДНОЙ МАССОЙ. ....                                                                        | 42        |
| 2.2.1 Обзор и анализ научно-технической информации о существующих<br>экструдерах для пищевой 3D печати шоколадом. ....                                                                          | 42        |
| 2.2.2 Постановка технической задачи .....                                                                                                                                                       | 44        |
| 2.2.3 Разработка экструдера для подачи шоколадной массы.....                                                                                                                                    | 45        |
| 2.2.4 Техническое исполнение экспериментальной установки для пищевой 3D<br>печати шоколадной массой. ....                                                                                       | 49        |
| 2.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ ШОКОЛАДНОЙ<br>МАССОЙ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОЛУЧЕННЫХ<br>РЕЗУЛЬТАТОВ. ....                                               | 51        |
| 2.3.1 3D печать шоколадных образцов.....                                                                                                                                                        | 52        |
| 2.3.2 Математическая обработка результатов практического эксперимента<br>пищевой 3D печати шоколадной массой .....                                                                              | 54        |
| 2.3.3 Классификация дефектов пищевой 3D печати шоколадной массой .....                                                                                                                          | 56        |
| 2.4 ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ .....                                                                                                                                                                | 58        |
| <b>ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИХ<br/>ПАКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА<br/>ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ<br/>ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ (СТЗ).....</b>   | <b>60</b> |
| 3.1 АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ПЕЧАТАЕМОЙ МОДЕЛИ.....                                                                                                                                         | 61        |
| 3.1.1 Математическая постановка задачи контроля формы печатаемого объекта                                                                                                                       |           |

|                                                                                                                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| .....                                                                                                                                                                | 62         |
| 3.1.2 Методика получения изображения эталонного объекта печати .....                                                                                                 | 64         |
| 3.1.3 Алгоритм работы модуля обнаружения деформации печатаемого объекта .....                                                                                        | 73         |
| 3.2 РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СКОРОСТИ ПЕЧАТИ ПУТЁМ ВИЗУАЛЬНОЙ<br>ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ШОКОЛАДА.....                                                   | 75         |
| 3.2.1 Математическая постановка задачи расчёта оптимальной скорости .....                                                                                            | 76         |
| 3.2.2 Алгоритм работы компонента оптимизации линейной скорости печати .....                                                                                          | 83         |
| 3.2.3 Постановка задачи оценки состояния шоколадной массы .....                                                                                                      | 84         |
| 3.2.4 Алгоритм работы модуля визуальной оценки состояния текущего слоя<br>шоколада.....                                                                              | 88         |
| 3.3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЕТЕКЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ.....                                                                                                        | 90         |
| 3.3.1 Нейросетевая модель детектора поверхностных дефектов .....                                                                                                     | 91         |
| 3.3.2 Подготовка обучающей выборки и масштабирование экспериментальных<br>данных.....                                                                                | 98         |
| 3.3.3 Алгоритм детекции поверхностных дефектов .....                                                                                                                 | 99         |
| 3.3 Выводы по ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ .....                                                                                                                                    | 101        |
| <b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ<br/>АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ И<br/>КОРРЕКТИРОВКИ ПАРАМЕТРОВ ТП ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ .....</b> | <b>103</b> |
| 4.1 ОПИСАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ<br>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ.....                                                           | 103        |
| 4.2 Постановка задачи АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ<br>ПРОЦЕССОМ ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ .....                                                            | 106        |
| 4.3 РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МОДУЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО<br>АНАЛИЗА, ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ТП 3D ПЕЧАТИ В РЕЖИМЕ<br>РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ.....        | 111        |
| 4.4 ПРОЦЕДУРА ОБУЧЕНИЯ .....                                                                                                                                         | 116        |
| 4.5 Выводы по ЧЕТВЁРТОЙ ГЛАВЕ .....                                                                                                                                  | 117        |



|                                                                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ГЛАВА 5. ПРОГРАММНАЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ<br/>АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ<br/>ПРОЦЕССОМ ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ .....</b> | <b>119</b> |
| 5.1 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МОДУЛЯХ<br>КОНТРОЛЯ ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА .....                      | 119        |
| 5.2 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ .....                                                                                               | 120        |
| 5.2.1 Настройка и обучение детектора поверхностных дефектов .....                                                                                   | 121        |
| 5.2.2 Настройка и обучение нейрорегулятора .....                                                                                                    | 123        |
| 5.3 РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ АСК ТП ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ .....                                                                                           | 124        |
| 5.4 ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ С ПРИНТЕРОМ ДЛЯ<br>ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ.....                                                       | 126        |
| 5.4.1 Аппаратная реализация.....                                                                                                                    | 126        |
| 5.4.2 Архитектура программного обеспечения .....                                                                                                    | 128        |
| 5.4.3 Пользовательский интерфейс.....                                                                                                               | 129        |
| 5.5 ВЫВОДЫ ПО ПЯТОЙ ГЛАВЕ.....                                                                                                                      | 131        |
| <b>ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ .....</b>                                                                                                    | <b>133</b> |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....</b>                                                                                                          | <b>135</b> |
| <b>ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ .....</b>                                                                                                  | <b>136</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>                                                                                                                      | <b>138</b> |
| <b>СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА .....</b>                                                                                                       | <b>154</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>                                                                                                                            | <b>156</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>                                                                                                                            | <b>157</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>                                                                                                                            | <b>158</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....</b>                                                                                                                            | <b>159</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы

На современном этапе экономического развития Российской Федерации на первый план выходят проблемы повышения эффективности отраслей пищевой промышленности, а также внедрение новейших технологий индустрии 4.0 на основных и наиболее значимых производствах. Возрастают требования к качеству выпускаемой продукции, к производительности оборудования, а также наблюдается тенденция к замене ручного человеческого труда – машинным с применением интеллектуальных технологий [2, 3, 30, 53, 66].

Совсем недавно стали популярны и широко известны аддитивные технологии, которые уже сейчас применяются практически во всех сферах производства для решения различных задач. Их использование позволяет добиться высокой скорости прототипирования, хорошей повторяемости объектов, возможности изготовления деталей сложной формы, существенного снижения расходуемого материала, а также значительного снижения влияния человеческого фактора, на качество получаемой продукции. Многие эксперты оценивают, что производство будущего будет состоять из крупномасштабных 3D ферм, позволяющих делать серийную продукцию в автоматическом режиме [21, 34, 44, 55].

Применение аддитивных технологий наблюдается и в пищевой отрасли. 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 [59, 67]. Уже сейчас активно разрабатываются технологии 3D печати мясных, рыбных, мучных блюд, а также блюд на основе растительного сырья и т.д. [9, 28, 101].

В стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030г. пищевые аддитивные технологии относят к формирующимся рынкам будущего [57]. Их потенциал заключается, в возможности создавать индивидуальное персонализированное питание с заданными свойствами. Это открывает огромные перспективы для обеспечения функционального и

индивидуального питания для большой доли населения страны. Пищевая 3D печать может повысить качество питания и готовить еду, опираясь на потребности конкретного организма. При этом стоимость организации такого питания будет в разы дешевле, нежели организовать индивидуальное питание традиционным образом [82, 107].

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».

Трудность решения задач автоматизированного контроля за процессом пищевой 3D печати обусловлена тем, что большинство приготавливаемых пищевых продуктов представляют собой сложные и неоднородные многокомпонентные смеси, состояние которых зависит от многих факторов (состава сырья, режимов работы оборудования, физико-химических и структурно-механических свойств и т.д.) [102].

Притом, в процессе выращивания 3-х мерного изделия периодически возникают ситуации, когда может измениться один из исходных параметров сырья или окружающей среды, что в последствии повлияет на качество протекания технологического процесса. В пищевой 3D печати трудность заключается в контроле и управлении потоком сложной по структуре пищевой массой. Возможны колебания параметров технологических процессов приготовления многокомпонентных пищевых масс, которые не позволяют получать стабильный по качеству готовый продукт. Также необходимо контролировать количество фактически нанесённого сырья, для обеспечения точности заданного состава блюда.

Поэтому проблемы автоматизации контроля каждого получаемого изделия методом пищевой трёхмерной печати, оптимизация режимов работы используемого оборудования на основе учёта изменения параметров,

определяющих ход протекания этих процессов, считаем основными теоретическими и практическими задачами, которые нужно решить, для масштабирования пищевых аддитивных технологий и их повсеместного применения в пищевой промышленности.

Безусловно такой контроль должен осуществляться с применением интеллектуальных технологий и технического зрения, успешно применяемых на поточных линиях автоматизированного современного производства [8, 35, 48, 81].

На сегодняшний день существуют исследования и разработки, направленные на создание систем автоматизированного неразрушающего контроля детали во время технологического процесса 3D печати в машиностроительной отрасли. В технологиях 3D печати пластиком и металлом такие системы способны фиксировать внутреннюю структуру изготавливаемого изделия на каждом новом слое, что позволяет воссоздать полную 3D модель конкретного напечатанного изделия [94, 108]. Существуют работы, направленные на контроль за процессом строительной 3D печати. Они отслеживают ширину наносимой линии и принимают решение об изменении режимов работы экструдера [99]. В настоящей работе были изучены и учтены результаты предыдущих исследователей, использованы рекомендации, приводимые авторами перечисленных трудов.

Анализ предметной области, показал, что основное внимание исследователей направленно на поиск оптимальных режимов работы оборудования, разработку и адаптацию нового сырья, а также аддитивного оборудования, но вопросам автоматизированного контроля качества пищевой 3D печати уделено мало внимания [88, 89]. Исходя из этого, исследования, проводимые в данной области, являются актуальным и перспективным направлением, имеющим значения для развития и масштабирования пищевых аддитивных технологий, и представляют особую научную значимость.

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 [106, 118].

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 [103, 104], а также учтены практические рекомендации предыдущих авторов.

Необходимы алгоритмы позволяющие осуществлять визуальный контроль органолептических показателей качества печатаемого объекта, контролировать состояние наносимого материала, и на основании этой оценки, корректировать управляющие параметры протекающего ТП пищевой 3D печати.

Успешное решение этой задачи возможно при внедрении в технологический процесс интегрированных систем контроля в режиме реального времени с использованием современных интеллектуальных технологий: систем компьютерного зрения (СКЗ) и искусственных нейронных сетей (ИНС).

Создание такой системы позволит: непрерывно контролировать показатели качества печатаемого продукта в течение всего технологического процесса 3D печати; автоматически подбирать оптимальные параметры печати для работы с конкретным материалом, опираясь на визуальную обратную связь (органолептические параметры качества); обеспечить стабильность производства; уменьшить уровень брака и снизить потерю рабочего времени и сырья, а также повысить качество готовой продукции.

Разработанные в настоящей диссертационной работе алгоритмы и методы визуального контроля состояния печатаемого блюда являются универсальными и

могут быть использованы для автоматизированного контроля ТП 3D печати другими пищевыми ингредиентами.

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. Системный анализ методов и технических средств ТП пищевой 3D печати шоколадом.
2. Разработка лабораторной установки для пищевой 3D печати шоколадом, обеспечивающей стабильную подачу материала.
3. Теоретические и экспериментальные исследования технологического процесса пищевой 3D печати шоколадом и его математическое описание.
4. Разработка алгоритмов и методов автоматизированного контроля органолептических показателей качества технологических процессов пищевой 3D печати шоколадом в режиме реального времени в стационарных условиях при помощи системы технического зрения (СТЗ).
5. Разработка моделей и методов автоматизированного управления ТП пищевой 3D печати шоколадом с применением нейросетевых технологий.
6. Интеграция и адаптация интеллектуального датчика в ТП пищевой 3D печати шоколадом.
7. Программная реализация 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 PyChart SE.

**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 (Приложения 1 и 2).

Разработанный программный модуль, предназначенный для управления процессом пищевой 3D печати, прошёл апробацию и внедрён в Лабораторию

пищевых аддитивных технологий технопарк «Superfood технологии» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» (Приложение 3).

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 (Приложение 4).

#### **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.

# **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ ШОКОЛАДОМ И ПРОБЛЕМЫ ЕЁ АВТОМАТИЗАЦИИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ**

3D печать съедобными ингредиентами является многообещающим и перспективным инструментом для пищевой отрасли. На текущем этапе развития данной технологии происходит расширение доступных для печати пищевых материалов и разработка специализированного аддитивного оборудования [59, 115]. Однако не менее важной составляющей в пищевом производстве является контроль качества продукции, так как от этого зависит восприятие, настроение, самочувствие и здоровье потребителя. Для машин, готовящих пищу в автоматическом режиме, безусловно необходим автоматизированный контроль технологического процесса, позволяющий на 100 процентов быть уверенным в качестве, рецептуре и безопасности получаемой продукции. Из доступных материалов для исследований ТП пищевой 3D печати нами был выбран наиболее «капризный» в контроле и управлении ингредиент – шоколад.

## **1.1 Обзор технологии пищевой 3D печати шоколадных изделий**

Для разработки системы автоматизированного контроля и управления необходимо всестороннее изучение целевого технологического процесса, а также изучение существующих понятий, определений и методов оценки качества получаемых изделий.

### **1.1.1. Особенности оборудования и основные этапы пищевой 3D печати**

Трёхмерная печать – процесс поэтапного создания объёмного изделия путём добавления, приращения материала на основу (платформу или заготовку). Чаще всего такие изделия получают при помощи специально разработанных устройств – 3D принтеров. Чуть реже – при помощи роботизированных манипуляторов.

В настоящей диссертационной работе рассматриваются 3D принтеры, работающие по технологии (FDM – Fused Deposition Modeling) метод послойного

нанесения материала. Они включают в себя: специальное устройство для подачи сырья – экструдер; систему механических осей для позиционирования печатающей головки в 3-х координатах (X, Y, Z); а также электронную составляющую для управления всем устройством [25, 26, 27]. На рисунке 1.1 представлена одна из первых картезианских кинематических схем 3D принтеров RepRap, применяемых для персонального использования среди энтузиастов начиная с 2006 года.

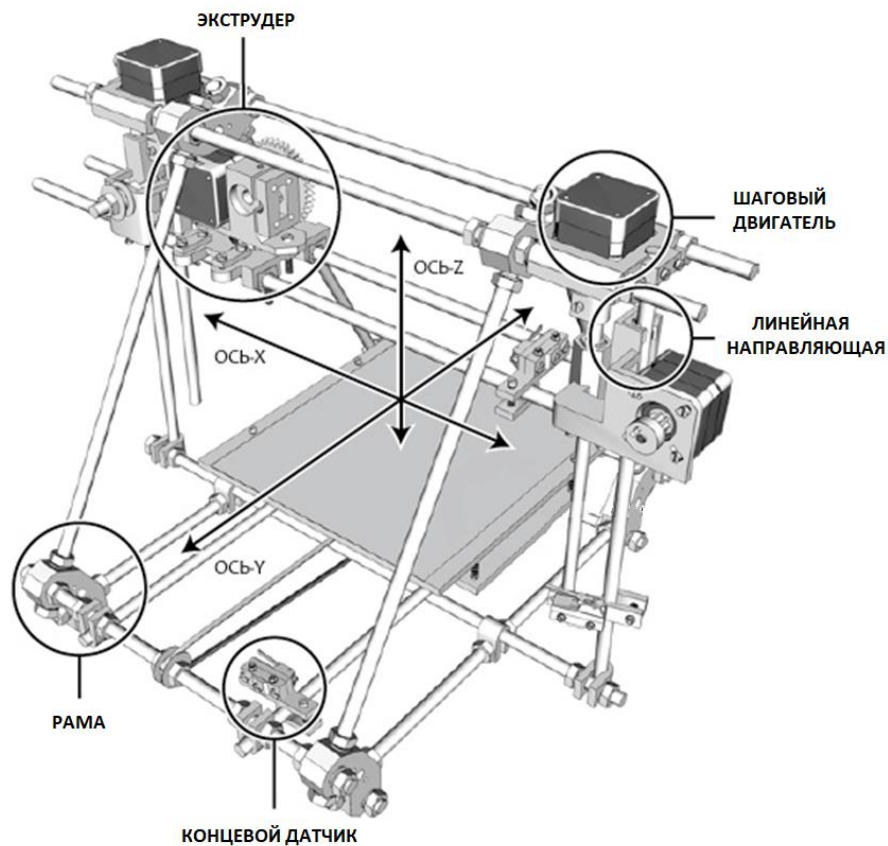


Рисунок 1.1. Кинематическая схема 3D принтера RepRap для печати пластиком.

Ключевое отличие пищевых 3D принтеров заключается в подающем механизме – экструдере, который предназначен для подачи пищевых материалов в область печати. Так как большинство пищевых ингредиентов по консистенции являются пастообразными и полужидкими растворами, для работы с ними разрабатывают специальные конструкции экструдеров. Вторым отличием таких принтеров является использование в конструкции изделия материалов, имеющих допуск к применению в пищевой промышленности.

Дополнительно 3D принтеры могут оснащаться подогреваемой платформой, для лучшей адгезии первого слоя, или для термической обработки продукта. Помимо этого, существуют системы активного охлаждения, позволяющие остужать вновь нанесённый материал значительно быстрее, что позволяет увеличить скорость и качество печати.

Основное сырьё, используемое для работы пищевого 3D принтера – это жидкие, пастообразные, съедобные многокомпонентные пищевые смеси такие как: шоколад, глазурь, жидкое тесто, фарш, джемы, соусы, гидроколлоидные растворы и т.д. [83]. На рисунке 1.2 представлена схема 3D принтера для печати объёмных изделий из жидкого шоколада и пастообразных материалов.

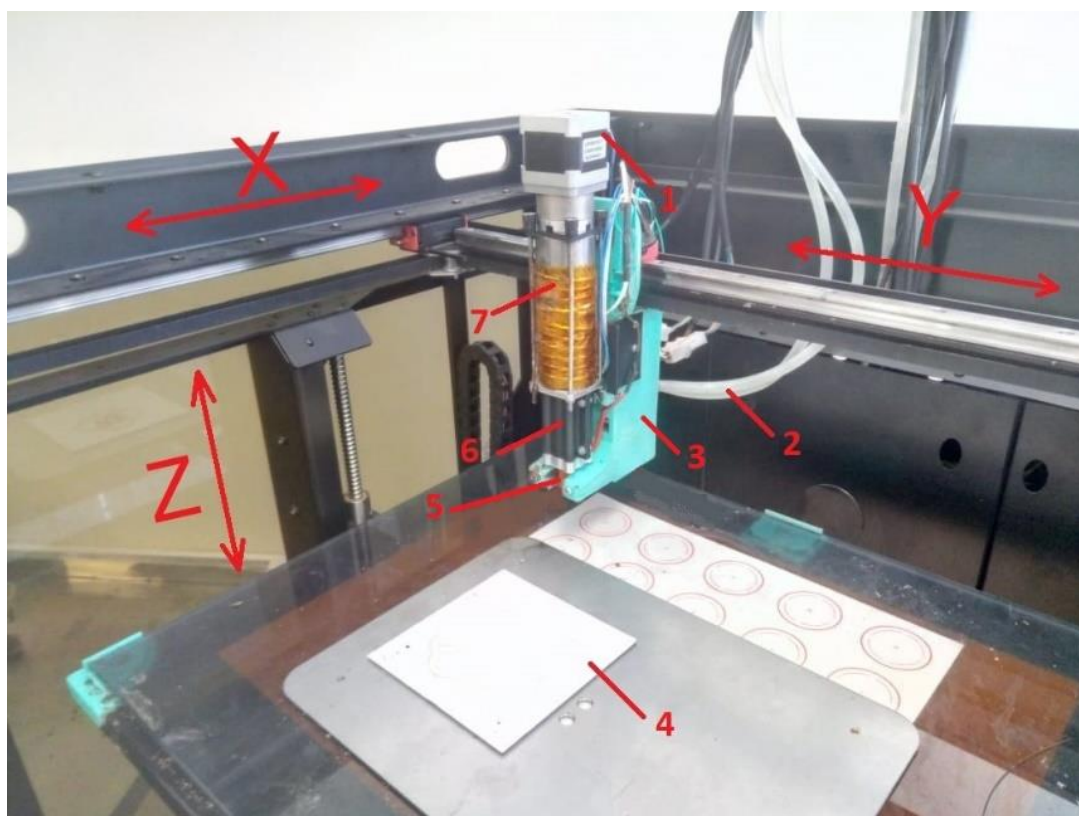


Рисунок 1.2. 3D принтер с экструдером для печати пищевыми компонентами.

Печатающее устройство – экструдер (1), перемещается в горизонтальной плоскости XY по заданной в программе траектории нанося расплавленный шоколад на платформу для печати (4). Далее платформа опускается ниже на высоту одного слоя печати по оси Z, и экструдер начинает наносить следующий слой, поверх предыдущего. Такая последовательность повторяется на протяжении всего

процесса трёхмерной печати. Когда экструдер нанёс все слои – изделие считается полностью напечатанным.

На рисунке 1.3 представлена наиболее распространенная условная схема ТП пищевой 3D печати шоколадом.

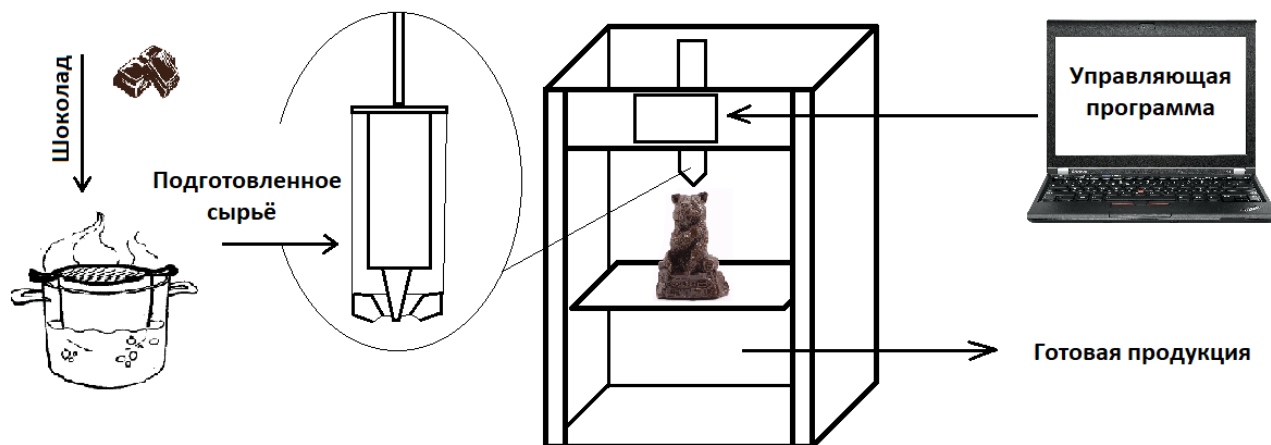


Рисунок 1.3. Машино – аппаратная схема ТП пищевой 3D печати шоколадом.

Технологический процесс пищевой 3D печати можно разделить на несколько основных стадий:

- **Подготовка сырья для печати:** нагрев и топление шоколада, перемешивание, чтобы довести его до однородного жидкого состояния, с последующим темперированием или модифицированием при необходимости. Обычно эту процедуру проводят вне принтера при помощи водяной бани вручную, либо с использованием специальной аппаратуры для плавления и темперирования шоколада.

- **Подготовка цифровой модели для печати:** процесс настройки всех параметров ТП, таких как скорость подачи, высота наносимого слоя, рабочая температура сопла, ширина экструзии, степень дополнительного охлаждения и другие с последующим созданием управляющей программы «G-code» [91]. Для подготовки модели к 3D печати применяются специальные программы называемые слайсерами.

- **Процесс 3D печати:** загрузка подготовленного сырья в экструдер, загрузка управляющей программы в 3D принтер и сам процесс печати 3-х мерного изделия из шоколада.

#### 1.1.2. Понятие качества пищевого изделия напечатанного на 3D принтере

Стоит отметить, что на данный момент ещё не разработаны какие-либо стандарты и нормативные документы, определяющие качество продукта в области пищевой 3D печати. Поэтому были определены основные критерии и допущения, которые являлись основополагающими для нашего исследования. Они основаны на оценке качества кондитерских изделий, а также на оценке качества объектов, получаемых путём трёхмерной печати.

Когда речь заходит о качестве изделия, полученного методом трёхмерной печати, в большинстве случаев ограничиваются визуальной оценкой получаемого объекта. Обычно оценивают форму изделия, насколько точно и ровно соблюдена геометрия, оценивают качество поверхностей, их шероховатость, степень идентичности объекта с его цифровой моделью в целом, а также уровень детализации при печати маленьких элементов модели. В любительской 3D печати такую оценку проводит человек невооруженным глазом и обычно этого бывает достаточно.

При печати точных инженерных моделей проводят дополнительный контроль точности геометрии измерительным инструментом, а для деталей, испытывающих высокие нагрузки может проводиться неразрушающий контроль внутренней структуры объекта, для того чтобы исключить присутствие скрытых дефектов, которые являются концентраторами напряжений и могут привести к преждевременному разрушению детали.

Качество изделий, полученных методом трёхмерной печати, характеризуется: размерной точностью, прочностью на разрыв вдоль и поперёк слоёв, отсутствием деформаций, внешним видом и степенью соответствия полученного изделия исходной цифровой модели [61, 73].



Шоколадные, кондитерские изделия характеризуются следующими показателями качества [23, 24, 43]: микробиологические; органолептические (сенсорные); физико-химические и показатели безопасности. К органолептическим показателям относят внешний вид, форму, консистенцию, цвет, структуру, вкус и запах.

В пищевой 3D печати под качеством получаемого изделия можно понимать: качество поверхности и геометрии объекта в целом, вкусовые характеристики полученного изделия (качество по органолептическим показателям); точность дозирования компонентов (если речь идёт о мульти материальной 3D печати и количественное соотношение компонентов должно быть точным), безопасность полученных продуктов.

Так как 3D печать – это процесс формирования трёхмерного изделия из готового сырья, то задача контроля безопасности продукта и микробиологических показателей качества ложится на производителя исходного сырья и в большинстве случаев не зависит от режимов работы аддитивного оборудования. На вкус сырья во время печати тоже повлиять практически невозможно, поэтому этот показатель не будет являться целевым.

В рамках данной работы принимается положение о том, что используемое для печати исходное сырьё является качественным и безопасным для потребителя. В используемом для исследования оборудовании узлы, контактирующие с пищей, изготовлены из материалов, имеющих допуск к пищевой промышленности, либо имеют специальное покрытие, потому продукт, получаемый на принтере – безопасный.

Основной фокус в данном исследовании был направлен на контроль органолептических показателей качества, а именно на внешний вид и форму готового объекта (степень соответствия цифровой модели). В современных условиях рынка 3D печати это один из самых главных показателей качества. Напечатанное изделие должно выглядеть эстетично и привлекать потребителя, вызывая желание попробовать продукт.

## 1.2. Исследование и анализ технологического процесса трёхмерной печати шоколадом как объекта автоматизации

Решение поставленных задач возможно только на основе системного исследования и глубокого анализа реального ТП [4, 12] поэтому мы рассмотрим основную схему пищевой 3D печати как объекта автоматизации, на примере использования шоколадной массы.

### 1.2.1. Анализ факторов, влияющих на ухудшение органолептических показателей качества объекта

В настоящее время контроль качества поверхности осуществляет человек, исходя из своих требований и ожиданий. К органолептическим свойствам готового изделия относятся цвет, запах, форма определяемые при помощи сенсорных систем органов чувств.

В данной работе, в контексте пищевой 3D печати, основным критерием выступает качество получаемой поверхности, точность формы и соответствие её цифровой модели, а также уровень детализации мелких элементов. Это ключевые параметры, которые будут зависеть от механики принтера и от настроек печати, на которые возможно повлиять непосредственно в процессе изготовления детали.

Как показывает практика [90, 102, 106, 118], в 3D печати шоколадом и глазурью существуют несколько факторов, ухудшающих качество получаемого объекта:

- неверно заданные параметры печати для используемого материала (рабочая температура, скорость печати, ширина линии (Line width), диаметр материала и коэффициент подачи, высота слоя и т.д.);
- наличие примесей в подготовленном сырье, неоднородность шоколадной массы;
- использование перегретого шоколада.

Если исходный материал для печати содержит примеси или имеет неоднородную структуру, возникает вероятность возникновения засора печатающего сопла. Обычно это происходит кратковременно, но достаточно для

того, чтобы получить дефект. Во время печати в сопло попадает “неоднородный комок материала” и застревает в нём, до тех пор, пока давление, развиваемое экструдером, не возрастет и не протолкнет эту “пробку”. На участке детали это может выглядеть как недоэкструзия – отсутствие подачи в определенной части модели, а затем, когда сопло прочищается вместе с этим возникает переэкструзия – избыточная подача материала, из-за увеличенного давления внутри экструдера. Изделие с таким дефектом, в зависимости от места расположения, может сразу потерять товарный вид. Для предотвращения подобных неприятностей шоколадную массу перед процессом печати рекомендуется тщательно перемешать и пропустить через сито.

Теперь рассмотрим случаи плохого качества печати, полученного в результате неверно подобранных параметров. Например, при завышенной температуре печати для конкретного используемого материала, вероятнее всего получится перегрев изделия, нанесенные слои не будут успевать застыть, а вновь наносимые будут “провисать” и “растекаться”. Также этот дефект может быть связан со слишком высокой скоростью печати, когда уже нанесенная шоколадная масса еще не успела застыть, к тому моменту, когда начинается наложение следующего слоя. С другой стороны, если шоколад не догреть до нужной температуры, подача может стать прерывистой, начнется плохая экструзия материала, вплоть до её полной остановки. Практика показывает, что при печати пластиком возможное отклонение от заданной температуры, не сильно влияющее на качество, может достигать 10 - 15 °C, в то время как для шоколада это значение равно 1 – 2 °C. Это связано с изменением вязкости шоколада при относительно небольшом изменении температуры [102]. Также шоколад может быть неравномерно прогрет и иметь разную температуру на подходе к соплу, а следовательно, и разную вязкость. Частицы шоколада, имеющие меньшую вязкость, легче протолкнуть через узкое сопло, поэтому фактическое количество выдавленного материала может быть немного больше, чем количество выдавленного материала с большей вязкостью из-за инерции системы. Это может привести к появлению налётов, которые портят внешний вид изделия и медленнее

остывают. Немаловажным фактором, влияющим на качество 3D печати шоколадом, является окружающая температура в помещении. В летние жаркие дни, шоколад застывает намного медленнее, следовательно, скорость печати должна быть значительно снижена. В противном случае изделие просто «расплавляется» по столу. В дополнение ко всему вышесказанному, каждая марка и вид шоколада имеет свои параметры вязкости, а это значит, что для каждого нового материала необходимо подбирать собственные режимы печати. К основным параметрам относятся скорость подачи материала, рабочая температура сопла, температура материала в колбе, высота наносимого слоя, параметры *ретракта* (отката). Если хотя бы один из параметров печати подобран неверно, то в конечном счёте результат будет неудовлетворительным или некрасивым. Все эти параметры, на сегодняшний день, подбираются эмпирическим путём для каждой конкретной марки шоколада, для текущих температурных условий окружающей среды [15, 103].

#### 1.2.2. Обоснование необходимости контроля процесса печати шоколадом в режиме реального времени

В большинстве случаев для получения хорошего результата необходимо непосредственное участие оператора на всех основных этапах 3D печати. В процессе печати он может корректировать температурные и скоростные режимы проводя визуальный контроль качества. Параметры печати изменяются на его усмотрение, исходя из анализа внешних факторов (температура окружающей среды, площадь печатаемого слоя, скорость застывания шоколада, степень однородности и т.д.) и собственного опыта. Так как 3D печать шоколадом занимает длительное время - эффективность от человека очень низка, а существующий основной контроль за процессом печати, который является определяющим в настоящий момент, не даёт 100% гарантии хорошего результата.

На рисунке 1.4 представлена модернизированная схема пищевой 3D печати шоколадом с применением СТЗ.

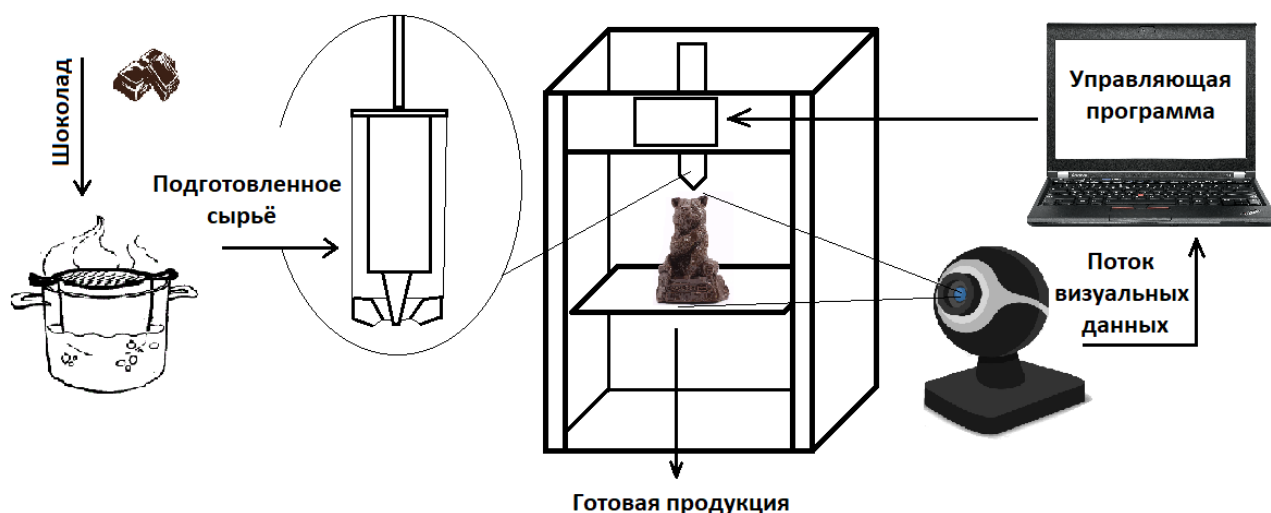


Рисунок 1.4. Машино – аппаратная схема ТП пищевой 3D печати шоколадом оснащённого СТЗ.

Использование систем визуального контроля [62, 74] позволит исключить необходимость затрат человеческих ресурсов на проведение визуальной оценки результата печати, что безусловно является необходимой задачей при масштабировании технологий пищевой 3D печати.

1.2.3. Определение основных операций процесса трёхмерной печати шоколадных изделий и выбор факторов, определяющих эффективность этих операций

Для оценки полной картины параметров, влияющих на качество напечатанного изделия, рассмотрим подробнее каждый из этапов ТП пищевой 3D печати шоколадом.

В большинстве случаев, сырьё нуждается в *предварительной подготовке*. А именно необходимо нагреть и привести шоколад в жидкое состояние, добиться однородной структуры, провести процедуру темперирования или модифицирования шоколада. Это позволяет получить правильную внутреннюю структуру материала в процессе отверждения и предупредить появление седины на готовом изделии [84]. В процессе подготовки шоколада важно соблюдать установленные заводом-изготовителем температурные режимы, чтобы не

испортить сырьё. В противном случае его можно пережечь, либо конечное изделие приобретёт «седину» после печати, спустя некоторое время. При загрузке материала в экструдер рекомендуется использовать сетчатый фильтр, чтобы удалить лишние примеси, комочки и пузырьки воздуха. Это позволит добиться более стабильной подачи материала через тонкий канал в печатающем сопле.

Не малую часть времени занимает первичная **настройка режимов работы оборудования и подготовка модели к печати**. В специальной программе-слайсере происходит обработка трёхмерной модели (чаще всего формата *STL*), а именно: разбиение модели по слоям с учётом заданных настроек и построение траекторий для движения печатающей головки принтера. Конечным результатом этого этапа является файл формата *G-Code*, который построчно отправляется на 3D принтер, либо целиком на встроенный носитель. Разбиение модели по слоям и создание файла *G-Code* происходит в автоматическом режиме, однако перед этим оператору необходимо правильно расположить трёхмерную модель на рабочем поле и иметь корректные настройки печати. Расположение моделей на рабочем столе при печати блюд из пищевых ингредиентов не сильно отличается от расположения деталей при печати пластиком. Ключевое отличие заключается в настройке параметров печати. *Рабочая температура* печатающей головки очень сильно влияет на качество получаемого изделия. Если шоколад будет не до грет до нужной температуры, то в процессе работы вероятнее всего произойдёт засор печатающего сопла, и деталь будет забракована, либо вновь наносимый материал будет «комковаться». Если перегреть печатающую головку, то шоколад будет слишком жидким, что увеличит *время застывания наносимого сырья*, а также это может привести к наплывам и натёкам на поверхности изделия и испортить его внешний вид. На появление натёков также влияет и *высота наносимого слоя*. Если эта величина окажется слишком большой по отношению к диаметру сопла, то вновь выдавливаемый шоколад может растекаться в ширь, прежде чем он успеет кристаллизироваться. Таким образом высота каждого слоя будет «проваливаться», общая высота детали будет становиться меньше в отличии от цифровой модели. *Линейная скорость печати* будет зависеть от *скорости застывания материала* и *температуры*

окружающей среды, а также от площади наносимого слоя. Чем выше скорость печати, и чем меньше площадь наносимого слоя, тем выше вероятность образования натёков. При снижении скорости печати и увеличении площади фигуры увеличивается *общее время печати*. Немаловажным параметром является *коэффициент экструзии*, который влияет на объём выдавливаемого материала за единицу пути экструдера. Помимо этого, существует *ширина экструзии* – расстояние между двумя соседними линиями в периметре или при сплошном заполнении. От настройки этих параметров зависит качество сплошного заполнения слоёв (нижние и верхние слои модели). При наличии системы активного охлаждения, регулировка его *температуры и скорости потока воздуха* позволяет добиться уменьшения времени застывания верхнего слоя, и увеличения линейной скорости печати.

После того, как сырьё загружено в экструдер, а управляющая программа для принтера готова, можно начинать *процесс 3D печати* шоколадом. При правильно подобранных параметрах печати процесс должен проходить автономно, однако на его стабильность могут повлиять условия окружающей среды, а также качество сырья, подготовленного для печати.

Стоит отметить, что большинство вышеперечисленных параметров взаимосвязаны между собой, и изменение одного параметра влияет на другие. В таблице 1.1 приведены наиболее важные для контроля и управления параметры печати.

Таблица 1.1 - Основные операции ТП 3D печати шоколадом и факторы, определяющие эффективность этих операций

| № | Операция | Определяющие факторы, зависящие от:  |                         | Показатели качества |
|---|----------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------|
|   |          | работы технологического оборудования | свойств исходного сырья |                     |

|   |                                       |                                                                                                                                                          |                                                                       |                                                                   |
|---|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1 | Подготовка сырья (топление)           | Температура нагрева, скорость вращения смесителя, время перемешивания, размеры отверстий сита                                                            | Содержание примесей, показатели текучести, вязкость                   | Температура, содержание примесей, степень однородности структуры, |
| 2 | Настройка параметров печати, слайсинг | Высота слоя, ширина экструзии, скорость печати, температура сопла, наличие в модели нависающих элементов, параметры охлаждения, степень сложности модели | Скорость печати, рабочая температура, время отверждения верхнего слоя | Время печати, поддержки                                           |
| 3 | Процесс 3D печати                     | Диаметр сопла, температура в камере печати, температура сопла, линейная скорость печати                                                                  | Температура, скорость кристаллизации                                  | Степень соответствия цифровой модели, показатель формы, цвет      |

Полученная таблица служит основой для разработки функционально-структурной схемы (ФСС) влияния показателей сырья и режимов работы оборудования на качество получаемых шоколадных изделий.

#### 1.2.4. Функционально-структурные схемы влияния факторов исходного сырья и промежуточных операций на качество готовой модели

На основании анализа литературных источников, а также на основании накопленного практического опыта по пищевой 3D печати шоколадом на базе технопарка ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ», были разработаны функционально-структурные схемы влияния факторов исходного сырья и промежуточных операций на качество распечатанной модели (рисунок 1.5).



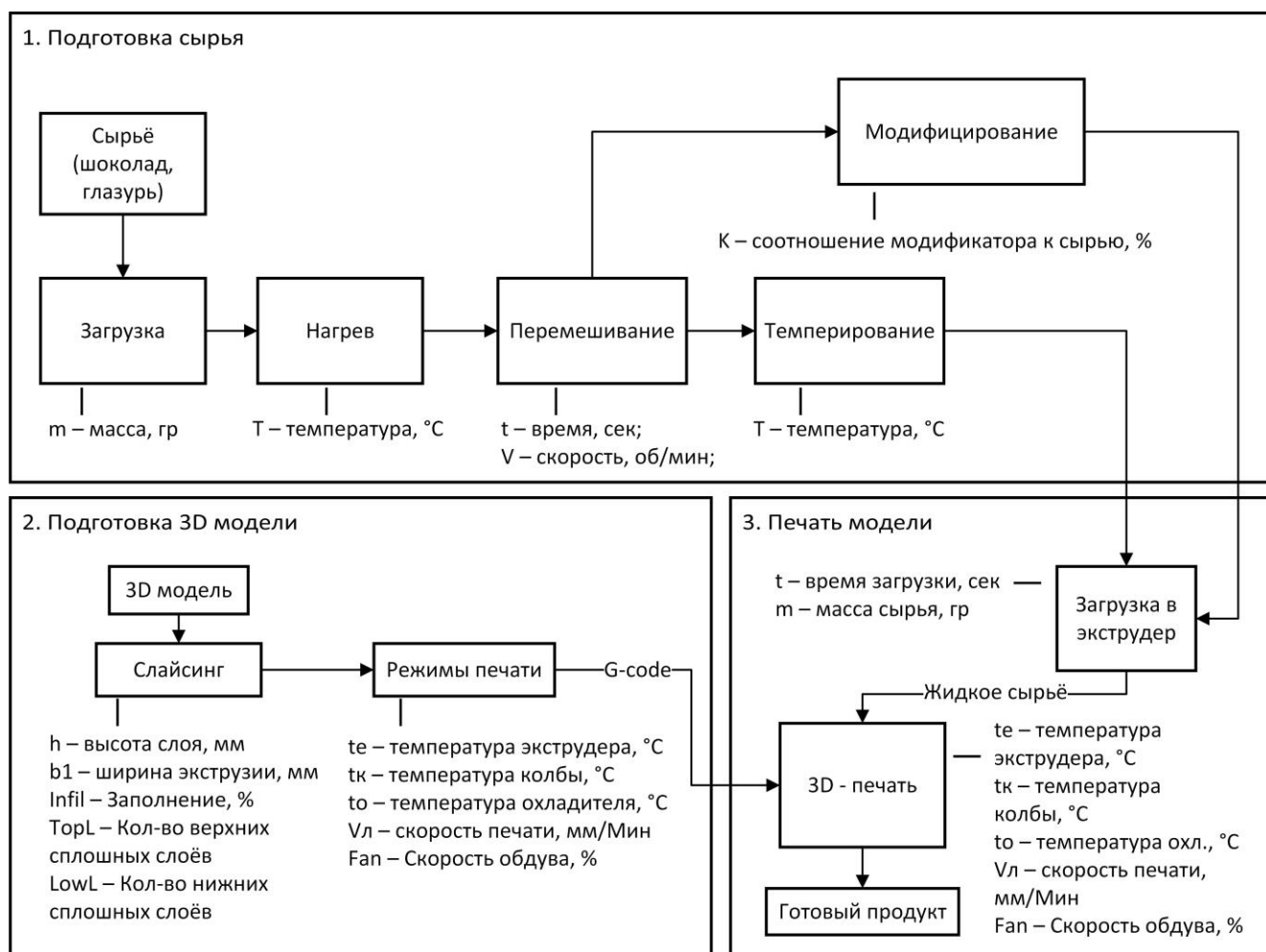


Рисунок 1.5. ФСС влияния показателей сырья и режимов работы оборудования на качество получаемых шоколадных изделий на всех стадиях ТП.

Стоит заметить, что этапы подготовки сырья и подготовки 3D моделей к печати являются предварительными и практически полностью зависят от человека. Повлиять на их результат во время печати практически невозможно. В момент 3D печати блюда возможно управлять настройками протекающего процесса, тем самым оказывая влияние на результат. К органам воздействия можно отнести практически все исполнительные механизмы принтера (управление температурой, скоростью, охлаждением и т.д.).

На рисунке 1.6 показаны основные точки контроля ТП пищевой 3D печати шоколадных изделий. Проведение контроля на указанных этапах позволяет предупредить большинство проблем, возникающих в процессе печати (засор экструдера, нехватка материала, искажение печатаемой модели и т.д.).

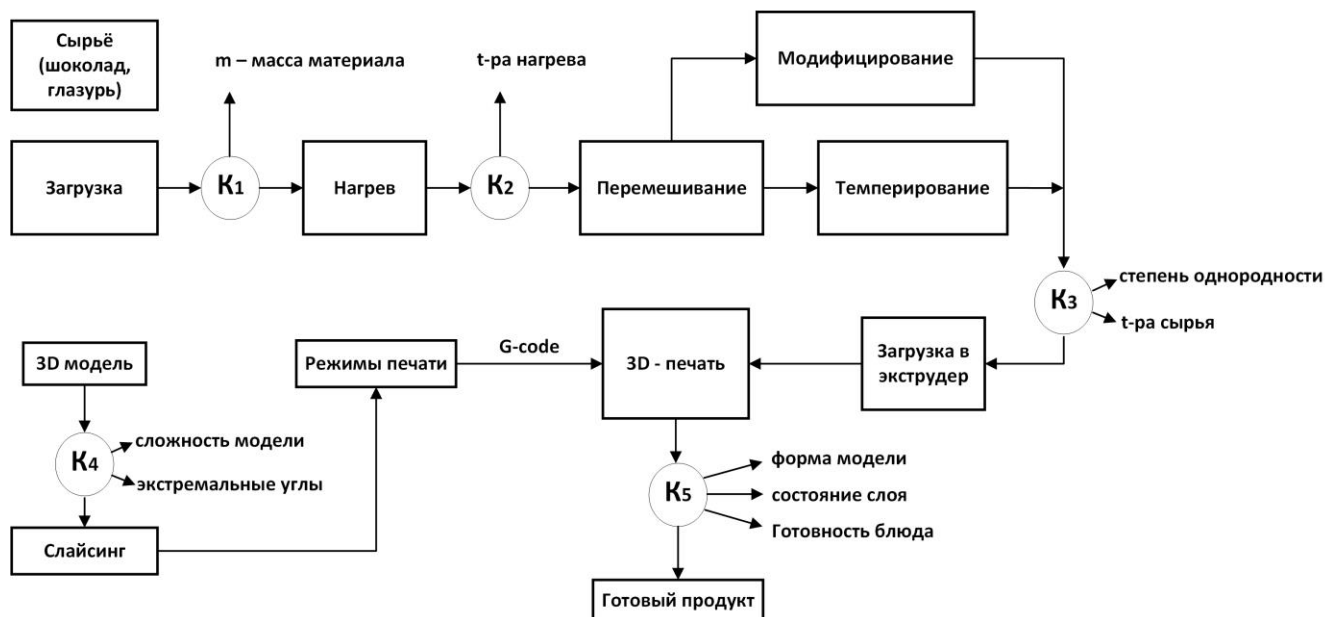


Рисунок 1.6. ФСС формирования качества шоколадных продуктов, получаемых методом пищевой 3D печати с указанием информативных параметров контроля и регулирования.

Наиболее целесообразным является проведение контроля в точке K5 (рисунок 1.6), непосредственно в процессе 3D печати. Таким образом система автоматизированного контроля может быть интегрирована непосредственно в устройство печати. Это позволит осуществлять управление протекающим процессом в режиме реального времени, путём оценки состояния печати и корректировки управляющих параметров.

### 1.3. Обзор существующих систем, моделей, методов и алгоритмов контроля и управления процессом 3D печати

Как показали проведённые выше исследования, одним из важнейших показателей качества продукции, полученной методом трёхмерной печати – является степень соответствия объекта его цифровой модели. Точность 3D печати один из ключевых критериев на рынке аддитивных технологий. От качества напечатанных изделий во многом зависит спрос на услугу 3D печати, на конкретном оборудовании.

### 1.3.1. Оценка и контроль результатов пищевой 3D печати шоколадных изделий

Анализ полученной функционально-структурной схемы (ФСС) процесса 3D печати шоколадом с указанием необходимых точек контроля показал, что наиболее информативными органолептическими показателями качества печатаемых изделий, которые необходимо контролировать в режиме онлайн в процессе производства являются: *форма изделия* и *состояние верхнего слоя*.

В настоящее время качество 3D печатных изделий определяется человеком визуально, а также при помощи измерительного инструмента - штангенциркуля или линейки. Также контролируется геометрия изделия, отклонение от перпендикулярности на прямых углах, отклонение от цилиндричности на окружностях и т.д. Помимо этого, существуют специальные тестовые модели, позволяющие провести оценку прочности напечатанных изделий.

Для съедобных распечатанных на 3D принтере блюд не существует каких-либо разработанных методик контроля, и качество объекта определяется человеком «на глаз», непосредственно после процесса печати. Форма изделий контролируется человеком условно, так как измерить съедобный объект не представляется возможным.

Ещё один из важных параметров, при контроле стабильности протекания процесса печати – это температура верхнего слоя нанесённого материала. Она очень сильно влияет на его состояние и поведение материала. Если температура подобрана неверно и находится чуть выше требуемых значений, то в течении некоторого времени форма изделия будет получаться всё более и более деформированной [118]. Это означает, что к концу печати изделие будет испорчено. На текущий момент проконтролировать это может человек, периодически «присматривая» за объектом печати и проводя визуальную оценку степени застывания верхнего слоя наносимого шоколада. Если в момент нанесения следующего слоя предыдущий слой шоколада является ещё жидким, то оператор может уменьшить температуру сопла или скорость печати в режиме реального времени, для сохранения качества объекта.

Существующая на данный момент времени оценка температуры нанесённого слоя и визуальный контроль формы изделия достаточно субъективны. За отсутствием профессиональных экспертов, а также вследствие большого количества времени, необходимого для проведения такого контроля человеком данный способ не приемлем в коммерческом применении.

### 1.3.2. Роль интеллектуальных технологий в решении задачи контроля и управления динамически изменяющимся объектом в режиме реального времени

С развитием интеллектуальных технологий стало возможно создание систем контроля ТП в режиме реального времени [7, 46, 52, 60] и их применение в аддитивном производстве. Одна из задач таким систем заключается в распознавании и выявлении внештатной ситуации или брака [124].

С технической точки зрения, для того чтобы реализовать такую систему достаточно дооснастить 3D принтер соответствующим оборудованием: одной или несколькими видеокамерами и дополнительным контроллером или компьютером, который обрабатывает полученные данные. Стоит отметить, что в основе программ чаще всего используются искусственные нейронные сети и глубокое машинное обучение, что позволяет настраивать и обучать систему на реакцию к определённым событиям.

Общий принцип заключается в том, чтобы визуально фиксировать каждый напечатанный слой, отдельный участок детали или даже всю форму печатаемого изделия и сравнивать этот результат с эталонной 3D моделью. Благодаря системам распознавания образов возможно контролировать текущее состояние печати, в режиме реального времени. Такие системы способны различать определённые виды локальных дефектов (например: недо-экструзия, пере-экструзия, капли и пустоты), а также некоторые виды глобальных дефектов (прекращение экструзии, отклеивание детали, расслоение и термическая усадка детали). При обнаружении каких-либо дефектов система может уведомлять пользователя, ставить печать на паузу и даже вносить свои корректировки для нормализации процесса. Это позволит сэкономить материал, рабочее время оператора и оборудования.

Благодаря таким решениям аддитивные технологии могут выйти на новый уровень.

### 1.3.3. Обзор существующих методов контроля технологического процесса 3D печати в режиме реального времени

В одной из предыдущих работ [78] был собран материал по теме автоматизированного контроля за процессом 3D печати, который, на наш взгляд, может быть полезным в выбранной области исследования.

В работе [87] предлагается метод автоматической оценки качества печатаемой на 3D принтере детали с использованием встроенной камеры, обработкой изображения, и контролируемого машинного обучения. Для любой модели, в зависимости от её геометрии, определяются желаемые контрольные точки (например, там, где происходит изменение формы модели и повышена вероятность возникновения брака) на которых будет произведена оценка качества. После запуска, печать начинается в обычном режиме, до достижения определенной контрольной точки. Затем принтер встаёт на паузу, располагает деталь под объективом камеры, и система автоматически фотографирует полученный результат печати, после этого печать продолжается до следующей контрольной точки. Анализ каждого изображения происходит по следующей схеме. Сперва изображение разделяется на 16 равных участков в матрице 4x4 и для каждого квадрата вычисляется среднее цветовое значение RGB. После этого его сравнивают со значениями идеального отпечатка. Если процент ошибки менее заданного значения, значит деталь печатается без дефектов. Затем применяется основной метод оценки качества - классификация SVM, которая определяет детали как «дефектные» или «хорошие» и принимает дальнейшие действия. В результате этот метод способен обнаруживать как дефект, такие как окончание нити или остановка печати в середине процесса, а также структурные и геометрические дефекты. К недостаткам этого метода можно отнести паузы в процессе печати, для выполнения снимков и проведения контроля. Также, камера установленная сверху не способна фиксировать дефекты в вертикальной которые могут возникнуть в вертикальной плоскости.

В работе [97] представляют разработку автономной системы, включающую в себя расширенные алгоритмы машинного обучения, для классификации и обнаружения проблем печати и самостоятельной коррекции процесса с применением оптимальных параметров. Предлагаемая система отслеживания в режиме реального времени использует свёрточные нейронные сети (CNN), которые обычно используются в алгоритмах глубокого машинного обучения с применением изображений на входе. Авторы выбрали нейронную сеть ResNet50, ввиду его высокой производительности на сложных наборах данных. Процедура состоит из двух этапов: обучение и мониторинг в режиме реального времени. После процедуры обучения модель готова к контролю печати в режиме реального времени. Если обнаруживаются такие дефекты как пере-экструзия или недо-экструзия система отправляет корректирующие команды путём взаимодействия через ПО Pronterface с открытым исходным кодом. Общее время коррекции от обнаружения дефекта, до исправления параметров, занимает не более 10 секунд. В результате система способна детектировать состояние печати на плоскости наносимого слоя и исправлять дефекты во время печати, быстрее скорости человеческой реакции. Точность системы достигает 98%. Тесты проводились на простой геометрической фигуре – прямоугольник, имевшей 100% заполнение. О результатах работы системы с другими 3D моделями в исследовании не упоминалось.

Контроль скорости экструзии в режиме реального времени также был предложен в работе [99] для контроля качества строительной 3D печати. Представленный алгоритм визуальной системы распознаёт экструдированный слой бетонной смеси, измеряет его ширину и сравнивает с заданной, для выявления дефектов недо-экструзии или пере-экструзии. В исследовании отмечено, что предложенный метод используют для разработки автоматизированной системы с обратной связью, которая будет регулировать скорость подачи материала так, чтобы обеспечить стабильную ширину полосы экструдированного материала, используя любую печатную смесь. Аппаратная часть системы контроля состоит из веб камеры Logitech 720p, направленной вертикально вниз на расстоянии 40

сантиметров от печатаемого слоя и одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 B. В качестве основной библиотеки обработки видео изображения выступает OpenCV v3. Авторами был выбран алгоритм обработки видео, основанный на распознавании формы, а не цвета или текстуры, которые обычно не отличаются надёжностью результатов. В процессе обработки видео выделяется каждый десятый кадр, для экономии вычислительных мощностей контроллера, и изменяется размер входного изображения до 640x480 пикселей. Затем происходит преобразование в оттенки серого и обрезается интересующая область. Таким образом упрощается обработка изображения по сравнению с исходным кадром, содержащим большое количество пикселей с каналами R, G, B и канал степени прозрачности. Затем изображение размывается фильтром «Гаусса», что позволяет удалить лишний шум. Метод Оцу применяется для сегментирования фона от переднего плана. Далее создаётся двоичное изображение, в котором экструдированный слой представляется белым, а фон – чёрным. После нахождения и проверки контура его ширина измеряется в разных координатах по высоте прямоугольного контура. Средняя ширина в пикселях преобразуется в дюймы с использованием «отношения пикселей на дюйм», полученного при калибровке. Последние десять приемлемых кадров используются для расчёта средней ширины слоя, что равно приблизительно 20 сантиметрам длины наносимого слоя.

В работе [94] авторы представили систему обеспечения качества “Проверь как ты построил” с возможностью контроля детали в процессе печати, захвата геометрии с использованием трехмерной цифровой корреляции изображений (3D-DIC) и сравнения геометрии печати с компьютерной моделью, чтобы обнаружить ошибки построения. Был реализован контрольный пример с использованием FDM (FFF) 3D-принтера демонстрирующий обнаружение локальных и глобальных дефектов в режиме реального времени. Для лучшего результата распознавания структуры объекта использовали специальный пластик с содержанием древесного волокна, который имеет более высокую шероховатость поверхности. После печати каждого слоя происходит сканирование поверхности и создание облака точек для этого слоя. Затем его сопоставляют и сравнивают с облаком точек слоя

полученного из G-Code. Если имеются большие расхождения система сообщает о дефекте. Достоинство данного метода заключается в наличии детальной информации о всех дефектах присутствующих в изделии, включая их точное расположение и размеры. К недостаткам можно отнести сравнительно высокую стоимость необходимого оборудования, и отсутствие системы принятия решений и само-коррекции процесса печати.

Метод контроля модели путём сканирования на каждом слое в режиме реального времени также реализован в работе [108]. Однако, в отличие от предыдущего способа, для реализации, необходима всего одна камера. Ещё одной особенностью является дополнительный модуль для взаимодействия пользователя с цифровой моделью объекта в среде смешанной реальности с использованием HoloLens. Основной принцип работы всей системы заключается в получении и обработке изображения печати на каждом слое. Так как камера располагается сверху, и глубина изображения теряется, отделение текущего слоя от остальных частей изображения производится, при помощи цифровой маски изображения, полученной из визуализации текущего слоя по G-Code детали. Для наложения маски на полученное изображение используют процесс регистрации изображения (алгоритм выравнивания) при помощи встроенной в MATLAB функции «imregister». Обработанное изображение преобразуется в двоичное, а затем, происходит воссоздание текущей печатаемой 3D модели в формате OBJ. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет запечатлеть любые дефекты напечатанной модели. Недостатком этого метода также является необходимость делать паузу для создания изображений текущего слоя, а также отсутствие системы автоматического распознавания дефектов.

Обзор и анализ существующих методов и приборов контроля качества 3D печати, разработанных за последние годы показал, что имеющиеся в настоящее время методы для контроля 3D печатных изделий в режиме реального времени являются в основном экспериментальными установками и не представлены в виде готового решения для конечного потребителя. Появившиеся методики контроля и автоматизации подбора параметров требуют более глубокой проработки и



адаптации для использования в пищевой 3D печати.

#### 1.4. Выводы по первой главе

Первая глава посвящена анализу предметной области. Подробно изучен технологический процесс пищевой 3D печати шоколадом. Рассмотрены работы, посвящённые данной тематике и изучены практические результаты печати. Были выявлены, проанализированы и систематизированы особенности данного процесса, приведена характеристика основных стадий ТП.

Рассмотрено понятие качества пищевой продукции, а также понятие качества, используемое в области 3D печати. На основе этого сформулировано определение понятия качества, являющегося основополагающим в данной работе.

Проведена классификация основных операций ТП пищевой 3D печати шоколадом. Проведён всесторонний анализ параметров, влияющих на стабильность протекания процесса и на конечный результат печати. На основании полученных результатов разработана ФСС влияния показателей сырья и режимов работы оборудования на качество получаемых шоколадных изделий на всех стадиях ТП. Также была разработана ФСС с указанием необходимых точек контроля на каждом этапе.

Выбраны и обоснованы наиболее информативные показатели качества пищевой 3D печати шоколадом: форма и состояние верхнего слоя. Показано, что существующие в настоящее время методы оценки этих показателей качества субъективны, определяются человеком «на глаз» и требуют присутствия оператора во время всего ТП 3D печати.

Проведённый разбор показал необходимость автоматизированного контроля за процессом пищевой 3D печати. Была поставлена задача разработки автоматизированной системы контроля органолептических показателей качества (внешний вид, состояние материала) и автоматизированного управления ТП пищевой 3D печати шоколадом, с использованием ИНС и систем компьютерного зрения (СКЗ).

Изучен опыт применения интеллектуальных технологий и систем технического зрения на промышленных линиях пищевого производства. Проведён обзор исследований посвящённой автоматизированному контролю за процессом 3D печати используемой в других областях промышленности и производства. Изучены и проанализированы методы контроля, предлагаемые зарубежными авторами, отмечены их достоинства и недостатки. Полученный опыт был учтён при проведении нашего исследования.

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ, ПРОВЕДЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ ШОКОЛАДОМ**

Для детального изучения технологического процесса пищевой 3D печати шоколадом необходимо проведение практических экспериментов и наблюдение за протеканием ТП, с целью накопления сведений о режимах работы оборудования и о результатах печати, необходимых для установления взаимосвязей между параметрами и дальнейшего математического анализа.

2.1 Разработка описания процесса пищевой 3D печати шоколадной массой в нотации IDEF0.

Для более наглядного отражения структуры технологического процесса пищевой 3D печати шоколадом была разработана общая декомпозиция в нотации IDEF0, с указанием всех необходимых компонентов, требуемых для проведения практических экспериментов, в идеальном случае.

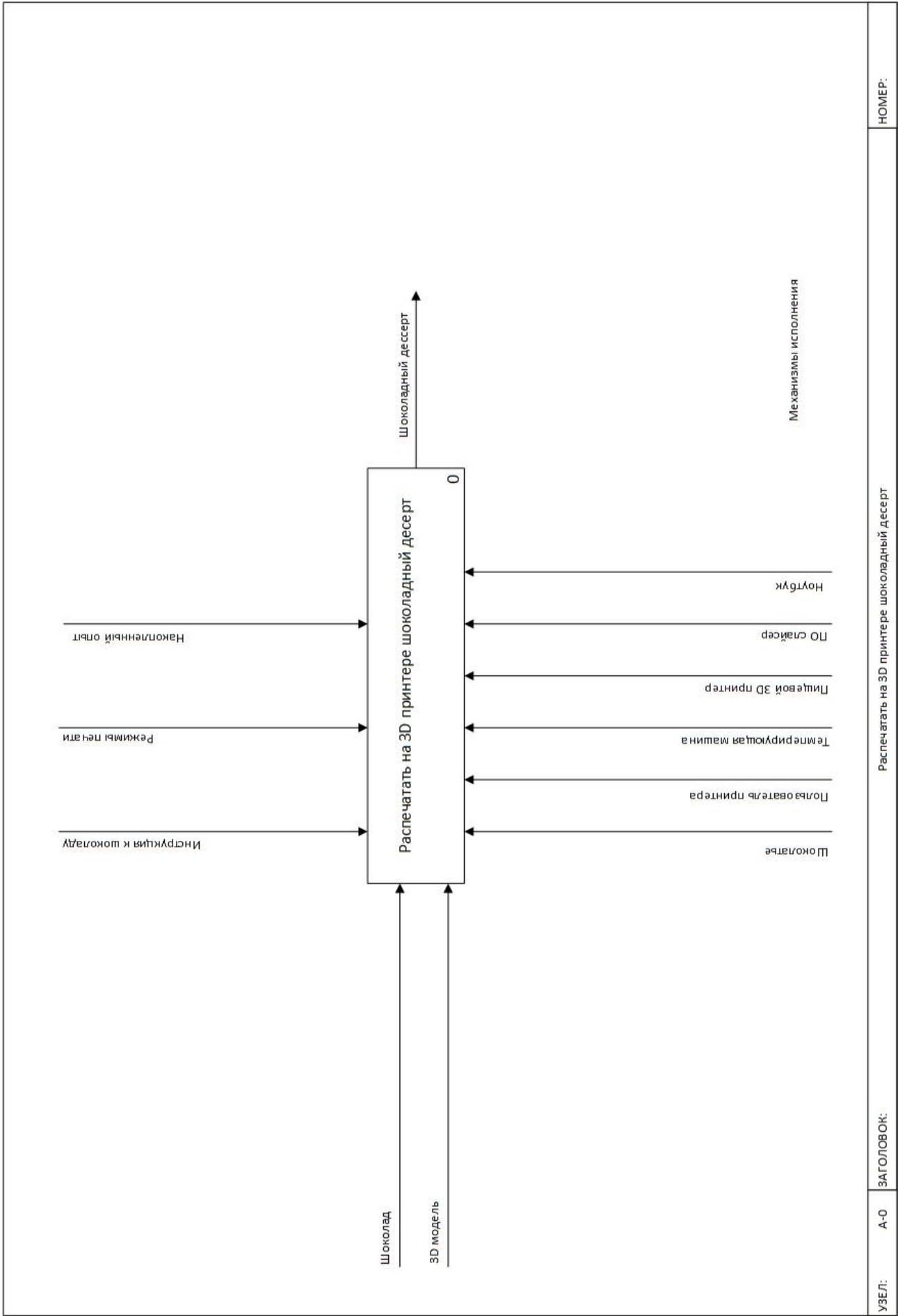
Декомпозиция второго уровня состоит из 3 операций, упомянутых в первой главе: подготовка сырья, подготовка управляющей программы «G-Code» и сам процесс 3D печати. В общем случае на входе данной схемы потребуется шоколад и трёхмерная модель желаемого блюда. В результате работы всей системы на выходе получается готовое блюдо.

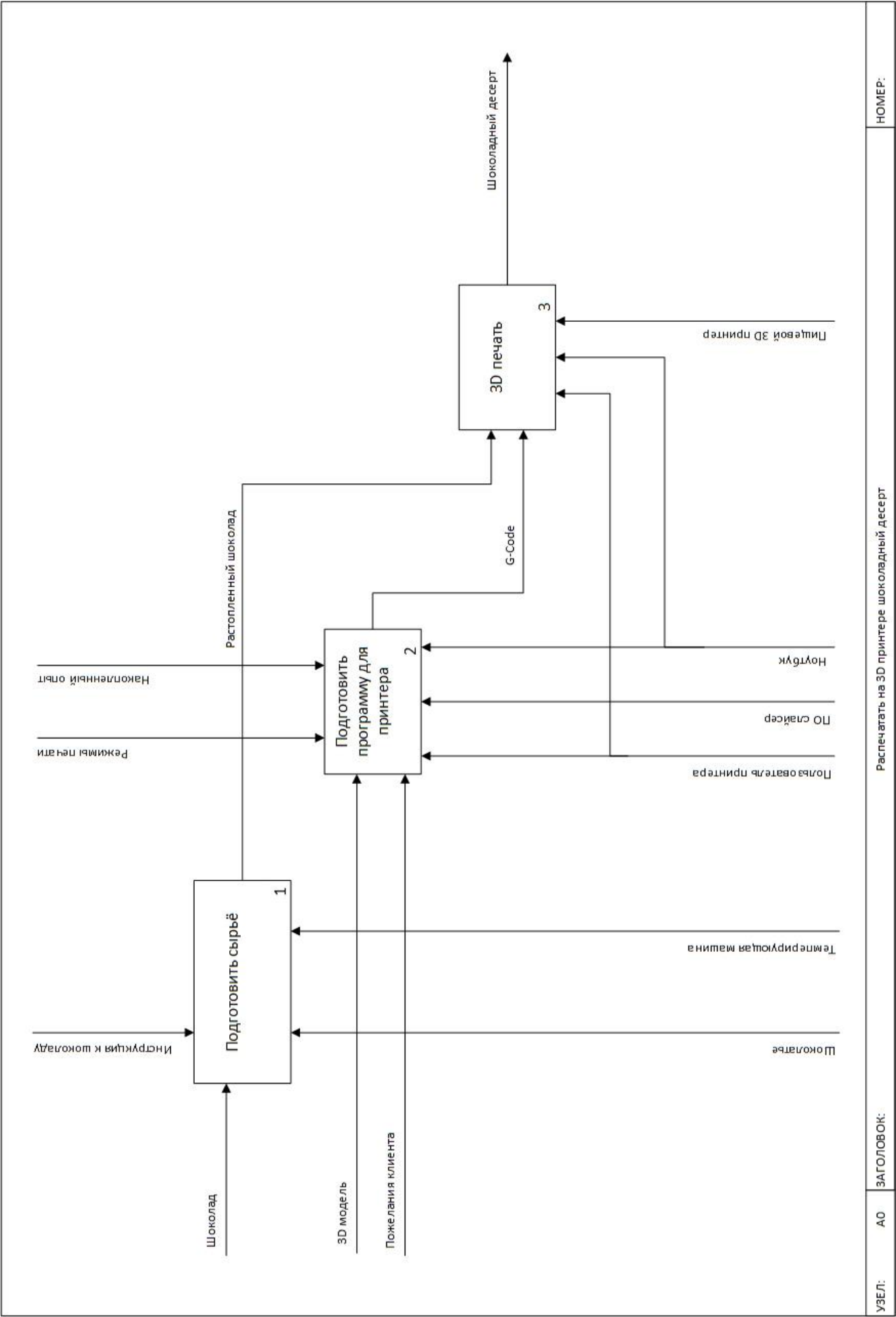
Для реализации данного процесса потребуется следующий персонал:

- оператор 3D принтера, имеющий опыт работы с аддитивным оборудованием, а также имеющий опыт в подготовке трёхмерной модели к печати;
- кондитер умеющий работать с шоколадом, обладающий знаниями о необходимых режимах работы с материалом.

А также оборудование:

- пищевой 3D принтер с экструдером для печати шоколадом;
- прибор для перемешивания шоколадной массы или tempering machine.





НОМЕР:

Распечатать на 3D принтере шоколадный десерт

ЗАГОЛОВОК:

А0

УЗЕЛ:

## 2.2 Проектирование и техническое исполнение экспериментальной установки для пищевой 3D печати шоколадной массой.

Для проведения исследований и изучения процесса пищевой 3D печати шоколадом необходим пищевой 3D принтер, способный обеспечить стабильную работу и повторяемость результатов. Главная особенность пищевых 3D принтеров заключается в экструдере – механизме нанесения печатаемого материала. Он должен способен работать с пищевыми ингредиентами, в нашем случае необходим экструдер для работы с шоколадом и шоколадной глазурью. Все остальные элементы 3D принтера: рама, электроника и механика – останутся неизменными. Таким образом, чтобы создать лабораторную установку для 3D печати шоколадом можно выбрать практически любой 3D принтер и заменить штатный экструдер на экструдер для печати пищевыми ингредиентами.

### 2.2.1 Обзор и анализ научно-технической информации о существующих экструдерах для пищевой 3D печати шоколадом.

Было отмечено, что определённая часть дефектов возникает из-за проблем подающего узла – экструдера. Поэтому особенно важно ответственно подойти к вопросу выбора подающего органа. В научных публикациях и в сети интернет существует множество материалов, описывающее различные конструкции экструдеров применяемых для 3D печати шоколадом и шоколадной глазурью [116, 123]. Среди всех экструдеров можно выделить 3 основных вида.

*Экструдеры с поршневой подачей* имеют корпус в виде цилиндра и рабочее тело в виде поршня [128]. В корпус такого экструдера заправляют расплавленный шоколад или глазурь, вставляют поршень, и устанавливают на принтер. Во время печати поршень перемещается, тем самым уменьшая объем камеры с сырьем, возникает давление, и материал экструдируется через печатающее сопло. Обычно поршень приводится в движение при помощи ходового винта, либо при помощи пневматики. Колбы с сырьем изготавливают как с подогревом, так и без него.

Данный вид экструдеров получил широкую популярность в области пищевой 3D печати ввиду его примитивности. Даже существуют коммерческие модели

пищевых 3D принтеров (Foodini, Choc creator v2.0 plus, Chocola3D и д.р.) на основе поршневого экструдера. Для любителей в сети интернет представлено очень много материалов помогающих изготовить поршневой экструдер. В большинстве конструкций за основу взят обычный медицинский шприц.

В качестве достоинств поршневых экструдеров можно отметить доступность, относительно простой процесс изготовления, а также широкий спектр печатаемых материалов (почти все жидкие и пастообразные материалы, которые возможно продавить через шприц). Для замены печатаемого материала достаточно поставить другой шприц с необходимым материалом. Удобный в обслуживании вариант. Однако недостатками таких экструдеров являются: остановка процесса печати во время замены или дозаправки материала, а также некоторые проблемы со стабильностью подачи, возникающие в случае неоднородности структуры сырья.

*Экструдеры с пневматической подачей* являются похожими на предыдущий вариант, однако в качестве движущегося поршня выступает сжатый воздух, нагнетаемый компрессором. Это делает процедуру замены/долива сырья более удобной, однако усложняет процесс контроля и управлением подачей. Для работы такого экструдера в 3D принтере необходимо дополнительное пневматическое оборудование. Примерами коммерческого продукта служат 3D принтеры Pancake bot и д.р.

*Экструдеры с шестеренчатым насосом* не так распространены ввиду большей сложности в их изготовлении. Такой экструдер состоит из колбы с сырьем, подающего блока и печатающего сопла. В подающем блоке располагается пара шестерен, которая при вращении перемещает сырье из колбы в сопло. Блок насоса и колба обычно имеют дополнительный источник нагрева, чтобы поддерживать шоколад и шоколадную глазурь в жидком состоянии.

Коммерческий вариант такого экструдера представлен под брэндом Chocol3D. [79]

Основные преимущества такого экструдера заключаются в более точной дозировке сырья при экструдировании, а также в возможности дополнительной

заправки сырьем прямо во время печати. Расплав шоколадной массы происходит непосредственно в колбе для сырья.

Из недостатков стоит отметить более сложную конструкцию в целом, а также более трудоемкую процедуру замены типа материала и более сложную прочистку экструдера. Необходимо разбирать узел шестеренчатого насоса если необходима тщательная чистка.

*Экструдеры с винтовым насосом* для 3D печати шоколадом практически не встречаются, так как они сложны в изготовлении. Для обеспечения правильной работы такого насоса необходимо очень точное исполнение ротора. Поэтому целесообразность его использования ставится под сомнение. Теоретически такой экструдер способен подавать жидкие и даже вязкие материалы, но при должном техническом исполнении.

При обзоре материалов не было найдено упоминаний о коммерческом исполнении экструдеров для 3D печати шоколадом основанных на винтовом насосе.

На основе изученной информации о пищевых экструдерах для 3D печати шоколадом было принято решение выбрать конструкцию на основе шестеренчатого насоса, ввиду более удобной дозправки материала, а также благодаря отсутствию инерционности подающей системы, что позволяет добиться более точной дозировки материала.

### 2.2.2 Постановка технической задачи

В качестве основы для экспериментальной установки по 3D печати шоколадом был выбран 3D принтер ISL - Mini, благодаря небольшим габаритам и возможностью редактирования прошивки. Первоначальное поле печати принтера всего 100x100x100мм, однако для большинства съедобных шоколадных изделий и десертов этого более чем достаточно. На основе поставленных задач и доступного пространства внутри принтера был сформирован ряд требований к создаваемому экструдеру.

Главное требование к экструдеру – обеспечение точной и стабильной подачи



материала (шоколад и шоколадная глазурь). В условиях печати при работе экструдера не допускаются пропуски материала или засоры печатающего сопла. Подача должна быть безынерционной, материал не должен вытекать самопроизвольно при кратковременной остановке подачи или при холостых перемещениях. Необходимо также обеспечить работу “ретрактов” при нерабочих перемещениях экструдера.

Благодаря описанным преимуществам, в качестве подающего механизма был использован шестеренчатый насос. Материал изготавливаемых частей экструдера должен иметь допуск для применения в пищевой промышленности. Корпус должен обладать хорошей теплопроводностью для того, чтобы поддерживать на нем рабочую температуру при печати в пределах от 25 до 45 °С. Для принудительного нагрева и поддержания температуры экструдер должен быть оснащен нагревательным элементом и термодатчиком. Для удобства эксплуатации экструдер должен иметь сменные печатающие сопла, а также бункер для хранения небольшого запаса подготовленного для печати сырья (жидкий шоколад).

Размер экструдера не должен превышать 60мм x 60мм x 140мм. Существует потребность в периодической чистке экструдера, поэтому он должен легко сниматься и разбираться на составные части, для удобной промывки. Вес экструдера должен быть минимален для того, чтобы не ухудшить качество печати в результате паразитных колебаний печатающей головки на больших скоростях. Чем ниже вес экструдера - тем меньше инерция, печатающей головки по оси X.

### 2.2.3 Разработка экструдера для подачи шоколадной массы

На основе анализа механизмов для пищевой 3D печати шоколадом, проведённого в разделе 2.1.1, а также научно-технической информации [80], было принято решение изготовить экструдер взяв за основу идею использования шестерёнчатого насоса, описанную автором Павлом Чернышовым в своём блоге [79], известном также под псевдонимом «Chocol3D».

Исходя из установленного задания, был произведен первичный выбор компонентной базы для создания экструдера. В качестве нагревательного элемента

был использован стандартный цилиндрический картриджный нагреватель размерами 6x20мм с напряжением питания 24 вольта, мощностью 40 ватт, применяемый в 3D принтерах. Термистор NTC - 100k также стандартный. Использование таких компонентов позволяет не вносить изменения в электронику принтера.

Шаговый двигатель, типоразмера Nema 17 выбирался исходя из минимального веса и минимальной глубины корпуса двигателя. Обычно в принтерах используются шаговые двигатели с глубиной корпуса от 20 до 46 мм, обеспечивающие на выходном валу крутящий момент от 0.9 Н/см до 2.6 Н/см, позволяющие быстро и стабильно перемещать каретку экструдера и кинематические оси принтера без пропуска шагов. Для тестового образца был выбран двигатель TL-42BYGH23.

Печатающее сопло должно иметь диаметр отверстия от 0.4 до 0.8 мм, для возможности создания детализированных моделей. В большинстве экструдеров в качестве сопла используются сопла для печати пластиком, имеющие узкий и довольно длинный внутренний канал. С одной стороны, при использовании узкого и длинного внутреннего канала, увеличивается площадь прогрева материала внутри сопла, с другой стороны увеличивается протяжённость участка с повышенным сопротивлением потоку для вязкого материала.

Поэтому было принято решение изготовить сопло собственной конструкции, с увеличенным диаметром внутреннего канала и более плавным переходом к выходному отверстию (рисунок 2.1), с целью снижения дополнительного сопротивления потоку.

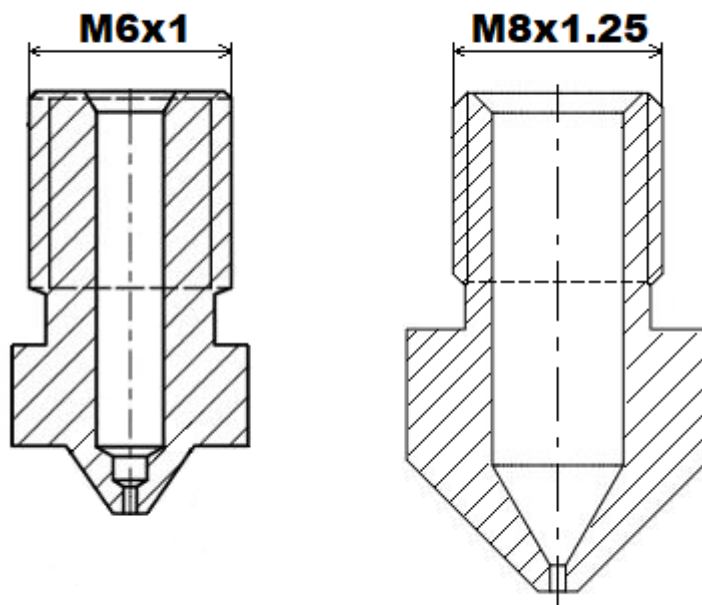


Рисунок 2.1. Сравнение сопла для печати пластиком (слева) и шоколадом (справа) в разрезе.

Размер шестерёнок для подающего насоса определялся исходя из размеров выбранных комплектующих и доступных габаритов корпуса. Расчёты проводились по методикам проектирования шестерённых насосов, описанных в работах [50, 58, 80]. При выборе габаритов насосной камеры учитывались следующие факторы:

- отсутствие пересечений с другими компонентами;
- равномерная толщина материала корпуса насосной камеры со всех сторон, для равномерного прогрева всего объёма насоса;
- из-за низкой скорости застывания шоколада расход насоса - невысокий, соответственно количество материала, подаваемое за один оборот насоса, должно быть минимальным, для более точной дозировки;
- сечения бункера для сырья, насосной камеры и выходного канала должны уменьшаться равномерно, плавно, без острых углов и мест, создающих дополнительное сопротивление потоку сырья.

В результате предварительной компоновки были созданы эскизы трёхмерные модели экструдера, которые показаны в разрезе (рисунок 2.2).

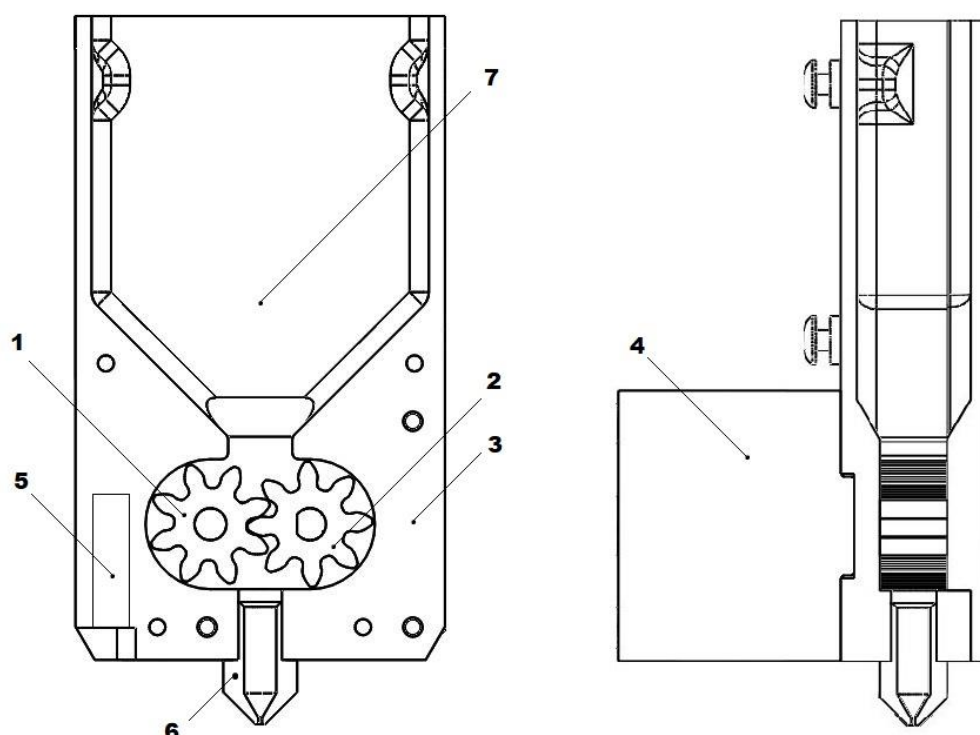


Рисунок 2.2. Эскиз экструдера для 3D печати шоколадом и шоколадной глазурью.

Экструдер состоит из ведомой (1) и ведущей шестерён (2), размещённых в корпусе (3), приводимых в движение шаговым двигателем (4). Прогрев экструдера осуществляется за счёт нагревателя (5), контролируемого термодатчиком. В корпус экструдера вкручено сопло (6). Также корпус экструдера имеет зону для хранения предварительно подготовленного сырья - бункер (7).

Принцип работы следующий: экструдер предварительно прогревается в течение 5 минут до рабочей температуры (34 – 36 °С). В бункер (7) загружается подготовленное сырьё (расплавленный темперированный шоколад, расплавленная шоколадная глазурь или каллеты из шоколада или глазури).

Перед началом первой печати, запускается команда поворота шестерён насоса (2, 3), для заполнения сырьём насосной камеры, до момента выхода шоколада из сопла. При повороте шестерёнок зубья цепляют шоколад и проворачивают его, оттесняя в нижнюю часть насоса, где образуется давление, которое выдавливает материал через сопло. Когда насосная камера заполнена сырьём, а подача идёт стабильно - экструдер готов для печати конечного изделия.

Во время печати экструдер находится в режиме поддержания заданной температуры. Дозировка материала осуществляется по команде принтера в те моменты времени, когда это необходимо. Таким образом, слой за слоем, принтер наносит материал в определённых местах, образуя конечное, объёмное изделие. По завершению печати нагрев не отключается, во избежание застывания материала. Поэтому после первого использования принтер сразу будет готов к следующей печати.

#### 2.2.4 Техническое исполнение экспериментальной установки для пищевой 3D печати шоколадной массой.

После выбора элементной базы и разработки эскизного проекта, была разработана точная инженерная 3D модель всего экструдера, с учётом размеров выбранных комплектующих. Также на этапе проектирования необходимо было учесть возможности производства и особенности технологий, по которым будут изготовлены детали. Знание о методах и способах изготовления поможет избежать возможных технологических проблем, погрешностей в изготовлении деталей и даже удешевить стоимость производства.

Согласно техническому заданию - корпус экструдера должен быть максимально лёгким, при этом он должен иметь хорошую теплопроводность, для равномерного прогрева всех поверхностей, контактирующих с сырьём. Это позволит избежать образование участков, на которых жидкий шоколад будет застывать, не успев достигнуть сопла. Из наиболее распространённых материалов с хорошей теплопроводностью широко доступны медь и алюминий. Так как медь тяжелее алюминия более чем в 3 раза и значительно дороже, для изготовления корпуса и крышки экструдера предпочтение было отдано алюминию. Однако, чистый металл является довольно мягким, вязким и не удобным в обработке. Прочность экструдера, а следовательно, и ресурс будет значительно ниже, при изготовлении детали из чистого алюминия. Технологически корпус экструдера изготавливается методом фрезеровки, поэтому в качестве заготовки для обработки

был выбран алюминиевый сплав Д16Т. Он отличается повышенной твёрдостью, прочностью и используется как конструкционный материал во многих областях.

Подающие шестерни были изготовлены из полиацетали. Этот пластик имеет допуск для использования в пищевой промышленности, и отличается хорошими антифрикционными свойствами, а также он достаточно прост в обработке.

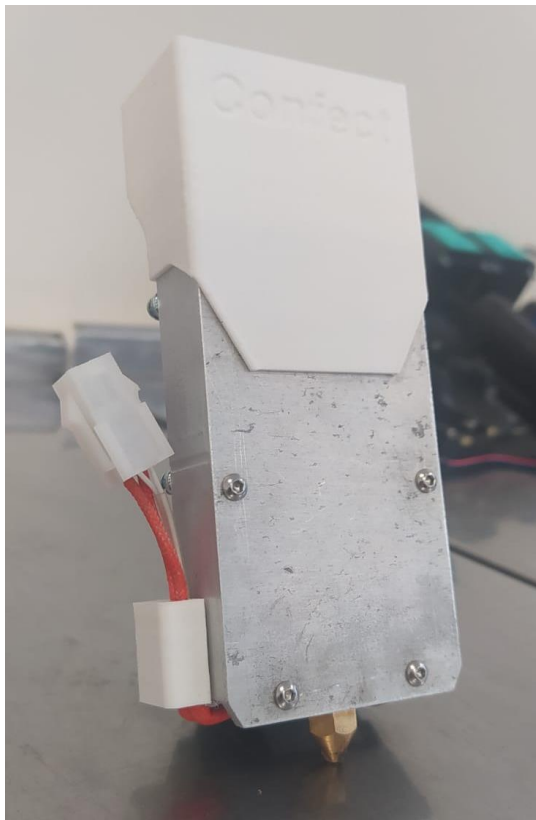


Рисунок 2.3. Изготовленный экструдер для печати шоколадом.

Верхняя крышка бункера для шоколада изготовлена методом 3D печати из специального пластика, обладающего антибактериальными свойствами REC - Biocide. Экструдер устанавливается на принтер при помощи магнитного крепления и подключается к разъёму. В случае необходимости экструдер возможно снять без особых усилий, для дальнейшей очистки. Вся конструкция в сборе представлена на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4. Модернизированный 3D принтер для печати шоколадных фигур.

В результате был разработан лабораторный стенд для пищевой 3D печати шоколадной массой, который показал стабильные результаты. А именно непрерывность подачи, работу с несколькими материалами и полноценную 3D печать нескольких тестовых фигур.

2.3 Экспериментальные исследования пищевой 3D печати шоколадной массой с последующей математической обработкой полученных результатов.

Для решения задачи автоматизированного контроля качества шоколадных изделий, получаемых методом 3D печати, необходимо иметь представления о взаимосвязи параметров, в том числе их математическое описание [11, 33]. Это позволит наглядно изучить влияние входных контролируемых и регулируемых параметров, возмущающих воздействий на качество поверхности и форму изделия,

получаемую в процессе печати и определять необходимые режимы работы 3D принтера.

Для этого были проведены экспериментальные исследования и выполнен математический анализ результатов.

### 2.3.1 3D печать шоколадных образцов

В качестве переменных параметров были скорость печати и высота слоя. Диаметр сопла был равен 0.8 мм. В качестве материала была использована тёмная шоколадная глазурь марки «Белгостар», по характеру поведения в экструдере она подобна шоколаду, однако лишена необходимости в предварительном темперировании, что упростило проведение экспериментов. Сперва шоколадная глазурь была растоплена, тщательно перемешана для получения однородной структуры и загружена в экструдер. После чего запускалась печать образца с заданными параметрами. На рисунке 2.5 представлена трёхмерная модель тонкостенного образца предварительно подготовленного для 3D печати в программе слайсере – Simplify3D.

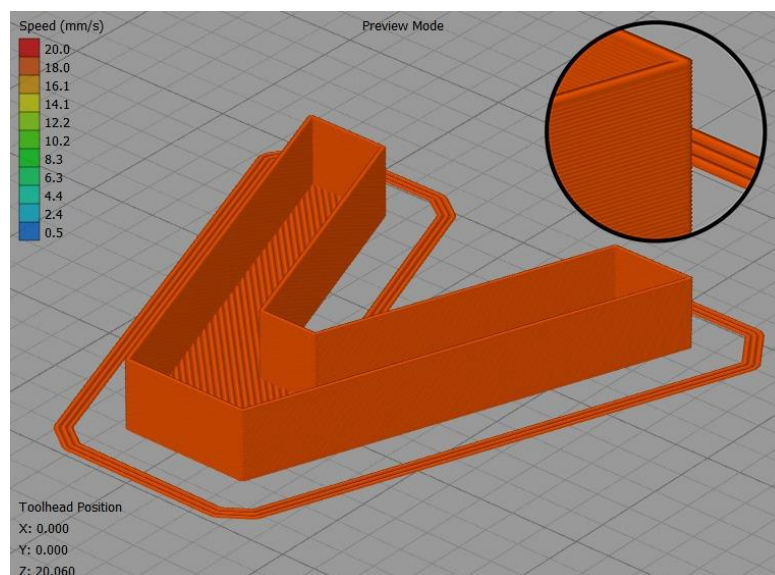


Рисунок 2.5. Режим предварительного просмотра модели в программе Simplify3D.

Каждый образец рассматривался экспертами – людьми, работающими в лаборатории технопарка ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» и имеющими компетенции в кондитерской отрасли, либо связанных с пищевым производством. Была проведена визуальная оценка качества напечатанной поверхности по 10 бальной



шкале. Также эксперты отмечали наличие или отсутствие дефектов для каждого образца. В таблице 2.1 приведены основные параметры печати и конечная экспертная оценка качества напечатанного объекта для каждой группы образцов.

Таблица 2.1 - Экспертные оценки для образцов модели №1

| №  | Материал | Высота<br>слоя,<br>мм. | Время<br>печати,<br>сек. | T,<br>град.<br>ц | V,<br>мм/с | Оценка<br>поверхности,<br>(0 - 10) |
|----|----------|------------------------|--------------------------|------------------|------------|------------------------------------|
| 22 | Глазурь  | 0.4                    | 1828                     | 36               | 6          | 8                                  |
| 21 | Глазурь  | 0.4                    | 1375                     | 36               | 8          | 8                                  |
| 23 | Глазурь  | 0.4                    | 1103                     | 36               | 10         | 5                                  |
| 24 | Глазурь  | 0.4                    | 922                      | 36               | 12         | 5                                  |
| 18 | Глазурь  | 0.3                    | 1313                     | 36               | 10         | 9                                  |
| 19 | Глазурь  | 0.3                    | 1097                     | 36               | 12         | 6                                  |
| 20 | Глазурь  | 0.3                    | 1014                     | 36               | 13         | 5                                  |
| 17 | Глазурь  | 0.3                    | 943                      | 36               | 14         | 6                                  |
| 16 | Глазурь  | 0.3                    | 737                      | 36               | 18         | 4                                  |
| 6  | Глазурь  | 0.2                    | 1758                     | 36               | 10         | 8                                  |
| 12 | Глазурь  | 0.2                    | 1270                     | 36               | 14         | 9                                  |
| 13 | Глазурь  | 0.2                    | 985                      | 36               | 18         | 7                                  |
| 15 | Глазурь  | 0.2                    | 888                      | 36               | 20         | 6                                  |
| 14 | Глазурь  | 0.2                    | 800                      | 36               | 22         | 5                                  |
| 25 | Глазурь  | 0.1                    | 1406                     | 36               | 22         | 7                                  |
| 26 | Глазурь  | 0.1                    | 1195                     | 36               | 26         | 7                                  |
| 27 | Глазурь  | 0.1                    | 1041                     | 36               | 30         | 6                                  |
| 28 | Глазурь  | 0.1                    | 925                      | 36               | 34         | 5                                  |
| 29 | Глазурь  | 0.1                    | 834                      | 36               | 38         | 5                                  |
| 30 | Глазурь  | 0.1                    | 761                      | 36               | 42         | 4                                  |

### 2.3.2 Математическая обработка результатов практического эксперимента пищевой 3D печати шоколадной массой

Для наиболее точного математического анализа показателей качества напечатанных пищевых изделий, необходимо проведение корреляционного анализа. Проведенные нами экспериментальные исследования и полученные в лаборатории пищевых аддитивных технологий на базе технопарка ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» статистические данные, позволили выявить основные параметры влияющие на ход протекания ТП пищевой 3D печати шоколадом. Результаты проведенных экспериментов были сопоставлены с показаниями экспертов.

Было установлено наличие связей между параметрами при помощи коэффициентов корреляции по формуле (2.1) и сформирована таблица корреляционных связей (таблица 2.2), для отражения глубины статистической связи между параметрами ТП пищевой 3D печати шоколадных образцов.

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_i - x_{ki})(x_j - x_{kj})}{\sqrt{s_{x_i}^2} \sqrt{s_{x_j}^2}} \quad (2.1)$$

где:  $r_{ij}$  – коэффициент корреляции между  $i$ -ым и  $j$ -ым параметрами;

$\underline{x}_i, \underline{x}_j$  – среднее значение  $i$ -ого и  $j$ -ого параметров;

$S_{x_i}^2, S_{x_j}^2$  – дисперсия  $i$ -го и  $j$ -го параметров.

Таблица 2.2 - Корреляционные связи данных

|                 | Высота слоя | Скорость печати | Время печати | Качество |
|-----------------|-------------|-----------------|--------------|----------|
| Высота слоя     | 1           | -0.83306        | 0.246742     | 0.126814 |
| Скорость печати | -0.83306    | 1               | -0.56379     | -0.51854 |

|              |          |          |          |          |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
| Время печати | 0.246742 | -0.56379 | 1        | 0.789008 |
| Качество     | 0.126814 | -0.51854 | 0.789008 | 1        |

Проверка значимости коэффициентов  $r_{ij}$  проводилась по критерию Стьюдента (2.2), так что при  $t \geq t_{кр}$  коэффициент принимался значимым, в противном случае коэффициент  $r_{ij}$  приравнивался к нулю.

$$t_{ij} = \frac{r_{ij}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{ij}^2}} \quad (2.2)$$

Корреляционная матрица связей между параметрами (таблица 2.2), была подвергнута проверке значимости по критерию Стьюдента, в результате чего, была получена преобразованная матрица коэффициентов корреляции  $R_{ij}$  (таблица 2.3).

Таблица 2.3 - Преобразованная матрица коэффициентов корреляции

|                     | 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           |

Процесс формирования корреляционной матрицы  $r_{ij}$  включает создание файла результатов наблюдений  $n$  параметров  $x_i$  в  $k$  опытах и последовательную обработку каждой пары столбцов.

На основании полученных данных (таблица 2.3) можно сделать вывод о взаимосвязи параметров технологического процесса. Поэтому 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.

### 2.3.3 Классификация дефектов пищевой 3D печати шоколадной массой

В результате проведённых экспериментов удалось получить группы образцов со схожими поверхностными дефектами. При наблюдении за ходом протекания ТП и анализе режимов работы оборудования установлены наиболее вероятные причины их возникновения. Подробное описание полученных результатов и их объяснение представлено в нашей работе [75]. Рассмотрим основные дефекты.

#### **Переохлаждение.**

Возникает в результате низкой температуры экструдера либо избыточного внешнего охлаждения. В момент выдавливания сырьё становится слишком вязким, и происходит «комкование» материала. Он начинает «волочиться», соприкасаясь с предыдущим слоем, и стенки блюда не могут быть сформированы.

#### **Перегрев.**

Возникает в результате высокой температуры экструдера, высокой скорости нанесения материала, небольшой площади сечения наносимого слоя, либо при повышенной температуре окружающей среды. В момент выдавливания сырьё становится слишком жидким, и происходит «растекание» материала. Образовываются каплевидные и утолщённые натёки, а для удержания заданной формы материалу не хватает вязкости. Соприкасаясь с предыдущим слоем, он начинает «проваливаться» по высоте и расти в ширь, распределяясь в

горизонтальной плоскости.

### **Волнистые стенки.**

Возникновение дефектов такого рода характерно при увеличении линейной скорости нанесения материала, а также при уменьшении высоты наносимого слоя. При уменьшении высоты наносимого слоя объём выдавливаемого материала пропорционально уменьшался. При значительном снижении объёма шоколадной массы, подаваемой через печатающее сопло с постоянным диаметром, движение потока становилось похоже на последовательность поочерёдно выдавливаемых капель. Непрерывность потока нарушалась и возникала периодичность при осаждении материала на поверхность изделия. Таким образом прямая стенка становилась волнистой, а её ширина становилась переменной.

### **Пропуск экструзии.**

Состояние кратковременного прекращения подачи наносимого материала, с последующим возобновлением печати. Это связано с наличием воздушных пузырьков или иных неоднородных примесей в некачественно подготовленном сырье. Это приводит к образованию локальных дефектов на текущем слое, похожих на «отверстия», которые впоследствии оказывают влияние на укладку следующих слоёв. Дальнейшее поведение таких дефектов зависит от степени «устойчивости» системы. Дефекты могут быть *затухающими* и полностью исчезать во время печати, а могут быть *незатухающими* и даже *нарастающими*. Отмечено, что при корректно настроенных параметрах печати такие дефекты уменьшались с каждым новым слоем, вплоть до их полного исчезновения.

### **Прекращение подачи.**

Состояние полного прекращения подачи, ввиду отсутствия материала или полного засора печатающего сопла.

Для наглядности полученные результаты сведены в общую таблицу классификации с изображениями упомянутых дефектов (таблица 2.4).

Таблица 2.4 - Классификация дефектов

| № | Тип дефекта                               | Характерные признаки                                                              | Причины возникновения                                                                                                                                                                                                       |
|---|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Переохлаждение                            |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Низкая температура печатающей головки</li> <li>- Высокая интенсивность охлаждения</li> </ul>                                                                                       |
| 2 | Перегрев                                  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Высокая температура экструдера</li> <li>- Высокая скорость нанесения материала</li> <li>- Малая площадь слоя</li> </ul>                                                            |
| 3 | Неравномерная экструзия, волнистая стенка |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Критически малый объем подаваемого материала</li> <li>- Высокая скорость нанесения</li> <li>- Несопоставимо большой диаметр сопла по отношению к высоте наносимого слоя</li> </ul> |
| 4 | Пропуск экструзии                         |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Неоднородная структура сырья</li> <li>- Наличие примесей или пузырьков воздуха</li> </ul>                                                                                          |
| 5 | Отсутствие подачи                         | Экструдер перемещается в холостую. Модель не строится.                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Возникновение пробки из-за низкой температуры</li> <li>- Наличие примесей в сырье</li> <li>- Отсутствие материала</li> </ul>                                                       |

На основе разработанной классификации возможно распознавание типа возникающего дефекта, с целью введения своевременных управленческих воздействий на параметры текущего технологического процесса пищевой 3D печати шоколадной массой.

## 2.4 Выводы по второй главе

Во второй главе были кратко описаны необходимые компоненты для пищевой 3D печати шоколадных изделий, представленные в виде нотации IDEF0, которые потребовались для проведения практических экспериментов.

Разработана экспериментальная установка для пищевой 3D печати шоколадной массой. Для этого был проведён анализ подающих механизмов (экструдеров), изучены их преимущества и недостатки. На основании проведённого анализа и выбранного шасси разработан экструдер для пищевой 3D печати шоколадной массой.

Проведены практические эксперименты пищевой 3D печати образцов из

шоколадной глазури. Осуществлена экспертная оценка каждого образца, а итоговые результаты с указанием режимов печати сведены в таблицу. Проведён математический анализ полученных данных. Установлены взаимосвязи параметров и представлены в виде матрицы коэффициентов корреляции.

На основании анализа результатов печати были описаны возникающие дефекты, объяснены причины их возникновения и создана их классификация, с указанием отличительных признаков. При наблюдении за ходом протекания ТП и при визуальном анализе результатов 3D печати отмечено, что в большинстве случаев дефекты появляются постепенно и имеют возрастающий характер поведения. А значит, при непрерывном визуальном контроле и своевременном обнаружении, возможно предотвратить его дальнейшее возникновение, путём внесения корректировок в ТП.

### **ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ (СТЗ)**

Как было отмечено в первой главе, для различных областей современного аддитивного производства, одним из прогрессивных научных направлений развития инструментов контроля, являются системы технического зрения [1]. Они успешно применяются для обеспечения контроля показателей качества изготавливаемого продукта в течение всего производственного цикла. Поэтому использование СТЗ для автоматизации контроля качества за процессом пищевой 3D печати шоколадом с последующей разработкой на их основе АСКУ ТП считаем востребованной и необходимой задачей. Разрабатываемые в данном исследовании методы контроля будут обладать общностью и могут быть использованы и в других областях пищевой 3D печати.

В предыдущих главах, а также в некоторых наших исследованиях [76] были рассмотрены основные показатели качества, которые можно оценить в процессе пищевой 3D печати шоколадных изделий. Анализ всего технологического процесса показал, что основную роль играет визуальная составляющая объекта, а именно его внешний вид (органолептический показатель качества). Такую оценку проводит оператор 3D принтера в процессе печати, или сам потребитель. От того, насколько хорошо напечатан объект, насколько точно его форма соответствует цифровой модели, насколько красиво и эстетично получилось изделие, зависит конечное восприятие продукта потребителем.

Безусловно, когда речь заходит о качестве 3D печати, в первую очередь потребители оценивают визуальное состояние напечатанного объекта. Он должен полностью соответствовать цифровой трёхмерной модели и быть максимально детализированным. Как было замечено, осуществлять визуальный контроль при помощи оператора – трудоёмкий процесс, имеющий ряд недостатков. Например, человеческий фактор, в который входит утомляемость, некомпетентность персонала и т.д.



Автоматизация визуального контроля печатаемого изделия на каждом слое позволит увеличить быстроту реакции системы на изменение параметров сырья или окружающей среды.

Для решения задачи визуального контроля на техническом уровне необходимо наличие видеокамер и компьютера для обработки полученных данных. Камеры устанавливаются на 3D принтер так, чтобы в объектив попадал центр рабочего поля, для наибольшей информативности от кадра. Количество камер влияет на точность проведения операции контроля, так как в случае применения нескольких камер, возможно фиксировать состояние объекта с различных сторон, уменьшая вероятность попадания части объекта в «слепую зону». Однако вместе с точностью контроля, увеличивается нагрузка на расчётно-вычислительную систему.

### 3.1 Автоматизация контроля формы печатаемой модели

В первую очередь, при автоматизированном контроле необходимо оценивать общее состояние печати, для полной уверенности в том, что технологический процесс протекает стабильно. Примерами нестабильной работы могут являться пропуски экструдером материала или полное отсутствие подачи. Чаще всего такие проблемы возникают из-за неправильно подготовленного сырья, наличия в нём примесей или твёрдых включений, а также из-за неверно рассчитанного количества требуемого материала [77]. В результате, выращивание модели прекращается, а принтер перемещается «в холостую». Также, известны случаи усадки и отлипания модели от печатной платформы, в результате чего происходит её деформация и нарушение процесса построения.

Такие проблемы возможно обнаружить путём контроля формы напечатанного объекта после каждого слоя печати. Если такой контроль проводится оператором, то человек анализирует результат печати и сравнивает его с визуальным образом 3D модели, которую желает получить.

В компьютерной графике для оценки формы объекта используется метод сравнения с эталоном, как наиболее перспективный и широко зарекомендовавший себя в области математических методов обработки изображений [20].

### 3.1.1 Математическая постановка задачи контроля формы печатаемого объекта

Сравнивать форму объекта с эталоном возможно в трёхмерном пространстве, путём построения облака точек для обоих объектов, а затем сравнить их объём. Также возможно сравнить двухмерную проекцию объекта на плоскость, с двухмерной проекцией эталона на эту же плоскость. Таким образом форма может быть оценена по оценке схожести двух изображений. Одно изображение – это эталон, то, что должно быть напечатано к текущему моменту времени. Получить его возможно путём визуализации «G-Code». Второе изображение – результат получившейся печати, запечатлённый при помощи видеокамеры.

Для решения задачи контроля геометрии с использованием цифровой видеокамеры необходимо представить входное изображение в виде объёмной матрицы. Каждый элемент этой матрицы называется элементом изображения или пикселем [37, 68]. В математических исследованиях и прикладных программах используется традиционная матричная запись:

$$A = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \dots & a_{0,N-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \dots & a_{1,N-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{M-1,0} & a_{M-1,1} & \dots & a_{M-1,N-1} \end{bmatrix} = a_{i,j}, \quad (3.1)$$

где:  $M, N$  – размер изображения по высоте и ширине.

Пиксель представляет собой одно или несколько чисел, описывающих его цвет и яркость. В зависимости от того, в каком цветовом пространстве представлено изображение, количество чисел, описывающих каждый пиксель, может меняться. Например, в цветовом пространстве RGB каждый пиксель описывается тремя числами, определяющими красный, зеленый и синий цвета

соответственно, а целое изображение описывается объёмной матрицей  $a_{i,j,k}$ . Обозначим исходное изображение, получаемое с камеры, в виде матрицы  $A(i,j,k)$ .

Для контроля геометрии напечатанного объекта необходимо сравнить его изображение с изображением эталона. Для этого оба изображения должны быть приведены к единому виду и иметь одинаковую размерность. Необходимо провести процедуру предварительной обработки изображения [18]. Так как на первом этапе определена задача контроля формы объекта, уменьшим размерность матрицы, путём перевода изображения в оттенки серого. Это позволит сэкономить вычислительные ресурсы и в дальнейшем упростить процедуру сравнения. Для перевода в оттенки серого применяется соотношение (3.2):

$$I = 0.2125 * R + 0.7154 * G + 0.0721 * B, \quad (3.2)$$

где:  $R$  – значение красного пикселя;

$G$  – значение зелёного пикселя;

$B$  – значение синего пикселя;

$I$  – значение пикселя в оттенках серого, равное от 0 до 255.

Следующим шагом производится бинаризация изображения, путём установки пороговых значений, для того чтобы выделить на изображении только ту область, на которой присутствует печатаемый объект. Массив пикселей бинаризованного изображения  $F[i, j]$  равен (3.3):

$$F[i, j] = \begin{cases} 255, & \text{если } A[i, j] \geq P \\ 0, & \text{если } A[i, j] < P \end{cases}, \quad (3.3)$$

где:  $P$  – пороговое значение, используемое при бинаризации, выбираемое пользователем в интервале  $0 \leq P \leq 255$ .

После преобразований матрица изображения печатаемого объекта будет иметь вид -  $F(i, j)$ . Значения матрицы будут принимать значения 1 или 0, в зависимости от того присутствует ли печатаемый объект в конкретном пикселе или

нет. Изображение эталона представим в виде матрицы  $E(i, j)$ . При полном совпадении объектов разница между этими матрицами -  $\delta_E$  будет равна нулю. Для сравнения воспользуемся выражением (3.4):

$$\delta_E = \sum_i \sum_j \frac{|F(i,j) - E(i,j)|}{|E(i,j)|} * 100\% \quad (3.4)$$

Однако на практике полное совпадение изображения с эталоном практически не встречается, поэтому задаётся допустимое различие –  $D$ . Совпадение объекта с эталоном будет проверено по правилу (3.5):

$$D \geq \delta_E, \quad (3.5)$$

где:  $D$  – заданное пороговое значение. Величина этого параметра обычно определяется опытным путём.

### 3.1.2 Методика получения изображения эталонного объекта печати

Для создания матрицы изображения эталонной модели  $E(i, j)$  необходимо осуществить следующие преобразования:

- построить траектории движения экструдера в трёхмерном пространстве путём анализа файла G-Code;
- придать объём линиям, в соответствии с настройками печати (ширина экструзии, высота слоя и т.д.);
- совместить точку наблюдения камеры созданного пространства с реальной камерой, расположенной на принтере;
- построить изображение и применить фильтры.

Построение трёхмерной модели виртуального объекта происходит в результате чтения уже построенной части файла G-Code. G-Code – это язык программирования для устройств с числовым программным управлением. Он широко используется во многих фрезерных, лазерных станках, а также в 3D

принтерах. В контексте данной работы, в таком файле содержится вся информация необходимая 3D принтеру для проведения операции 3D печати определённой фигуры. Файл G-Code имеет особую структуру, состоит из набора строк, которые поочерёдно выполняются устройством. В самом начале располагается «шапка» программы, отделённая специальными символами, в которой указываются комментарии с настройками текущей печати. Устройство пропускает эти комментарии и начинает выполнение файла с первых не закомментированных строк. В зависимости от программы-слайсера (программы создающей G-Code) шапка может содержать различную информацию, полезную для пользователя. Например, «Simplify 3D» в шапке программы указывает практически все настройки процесса печати. Благодаря этому возможно узнать некоторые переменные, используемые при печати: ширина экструзии, высота слоя, выбранный материал, температуру сопла и т.д.

Далее располагается стартовый скрипт, при выполнении которого принтер находит свои начальные координаты (G28) по трём осям (X, Y, Z), задаётся абсолютная система координат (G90), устанавливаются целевые значения температуры для нагревателей (M104, M109) и происходит обнуление координаты экструдера (G92 E0).

В основной части файла G-Code написаны команды для перемещения печатающей головки в пространстве с *экструдированием* необходимого количества материала (например: G1 X15.301 Y7.107 Z0.200 E0.0063). Команда (G1) обозначает перемещение инструмента из текущей позиции (в данном случае X0, Y0, Z0) в указанные координаты (X15.301 Y7.107 Z0.200) по кратчайшей траектории, и одновременное выдавливание материала на величину (E0.0063). Из таких команд состоит практически весь файл G-Code. Вся трёхмерная модель состоит из слоёв, обычно имеющих фиксированную в процессе печати величину. А каждый слой состоит из периметров и внутреннего заполнения. В свою очередь и периметры, и внутреннее заполнение состоят из большого количества небольших отрезков, каждый из которых обычно строится путём выполнения одной строки файла G-Code (команды G1).

Таким образом путём анализа выполненной части G-Code возможно выделить команды G1, и построить последовательность линий в трёхмерном пространстве, которые в совокупности будут являться трёхмерной виртуальной копией печатаемого изделия. Значения координат X, Y, Z указывают на точки начала и окончания отрезков модели. Их можно представить в виде массива (X, Y, Z, E). Для того, чтобы геометрия трёхмерной модели была правдоподобной необходимо придать объём линиям пропорционально экструдированному материалу. Объём каждой линии возможно рассчитать на основе изменения параметра (E) по формуле (3.6):

$$V_n = \frac{\pi D^2}{4} * (E_n - E_{n-1}) \quad (3.6)$$

где:  $V_n$  – объём n-ной линии;

$D$  – диаметр сопла;

$E_n$  – координата экструзии в конечной точке;

$E_{n-1}$  – координата экструзии в начальной точке.

Зная объём нанесённого материала, на конкретном участке пути, и представив линию нанесённого материала в виде цилиндра, возможно найти диаметр для каждой линии (3.7):

$$d_n = \sqrt{\frac{D^2 * (E_n - E_{n-1})}{l_n}} \quad (3.7)$$

где:  $d_n$  – диаметр n-ной линии;

$l_n$  – длина n-ной линии.

Длину n-ной линии –  $l_n$  можно вычислить по теореме Пифагора при помощи начальных и конечных координат (3.8):

$$l_n = \sqrt{(X_n - X_{n-1})^2 + (Y_n - Y_{n-1})^2} \quad (3.8)$$

где:  $X_n, Y_n$  – координаты конечной точки;

$X_{n-1}, Y_{n-1}$  – координаты начальной точки.

Таким способом, в виртуальном трёхмерном пространстве строится вся напечатанная к текущему моменту времени модель эталон (рисунок 3.1).

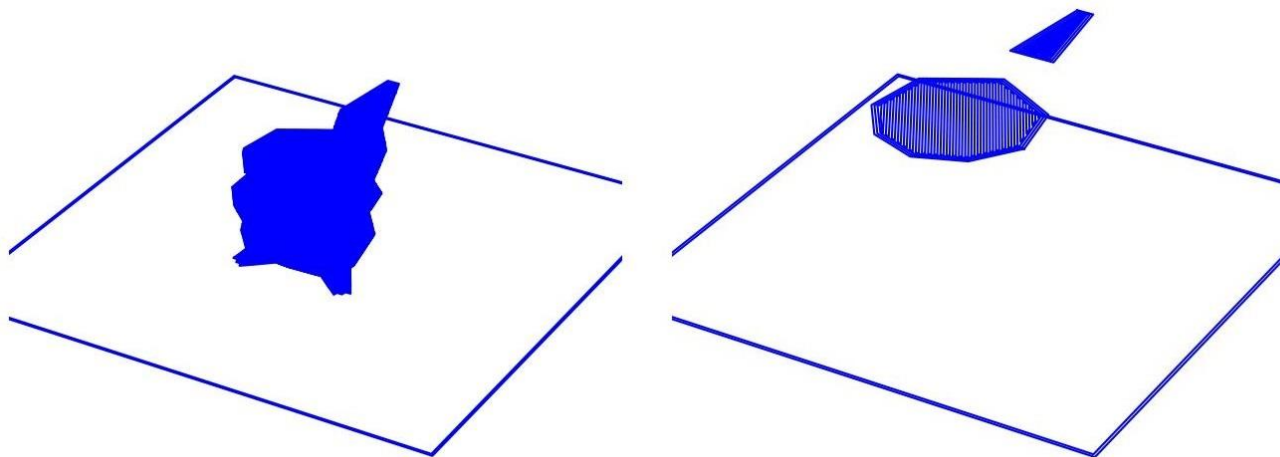


Рисунок 3.1. Пример построения трёхмерной реконструкции эталонной модели.

Стоит заметить, что в реальном процессе печати, линии в поперечном сечении будут иметь не круглую форму, а слегка сплюснутую, больше похожую на прорезь. Но в масштабах всего напечатанного изделия эта погрешность не будет оказывать значительного влияния.

Следующим шагом необходимо получить двухмерное изображение виртуальной трёхмерной модели эталона. Для корректного сравнения оба изображения должны быть получены с одинакового ракурса. Для этого потребуется повернуть камеру в виртуальном пространстве рабочего поля принтера на нужный угол, для сопоставления эталонного изображения и изображения фактически напечатанного объекта, сделанного камерой. Для того, чтобы получить плоское изображение объёмного объекта, представленного в трёхмерном пространстве, необходимо получить проекции его точек на определённую плоскость.

Рассмотрим основы формирования изображения [40, 41, 64, 65]. Сперва введём понятие мировая система координат (МСК), которая совпадает с нулевой точкой домашнего положения осей и является системой координат принтера (рисунок 3.2). Оси  $X$  и  $Y$  расположены параллельно печатной платформе, а ось  $Z$

направлена вертикально в верх. Именно в этой системе координат происходит построение массива точек печатаемой фигуры. Камера, контролирующая процесс печати, имеет собственную систему координат (СКК). Фактически центр камеры удалён от мировой системы координат на расстояния  $(t_x, t_y, t_z)$ . При этом камера имеет собственное направление осей, то есть она повёрнута относительно мировой системы координат на углы  $(r_x, r_y, r_z)$ . Также присутствует система координат изображения (СКИ), на которую и необходимо спроецировать точки эталонной фигуры.

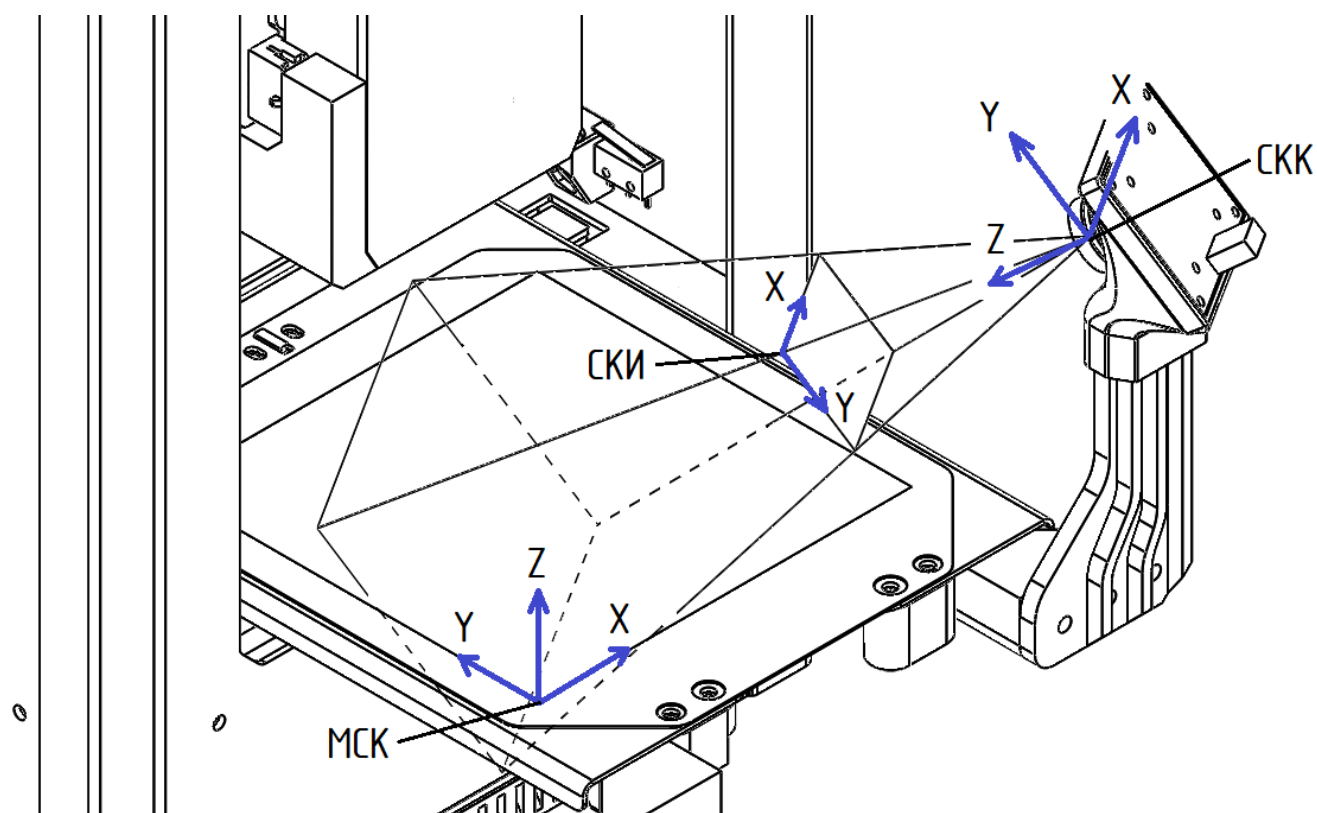


Рисунок 3.2. Используемые системы координат.

Поле зрения камеры представлено в виде усечённой пирамиды обзора называемой фрустум, которая имеет ближнюю и дальнюю плоскости отсечения пространства. Все объекты, которые попали внутрь усечённой пирамиды обзора будут спроецированы на плоском изображении.

Проецирование трёхмерной точки в мировой системе координат на пиксели в системе координат изображения выполняется в несколько этапов:



1. Трёхмерная точка преобразуется из мировых координат в координаты камеры с помощью внешней матрицы, которая состоит из вращения и перемещения между двумя системами координат.
2. Новая трёхмерная точка в системе координат камеры проецируется на плоскость изображения с помощью встроенной матрицы, которая состоит из внутренних параметров камеры.

Рассмотрим пример перспективной проекции. На рисунке 3.3 имеется точка оптического центра  $C$ , из которой выходит вектор  $Z$  (оптическая ось), фокусное расстояние  $f$ , на котором перпендикулярно оптической оси расположена плоскость проекции, точка в трёхмерном пространстве -  $X$ , и её проекция на плоскость -  $x$ .

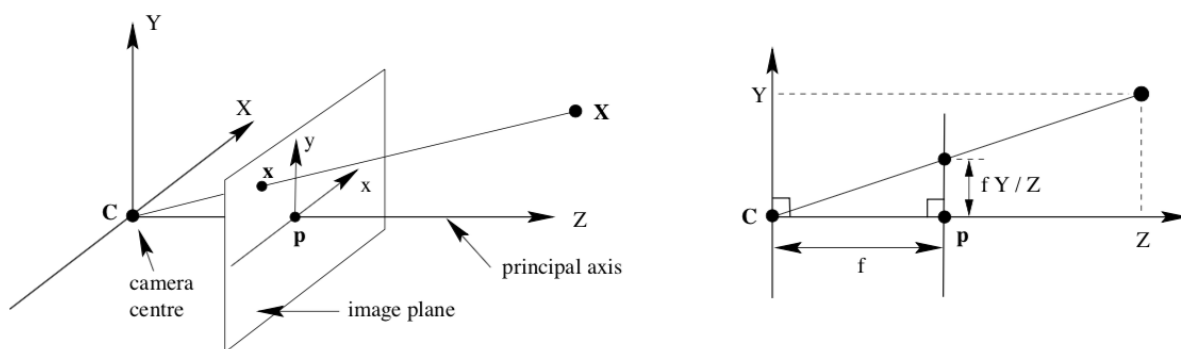


Рисунок 3.3. Пример проецирования точки на плоскость.

Для нахождения координат точки -  $x$ , воспользуемся простейшим уравнением перспективной проекции (3.9):

$$x = f \frac{X}{Z} \quad y = f \frac{Y}{Z}, \quad (3.9)$$

где:  $f$  – фокусное расстояние.

Уравнение перспективной проекции (3.9), представленное в матричном виде (3.10):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

где:  $X, Y, Z$  – координаты точки в трёхмерном пространстве;

$x, y$  – координаты точки на плоскости проекции;

Стоит обратить внимание на то, что для удобного представления всех последующих преобразований, проводимых в матричной форме необходимо введение однородных координат. Использование трёх измерений недостаточно, чтобы построить матрицу проекции. Поэтому размер матриц должен быть 4x4. Перевод из обычных координат в однородные осуществляется путём введения дополнительной координаты  $w$  (3.11):

$$(x, y, z) \Rightarrow \begin{bmatrix} wx \\ wy \\ wz \\ w \end{bmatrix}, (3.11)$$

где:  $x, y, z$  – координаты точек в пространстве.

Перевод из однородных координат в обычные можно осуществить путём деления каждого элемента на дополнительную координату  $w$  (3.12):

$$\begin{bmatrix} wx \\ wy \\ wz \\ w \end{bmatrix} \Rightarrow (x/w, y/w, z/w) (3.12)$$

Резюмируя вышесказанное, точки на плоскости будут связаны с точками в трёхмерном пространстве уравнением перспективной проекции (3.13):

$$x = PX, (3.13)$$

где:  $X$  – точки в трёхмерном пространстве;

$x$  – точки на цифровом изображении (пиксели);

$P$  – матрица проекции.

Матрица проекции состоит из трёх матриц и может быть записана в следующем виде (3.14):

$$P = K * [I|0] * C^{-1}, (3.14)$$

где:  $K$  – внутренние параметры камеры.

$[I|0]$  – единичная матрица перспективной проекции;

$C^{-1}$  – матрица внешней калибровки камеры.

Внутренние параметры камеры необходимы для связывания пиксельных координат точки изображения с соответствующими координатами в опорном кадре камеры (3.15):

$$K = \begin{bmatrix} a_x & s & C_x \\ 0 & a_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/pix & s & C_x \\ 0 & f/pix & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, (3.15)$$

где:  $f$  – фокусное расстояние;

$s$  – наклон светочувствительной матрицы (принимается равным нулю);

$pix$  – ширина одного пикселя;

$C_x, C_y$  – координаты принципиальной точки, в которой происходит пересечение оптической оси и матрицы проекции в системе координат изображения.

Система координат камеры характеризуется положением камеры в мировой системе координат, а также ориентацией, которую задают векторы ориентации камеры, и задаётся матрицей поворота и вектором сдвига. В однородных координатах матрица внешней калибровки можно записать следующим образом (3.16):

$$C^{-1} = \left( \begin{bmatrix} R & T \\ [0,0,0] & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T T \\ [0,0,0] & 1 \end{bmatrix}, (3.16)$$

где:  $R$  – вектор поворота камеры (положение камеры в мировой системе координат);

$T$  – вектор смещения камеры (координаты камеры в мировой системе координат).

Стоит заметить, что в действительности модель формирования изображения несколько отличается от рассмотренной. Примером является камера Обскура, в которой световые лучи, отражённые от объекта, сходятся в центральной точке (небольшое отверстие или линза) и проходя через неё проецируются на плоскость проекции, расположенной на фокусном расстоянии  $f$  (рисунок 3.4). В таком случае изображение получается перевёрнутым по осям  $XU$ . На практике же обычно используют виртуальную плоскость проекции, которая помещается между объектом и точкой центра проекции  $C$ , на таком же самом фокусном расстоянии. Это значительно упрощает расчёт, и исключает необходимость инверсии изображения по осям  $XU$ .

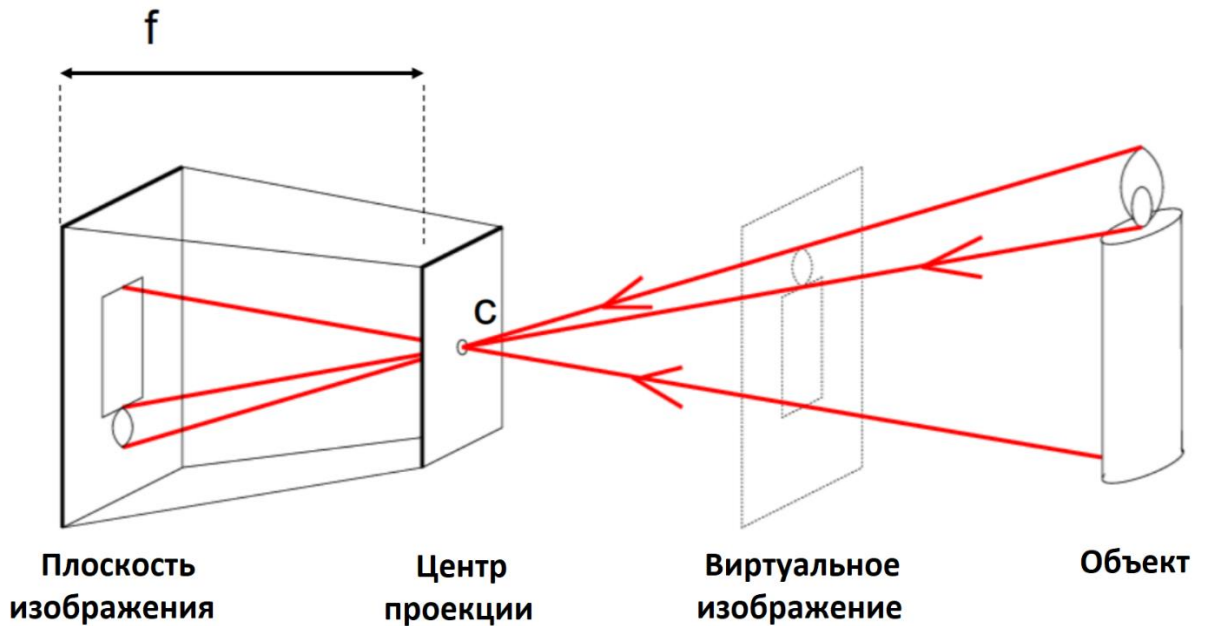


Рисунок 3.4. Пример проецирования объекта на плоскость, камера Обскура.

Полная форма уравнения перспективной проекции для нахождения координат точки в пространстве, спроецированной на плоскость (3.17):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & s & C_x \\ 0 & a_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^T & -R^T T \\ [0,0,0] & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

На основании данных о напечатанном G-Code, получена бинарная матрица  $E(i, j)$  содержащая информацию о форме и положении эталонного объекта. Нулевое значение говорит об отсутствии объекта, единичное – о присутствии объекта в данном пикселе. Размер матрицы эталонного изображения должен быть сопоставим с разрешением используемой видеокамеры. В данной работе используется значение - 640x480 пикселей.

### 3.1.3 Алгоритм работы модуля обнаружения деформации печатаемого объекта

На рисунке 3.5 представлен итоговый алгоритм работы компонента, позволяющего определять отклонения формы печатаемой фигуры от идеального результата.

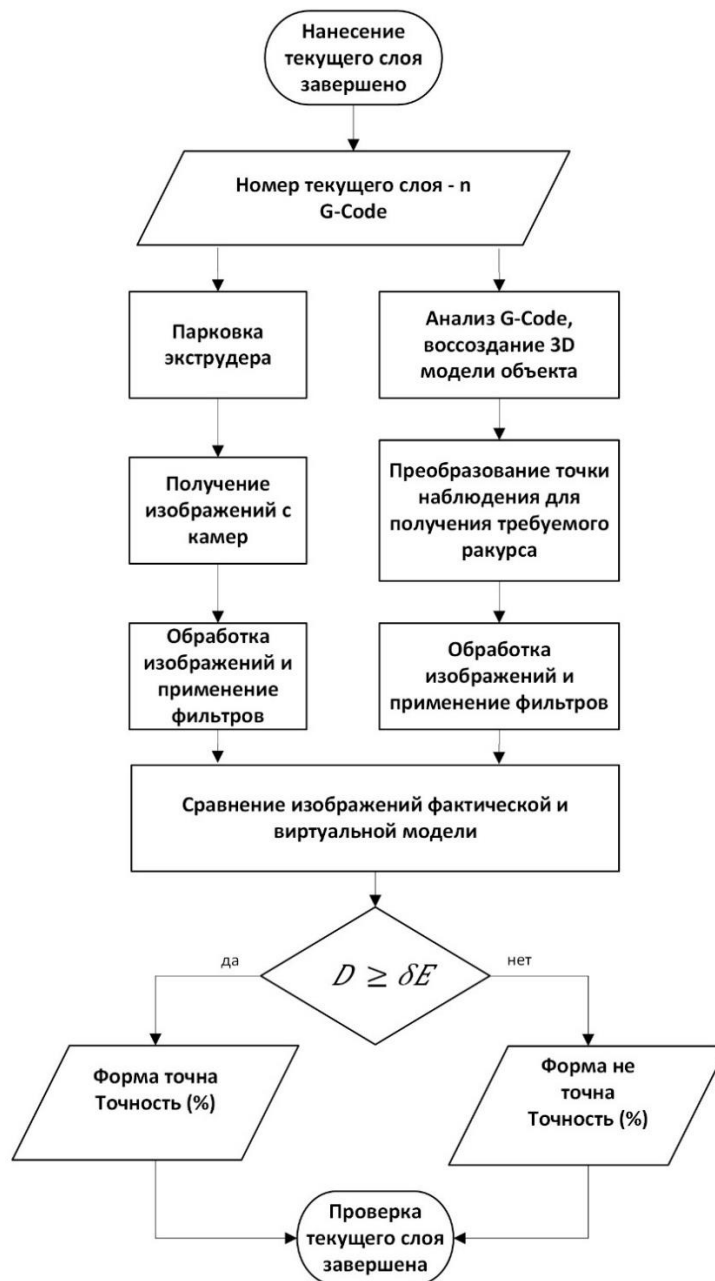


Рисунок 3.5. Алгоритм работы модуля контроля формы изделия.

Алгоритм вступает в работу сразу – после нанесения очередного слоя. Принтер оперативно паркует экструдер по осям X, Y. Приложение получает изображения печатаемого объекта с контролирующих видеокамер. Далее происходит пороговая бинаризация. Рабочее поле и корпус принтера окрашены в белый цвет, для создания хорошего контраста между шоколадной фигурой и остальным окружением, попадающим в кадр. В результате обработки получают несколько массивов  $F_1(i, j)$  и  $F_2(i, j)$  содержащих информацию о фактическом положении объекта в кадре и его форме.

Параллельно с этим процессом выполняется построение матриц эталонных изображений  $E_1(i, j)$  и  $E_2(i, j)$ . Для этого запрашивается информация о выполненном участке G-кода и выполняется фильтрация, с целью выявления построенных экструдером отрезков. На основании данных изменения значений координаты экструдера рассчитывается диаметр (толщина) для каждой линии. Таким образом, после обработки всего выполненного участка G-Code имеем виртуальную трёхмерную модель построенного объекта, состоящую из множества отрезков определённой толщины, связанных между собой. Далее исходя из соотношения (3.17) путём нахождения каждого пикселя, происходит получение изображений эталона – бинарных матриц  $E_1(i, j)$  и  $E_2(i, j)$ .

Стоит отметить, что калибровку внешних параметров камеры необходимо провести всего лишь раз, при настройке системы. Местоположение камер и рабочее поле 3D принтера остаются статичны относительно друг друга.

На последнем этапе происходит сравнение матриц  $E_1$  и  $F_1$ ,  $E_2$  и  $F_2$  по соотношению (3.4). По результатам оценки устанавливается или сбрасывается флаг соответствия точности формы ( $L_s$ ), а также записывается относительная погрешность печати ( $\delta_E$ ).

### 3.2 Разработка модуля оптимизации скорости печати путём визуальной оценки состояния верхнего слоя шоколада

В первой главе и в некоторых исследованиях [118], было отмечено, 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. Это может пагубно сказаться на итоговом качестве печатаемого продукта, вплоть до его полного брака. Чтобы избежать получение брака, время печати одного слоя намеренно увеличивают. Таким образом материал успевает застыть и изделие получается качественным. Достичь этого можно путём увеличения числа одновременно печатаемых изделий. Например, поставить на печать сразу несколько заказов. Однако при этом

значительно увеличивается время ожидания готового продукта для каждого потребителя. Такой вариант не подходит, когда клиенту необходимо получить заказ в ближайшее время.

В качестве альтернативы, возможно добавление паузы или снижение линейной скорости нанесения материала. Таким образом нанесённый материал образующий верхний слой будет успевает застыть и следующий слой будет ложиться более ровно. Однако не для каждого изделия и не для каждого слоя печати требуется пауза. Фигуры отличаются по площади поперечного сечения, а на скорость застывания шоколада также влияют внешние факторы, например температура окружающей среды. Таким образом подобранные параметры печати для одного изделия при определённых условиях могут не подойти для печати другой модели и при других условиях окружающей среды [118]. Добавление слишком длительной паузы, или сильное снижение скорости может это компенсировать, однако время печати значительно увеличивается, что является нежелательным фактором.

### 3.2.1 Математическая постановка задачи расчёта оптимальной скорости

Для более эффективной 3D печати и экономии машинного времени необходим автоматизированный расчёт скорости печати для каждого слоя и управление паузой. Добиться этого можно путём контроля состояния верхнего слоя шоколада, непосредственно перед нанесением следующего. Зная текущее агрегатное состояние поверхности материала, возможно определить минимальное и необходимое время выдержки. Это позволит наносить материал на уже застывшую поверхность и предотвратит возникновение таких дефектов, как «перегрев» и «натёки».

Обозначим общее время печати для одного текущего слоя –  $t_{\text{тек}}$ . Эта величина будет складываться из нескольких составляющих (3.18):

$$t_{\text{тек}} = t_{\text{печати}} + t_{\text{оценки}} + t_{\text{паузы}} \quad (3.18)$$

где:  $t_{\text{печати}}$  – полное время нанесения материала для текущего слоя;



$t_{\text{оценки}}$  – время отведённое на работу АСК;

$t_{\text{паузы}}$  – время выдержки.

Время нанесения одного слоя  $t_{\text{печати}}$  включает в себя печать периметров изделия и печать его внутреннего заполнения. Оно напрямую зависит от линейной скорости печати и от площади текущего слоя. О нём подробно будет сказано ниже. Время, отведённое на работу автоматизированной системы контроля  $t_{\text{оценки}}$  необходимо для получения и обработки визуальных данных с камер, для проведения оценочных операций и для принятия управленческих решений по текущему процессу печати. Это время зависит от вычислительных способностей используемого микрокомпьютера и, по предварительным прогнозам, оно занимает не более 2х секунд. Время выдержки после печати каждого слоя  $t_{\text{паузы}}$  является константой, зачастую имеющей довольно большое значение, что позволяет гарантировать полное застывание слоя. При этом возникают ситуации, когда материал уже застыл и готов к нанесению следующего слоя, а принтер стоит на паузе и продолжает ждать.

Эту проблему можно решить при помощи визуального датчика и определять состояние верхнего слоя шоколада. Обычная web-камера способна зафиксировать момент начала кристаллизации, о чем было подробно изложено в одном из наших исследований [76]. Таким образом, время, отведённое для паузы, может быть сокращено, либо увеличено для улучшения результата печати. Ориентиром готовности текущего слоя к дальнейшей печати будет флаг «состояние слоя» -  $Ls$ , устанавливаемый модулем оценки состояния верхнего слоя. В таком случае уже не будет необходимости учитывать марку шоколада, температуру окружающей среды или форму печатаемого изделия для того, чтобы выбрать оптимальную временную задержку  $t_{\text{паузы}}$ . Пауза становится адаптивной для каждого слоя и для каждой фигуры. В момент установки флага становится известно численное значение нового параметра  $t_{\text{крист}}$ , который равен времени прошедшему с момента начала

печати текущего слоя, до начала кристаллизации поверхности на этом слое. Таким образом  $t_{\text{паузы}}$  становится зависимой величиной от параметра  $t_{\text{крист}}$  (3.19):

$$t_{\text{паузы}} = t_{\text{крист}} - t_{\text{печати}} - t_{\text{оценки}} \quad (3.19)$$

В таком случае печать следующего слоя будет начата сразу же после установки флага «состояние слоя», и время паузы  $t_{\text{паузы}}$  будет минимально возможным для каждого слоя.

Могут возникать такие случаи, когда пауза вовсе не требуется, и шоколад начинает застывать быстрее, чем успевает завершиться печать текущего слоя. Например, такое можно наблюдать при большой площади поперечного сечения модели на каком-то определённом диапазоне высот (рисунок 3.6). В течение печати одной модели могут требоваться длительные паузы, в какой-то момент печати - короткие паузы, а в некоторых ситуациях и вовсе печать должна проходить без пауз.

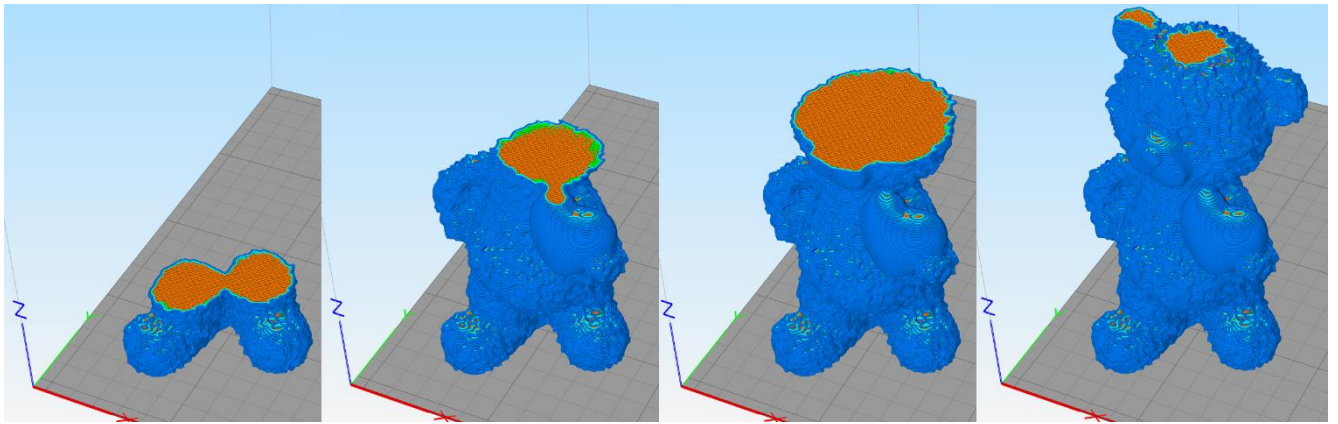


Рисунок 3.6 Изменение площади сечения одной модели на разных высотах.

В тех случаях, когда печать проходит без паузы, естественным образом, появляется возможность оптимизации скорости печати. Необходимо проанализировать печать текущего слоя и определить в какой момент времени начинает застывать шоколад. Если время застывания шоколада  $t_{\text{крист}}$  значительно ниже, чем время нанесения материала  $t_{\text{печати}}$ , тогда становится справедливо выражение (3.20):

$$t_{\text{печати}} + t_{\text{оценки}} = t_{\text{крист}} + t_{\text{тв}} \quad (3.20)$$

где:  $t_{\text{вт}}$  – время нахождения материала последнего слоя в твёрдой фазе.

Если шоколад застыл, а печать всё ещё продолжается, значит есть потенциал для ускорения печати. Как говорилось в первой главе, скорость 3D печати шоколадом ограничена именно длительностью застывания материала, но никак не механическими возможностями принтера. Поэтому считаем, что в идеальном случае величина  $t_{\text{тв}}$  должна стремиться к нулю, что позволит достичь наилучшего соотношения скорости печати к качеству получаемого изделия. Для этого необходимо уменьшить время печати одного слоя  $t_{\text{печати}}$ , в том случае, когда имеется такая возможность. Время нанесения материала для текущего слоя  $t_{\text{печати}}$  может быть рассчитано по формуле (3.21)

$$t_{\text{печати}} = \frac{l_{\text{пер}}}{v_{\text{пер}}} + \frac{l_{\text{зап}}}{v_{\text{зап}}} \quad (3.21)$$

где:  $l_{\text{пер}}$ ,  $l_{\text{зап}}$  – длинна траектории для периметра и заполнения соответственно;

$v_{\text{пер}}$ ,  $v_{\text{зап}}$  – линейная скорость печати на периметрах и заполнении изделия соответственно.

Практически любая объёмная фигура, печатаемая на 3D принтере, имеет внешние стенки (периметры) и внутреннее заполнение (рисунок 3.7). На практике печать слоя начинается именно с печати периметров, и на более низкой скорости. Это позволяет уменьшить проявление мелких поверхностных дефектов печати, имеющих механическую природу возникновения.

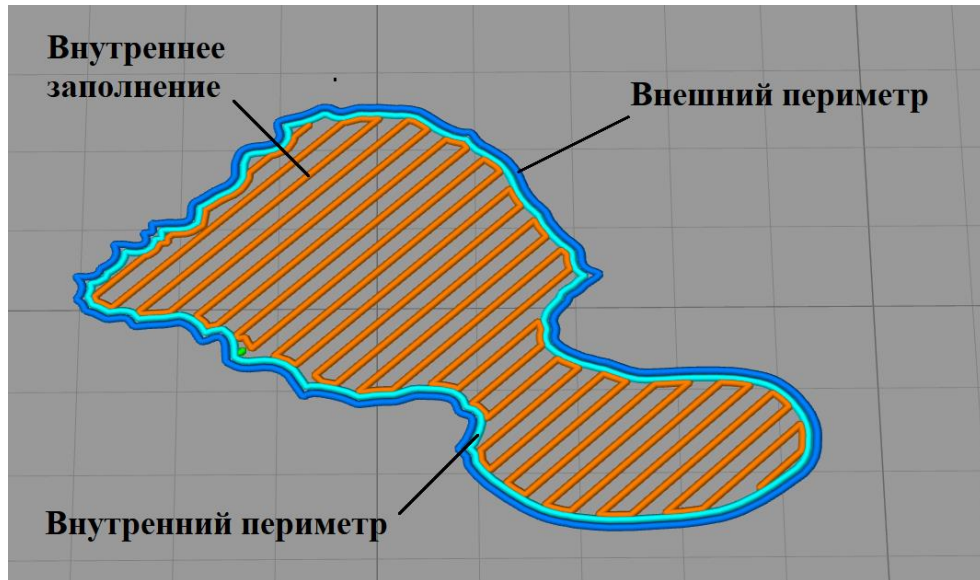


Рисунок 3.7. Структура одного напечатанного слоя.

Длина траектории для печати конкретного слоя может зависеть от ширины экструзии, от процента внутреннего заполнения изделия, от площади текущего слоя, от высоты печатаемого слоя и от диаметра сопла. В рамках готового файла «G-Code» изменить эти параметры довольно сложно, так как траектории пути, задаваемые командами «G0» и «G1» уже рассчитаны под заданные настройки. Если необходимо поменять какой-либо из вышеперечисленных параметров, требуется сгенерировать новый файл «G-Code» с новыми настройками. В данном случае в этом нет необходимости. Возможно повлиять на знаменатели в (3.21) и увеличить линейные скорости печати  $v_{\text{пер}}$ ,  $v_{\text{зап}}$  непосредственно во время технологического процесса построения трёхмерного изделия в режиме реального времени. Эти скорости обычно связаны между собой соотношением (3.22), задаваемым в настройках программы - слайсера:

$$v_{\text{пер}} = v_{\text{зап}} * 0.8 \quad (3.22)$$

Подставим эти данные в (3.20) и выразим зависимость «нежелательного» времени ожидания  $t_{\text{ТВ}}$  от линейной скорости печати (3.23):

$$t_{\text{ТВ}} = \frac{1.25 * l_{\text{пер}} + l_{\text{зап}}}{v_{\text{зап}}} + t_{\text{оценки}} - t_{\text{крист}} \quad (3.23)$$

Так как возникновение времени ожидания  $t_{\text{ТВ}}$  нежелательно, по вышеуказанным причинам, примем эту величину равной нулю. Время оценки  $t_{\text{оценки}}$  отсчитывается уже после того, как текущий слой нанесён с какой-то определённой скоростью  $v_{\text{зап}}$ , и не влияет на его значение, поэтому это время принимается равным нулю. Отсюда получим выражение для нахождения оптимальной скорости печати текущего слоя (3.24):

$$v_{\text{зап}} = \frac{1.25 * l_{\text{пер}} + l_{\text{зап}}}{t_{\text{крис}} \text{т}} \quad (3.24)$$

Длину пути периметра и пути заполнения для любого слоя возможно получить из текущего файла «G-Code». Начальная скорость движения печатающей головки  $v_{\text{нач}}$  указывается в командах «G1», перед блоками основных траекторий. Время  $t_{\text{крис}} \text{т}$  может быть рассчитано автоматически, после установки флага «состояние слоя». Таким образом оптимальная скорость для печати следующего слоя  $v_{\text{опт}}$  может быть рассчитана по формуле (3.25):

$$v_{\text{опт}} = \frac{1.25 * l_{\text{пер}} + l_{\text{зап}}}{t_{\text{крис}} \text{т}} * \frac{s_{n+1}}{s_n} \quad (3.25)$$

где:  $s_n$  – площадь текущего слоя;

$s_{n+1}$  – площадь следующего слоя.

По умолчанию программа - слайсер не записывает информацию о площади для каждого слоя. В таком случае удобнее будет рассчитать суммарную длину траектории следующего слоя ( $l_{\text{пер.след}} + l_{\text{зап.след}}$ ) из текущего «G-Code» и найти оптимальную скорость  $v_{\text{опт}}$  пользуясь отношением длин траекторий (3.26):

$$v_{\text{опт}} = \frac{1.25 * l_{\text{пер}} + l_{\text{зап}}}{t_{\text{крис}} \text{т}} * \frac{l_{\text{пер.след}} + l_{\text{зап.след}}}{l_{\text{пер.}} + l_{\text{зап.}}} \quad (3.26)$$

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

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

Стоит заметить, в тех случаях, когда флаг «состояние слоя» устанавливается сразу же, после нанесения материала, это значит - верхний слой набрал определённую прочность и уже начал кристаллизоваться. Таким образом для фактического значения  $t_{\text{крист}}$  будет справедливо соотношение (3.27):

$$t_{\text{крист}} \leq t_{\text{печати}} \quad (3.27)$$

В этом случае вычислить точное время  $t_{\text{крист}}$  довольно проблематично, так как отверждение основной части слоя происходит в момент печати, когда экструдер постоянно перемещается над контролируемым слоем. Это значительно затрудняет визуальную оценку, поэтому она проводится только после печати данного слоя и парковки экструдера.

Так как мы не можем быть уверены в точном значении  $t_{\text{крист}}$  по вышеуказанным причинам, оптимальную скорость невозможно рассчитать по формуле (3.26). Однако увеличить скорость всё равно необходимо, так как мы преследуем цель оптимизации. Для этого скорость печати следующего слоя будет найдена по формуле (3.28):

$$v_{\text{опт}} = v_{\text{тек}} * a * \frac{l_{\text{пер.след}} + l_{\text{зап.след}}}{l_{\text{пер.}} + l_{\text{зап.}}} \quad (3.28)$$

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

$a$  – коэффициент увеличения скорости.

Коэффициент  $a$  будет влиять на быстроту нахождения оптимальной скорости печати  $v_{\text{опт}}$  за определённое количество напечатанных слоёв. Он характеризует быстроту адаптации системы и может быть подобран экспериментальным путём. По умолчанию мы принимаем коэффициент  $a$  равным значению 1.1, что соответствует 10% увеличению скорости печати для следующего слоя.

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

### 3.2.2 Алгоритм работы компонента оптимизации линейной скорости печати

На рисунке 3.8 представлен алгоритм работы компонента, позволяющего определять максимально возможную скорость печати для каждого последующего слоя.

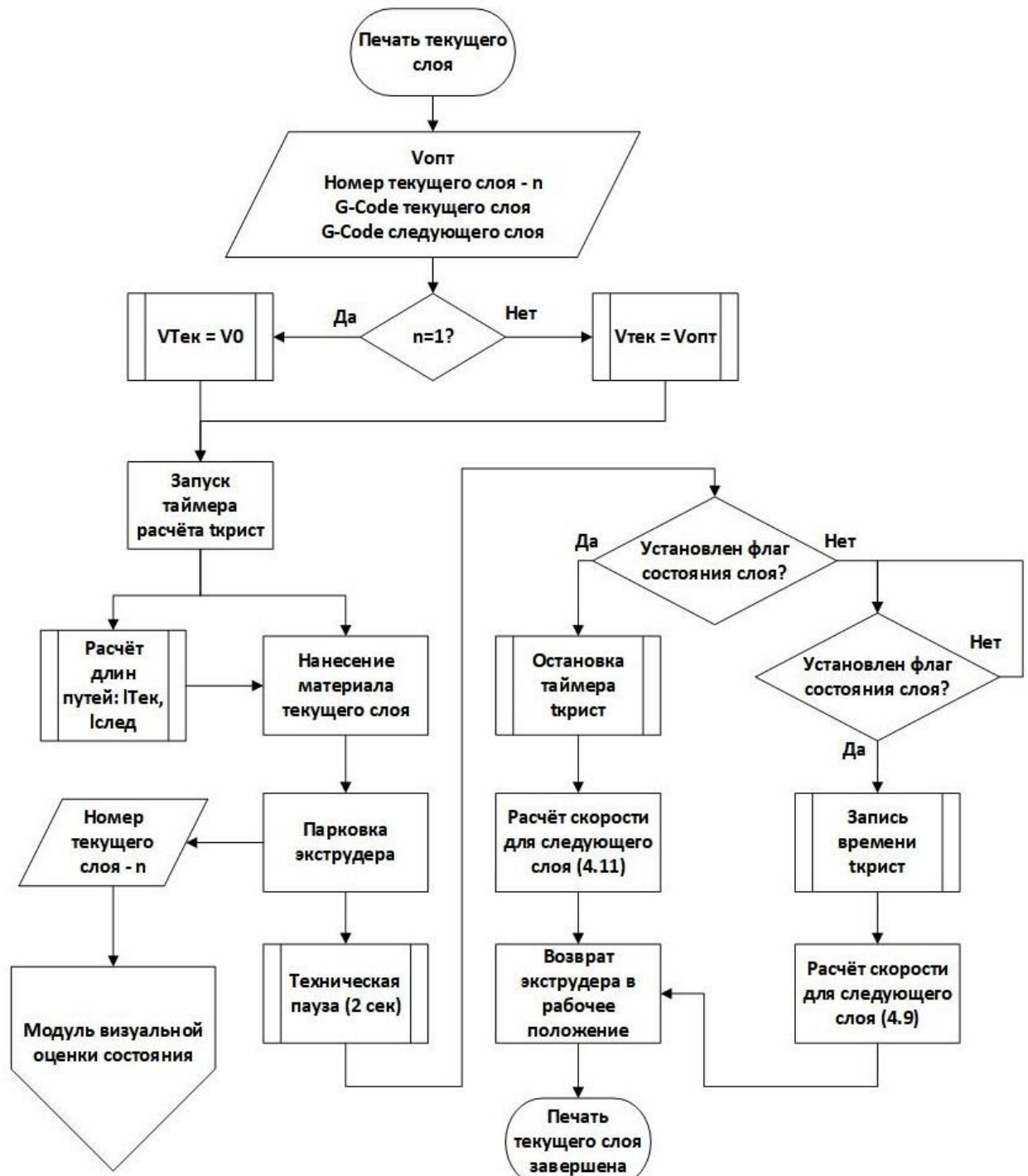


Рисунок 3.8. Алгоритм работы модуля оптимизации линейной скорости печати.

Пусть на входе блока имеем участок кода «G-Code» относящийся к текущему и следующему слою, а также информацию о рекомендуемой скорости печати, рассчитанную на предыдущем слое  $v_{\text{опт}}$ . Перед началом каждого слоя значение скорости  $v_{\text{тек}}$  приравнивается к рассчитанному значению  $v_{\text{опт}}$  или (при печати первого слоя) к начально заданным в программе - слайсере параметрам  $v_0$ .

В момент начала печати запускается таймер, для определения времени  $t_{\text{крист}}$ . Для оптимизации быстродействия системы, также параллельно с процессом нанесения материала происходит расчёт длины пути для текущего и следующего слоёв. По окончании нанесения текущего слоя происходит парковка экструдера, визуальная оценка состояния нанесённого материала и ожидание установки флага «состояние слоя».

Если флаг устанавливается сразу же, это означает, что верхний слой набрал достаточную прочность, и расчёт оптимальной скорости  $v_{\text{опт}}$  будет проводиться по формуле (3.28). После этого печать текущего слоя считается завершённой и начальный цикл будет вызван вновь, при печати следующего слоя.

Если же флаг не установлен, сразу после окончания нанесения материала, значит, что верхний слой ещё недостаточно прочен. Происходит ожидание установки флага «состояние печати», и затем определяется точное значение времени  $t_{\text{крист}}$ . Далее рассчитывается оптимальная скорость печати  $v_{\text{опт}}$  по формуле (3.26). После этого печать текущего слоя считается завершённой и начальный цикл будет вызван вновь, при печати следующего слоя.

### 3.2.3 Постановка задачи оценки состояния шоколадной массы

Один из возможных методов оценки динамики изображения объекта заключается в выделении элемента кадра  $\phi_{i,j}$  (пикселя или их группы) и рассмотрение изменения его цвета по всей последовательности кадров. Тогда этот математический объект можно рассматривать как матрицу решётчатых функций  $\phi_{i,j}[n]$ , отражающих динамику изменения отражения света от элементов поверхности снимаемого объекта. Именно на основе анализа этой матрицы можно судить о динамике видео объекта, за которым ведётся наблюдение.



Для того, чтобы осуществить корректную оценку состояния слоя необходимо решить сразу 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.

Для удобства расчётов преобразуем матрицу изображения  $A(i, j, k)$ , полученную с контролирующей видеокамеры, выделив каждый цвет в отдельные матрицы  $A_R(i, j)$ ,  $A_G(i, j)$ ,  $A_B(i, j)$ . Для отслеживания динамики изменения цветности обозначим область верхнего слоя печатаемого объекта на изображении –  $OBJ_n$ . Тогда каждый пиксель на изображении верхнего слоя будет равен (3.29):

$$OBJ_{nR}(i, j) = E_n(i, j) * A_R(i, j)$$

$$OBJ_{nG}(i, j) = E_n(i, j) * A_G(i, j) \quad (3.29)$$

$$OBJ_{nB}(i, j) = E_n(i, j) * A_B(i, j)$$

где:  $E_n$  – бинарная матрица эталонного изображения последнего напечатанного слоя;

$A_R(i, j)$ ,  $A_G(i, j)$ ,  $A_B(i, j)$  – матрицы цветовых каналов изображения,

$n$  – номер текущего напечатанного слоя.

Эталонный шаблон  $E_n$  получен аналогично принципу, описанному выше в разделе 3.1.2. Однако вместо проецирования всего облака точек печатаемой фигуры, осуществлялась проекция множества точек, относящихся только к текущему слою –  $n$ .

Найдём средние значения для каждого цвета по всему кадру и для удобства дальнейших вычислений разделим значения цветовых составляющих на их максимальное значение:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\sum_1^i \sum_1^j OBJ_{nR}(i, j)}{c} * \frac{1}{255} \\ g &= \frac{\sum_1^i \sum_1^j OBJ_{nG}(i, j)}{c} * \frac{1}{255} \\ b &= \frac{\sum_1^i \sum_1^j OBJ_{nB}(i, j)}{c} * \frac{1}{255} \end{aligned} \quad (3.30)$$

где:  $c$  – число ненулевых элементов.

Основываясь на результатах проводимых ранее экспериментов по охлаждению шоколадной массы [76], с целью экономии вычислительных ресурсов, динамику изменения цветности будем отслеживать только по каналу – Blue. Он показал наибольшую амплитуду в моменты кристаллизации материала и является наиболее информативным.

Построим массив средних значений цветности, получаемых с течением времени для канала Blue (3.31). Для этого необходимо обрабатывать кадры с определённым временным интервалом –  $t$ . В нашей работе принимаем его равным 0.5 секунды. Обозначим общее число снимков -  $x$ . Их количество не имеет строгого предела и зависит от быстроты застывания материала. Через каждый новый интервал времени  $t$  количество элементов в массиве  $B[x]$  увеличивается на единицу.

$$B[x] = [b_1, b_2, \dots, b_{x-1}, b_x] \quad (3.31)$$

где:  $b$  – среднее цветовое значение верхнего слоя фигуры в определённый момент времени.

$b_x$  – среднее цветовое значение верхнего слоя фигуры в текущий момент

времени.

На рисунке 3.9 представлен график кривых изменения цветности в процессе естественного охлаждения шоколадной массы с течением времени для одного из экспериментов. Во время снижения температуры поверхности до 28 °С, кривые R, G, B практически не меняли своих значений. Наблюдался слабый тренд снижения. Однако, начиная с 750 секунды кривые R, G, B резко изменили свой тренд, а значения стали повышаться. В этот момент времени температура зафиксировалась районе 28 °С и оставалась постоянной, что говорит о начале процесса отверждения. По сравнению с первой частью графика (0-750 секунд) отрезок 750-900 секунд является аномальным. Следовательно, при анализе графика охлаждения, для отслеживания момента начала кристаллизации верхнего слоя необходимо искать аномалии.

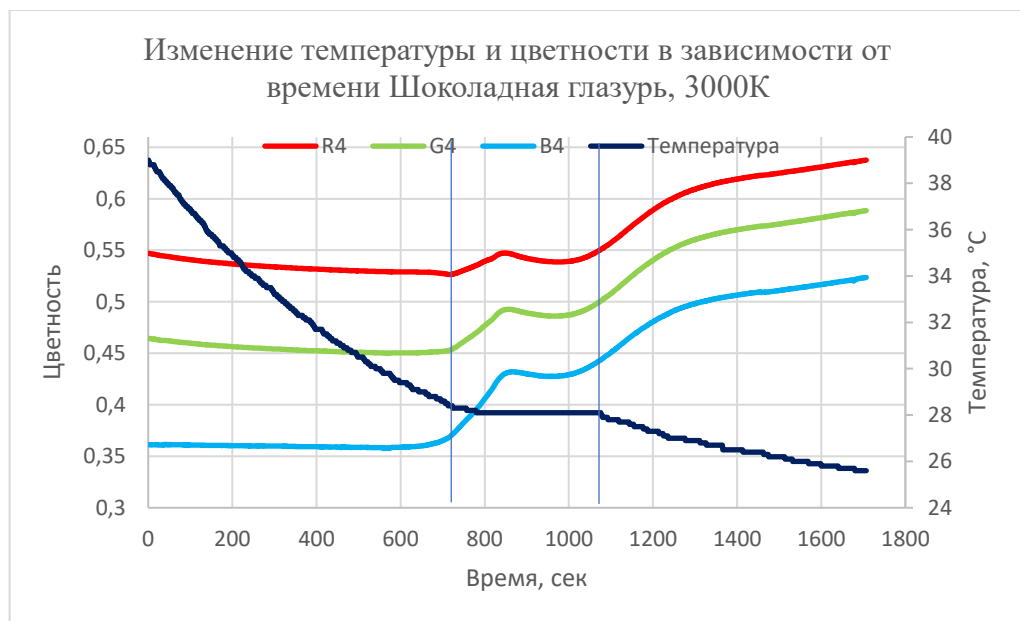


Рисунок 3.9. График изменения цветности сырья в процессе охлаждения.

Фиксировать наличие аномалии возможно по порогу отклонения прогнозируемого значения от факта. Если реальное поведение отличается от модельного больше, чем на некий порог, делается вывод о наличии аномалий.

Методом скользящего среднего рассчитывается прогнозируемое значение для текущего элемента  $B_{ma}[x - n]$  по формуле (3.32):

$$B_{ma}[x - n] = \frac{\sum_{i=x-n-w}^{x-n} B[i]}{w} \quad (3.32)$$

где:  $j$  – номер элемента;

$w$  – окно скользящего среднего;

$n$  – искусственная задержка.

Далее происходит сравнение прогнозируемого значения с фактическим. Аномалия будет отсутствовать на текущий момент времени, если справедливо неравенство (3.33):

$$B_{ma}[x - n] - B[x] < \Delta \quad (3.33)$$

где:  $\Delta$  – порог чувствительности системы.

Если кривая изменяет свой тренд, то будет справедливо другое неравенство (3.34), говорящее о наличии аномалии.

$$B_{ma}[x - n] - B[x] \geq \Delta \quad (3.34)$$

3.2.4 Алгоритм работы модуля визуальной оценки состояния текущего слоя шоколада.

На рисунке 3.10 представлен алгоритм работы модуля визуальной оценки состояния шоколадной массы на текущем слое. Он вызывается сразу после завершения печати текущего слоя, когда произошла парковка экструдера.

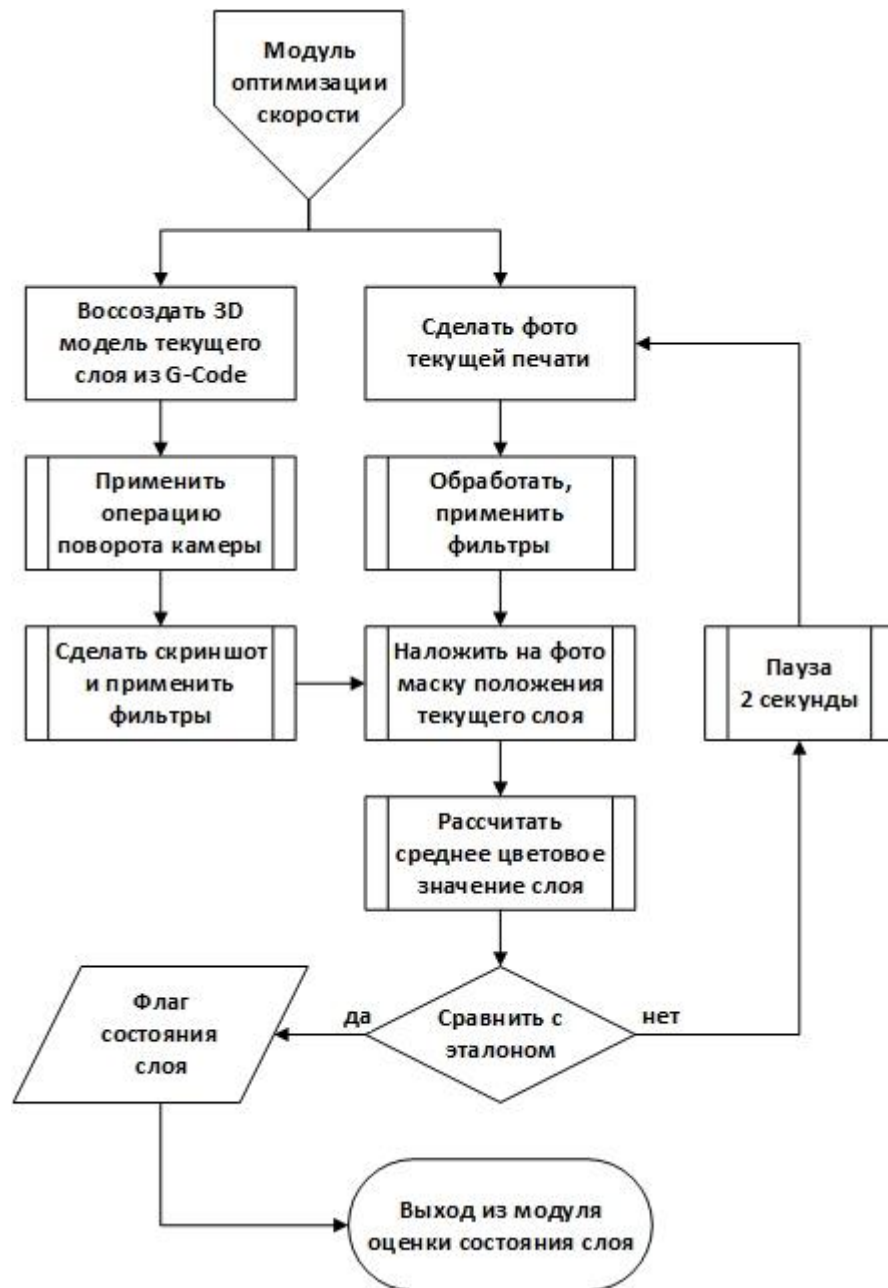


Рисунок 3.10. Алгоритм работы модуля визуальной оценки состояния текущего слоя.

В момент поступления запроса на оценку состояния текущего слоя (рисунок 3.10) запускаются параллельно два процесса: воссоздание 3D модели эталонной печати, с целью получения бинарной маски области текущего слоя, и обработка изображений с камер. В результате обработки изображений с камер получаются несколько двумерных массивов  $A_{1B}(i, j)$  и  $A_{2B}(i, j)$  в которых присутствует только синий спектр изображения (канал Blue).

Параллельно с этим процессом выполняется построение бинарных матриц эталонных изображений текущего слоя  $E_{1n}(i, j)$  и  $E_{2n}(i, j)$ . Для этого запрашивается информация о выполненном участке G-кода и выполняется фильтрация, с целью поиска строк, относящихся к последнему слою. Следующие построения аналогичны разделу 3.1.2.

Полученная маска накладывается на изображения отсекая лишнее пространство (3.29). После чего происходит оценка «средней цветовой составляющей» канала Blue в цветовом RGB пространстве по формуле (3.30).

Через каждый интервал времени  $t = 0.5$  сек записывается значение цветности и происходит построение временного ряда (3.31). Затем происходит его разглаживание по методу скользящего среднего (3.32).

Для того чтобы обнаружить изменение тенденции временного ряда, каждый раз, при добавлении нового значения оно сравнивается с предыдущими по формуле (3.33). Если превышен установленный порог чувствительности – значит кривая изменила свой тренд. При фиксации резкого изменения цветности происходит установка флага состояние слоя, и подпрограмма завершается.

### 3.3 Разработка алгоритма детекции поверхностных дефектов

Для более качественной и точной работы автоматизированной системы, а также для большей осведомлённости о результате текущей печати, необходим модуль позволяющий выявлять поверхностные дефекты, в случае их возникновения. Корректная классификация возникшего дефекта позволяет системе поддержки принятия решений внести необходимые корректировки в текущий процесс печати, для исправления получаемого результата, либо оповестить оператора о случившемся браке.

При проведении практических экспериментов по 3D печати шоколадом и шоколадной глазурью были выявлены основные типы дефектов, встречающиеся чаще всего, упомянутые в разделе 2.3.3 (таблица 2.4).

В процессе печати необходимо регулярное проведение оценки результата и классификации его состояния. Он может относиться к одной или нескольким

категориям: отсутствие каких-либо дефектов, наличие налётов (overheating), пропуск экструзии (under extrusion), рябь на стенках печатаемой модели. Обнаружить такие дефекты возможно при помощи систем технического зрения, успешно зарекомендовавших себя в использовании на производстве для оценки качества продукта, или внештатных ситуаций [13, 14].

### 3.3.1 Нейросетевая модель детектора поверхностных дефектов

При решении задач анализа изображений особое внимание стоит обратить на свёрточные нейронные сети (CNN) [63]. Они представляют собой модель глубокого обучения, специально разработанную для таких задач, как: классификация изображений, обнаружение объектов на изображениях и создание новых изображений. CNN обучаются с использованием больших наборов данных классифицированных изображений, где модель учится автоматически извлекать соответствующие признаки из изображений в процессе обучения. Затем модель тестируется на отдельном наборе изображений для оценки ее производительности.

Одним из преимуществ CNN является их способность изучать иерархические функции из изображений, захватывая функции низкого уровня, такие как края и текстуры, а также функции высокого уровня, такие как части объекта и контекст сцены. Это свойство широко используется при распознавании лиц, при анализе медицинских снимков, при автономном вождении транспортных средств и т.д. [16, 45, 47, 56, 70].

Основными элементами CNN являются свёрточные, объединяющие и полносвязные слои. Свёрточные слои отвечают за извлечение локальных шаблонов из входных изображений. Они используют свёрточные операции, применяя фильтры (так называемые ядра свёртки) к входному изображению, что помогает фиксировать пространственные иерархии и взаимосвязи между пикселями. На рисунке 3.11 представлен пример операции свёртки бинарного изображения фильтром  $3 \times 3$  с шагом 1.

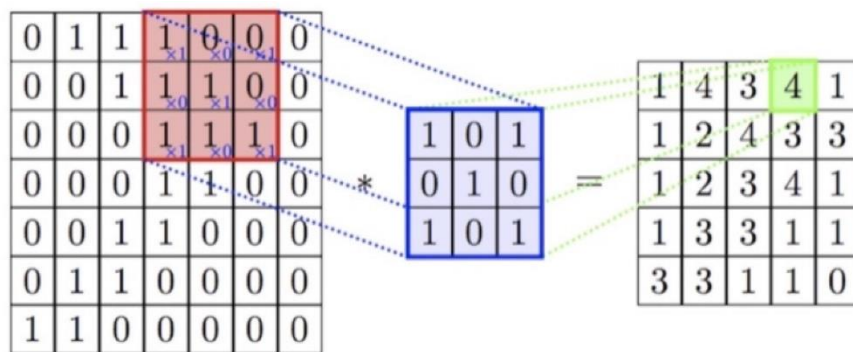


Рисунок 3.11 Применение операции свёртки к бинарному изображению.

За свёрточными слоями обычно следуют функции активации, например ReLU (Rectified Linear Unit), чтобы ввести в модель нелинейность.

Слои объединения (Pooling) уменьшают выборку карт объектов, созданных свёрточными слоями. Они помогают уменьшить пространственные размеры карт, что в итоге снижает вычислительную сложность модели и делает её более эффективной. Обычно применяют операцию MaxPooling. В качестве параметров для данной операции существуют: размер фильтра и шаг. На рисунке 3.12 представлена работа фильтра размером 2x2 с шагом 2.

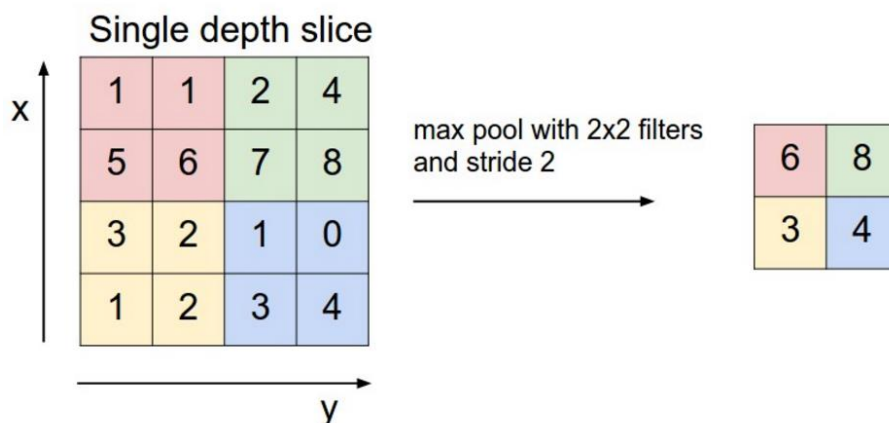


Рисунок 3.12. Применение операции MaxPolling.

Полносвязные слои — это традиционные слои искусственной нейронной сети, в которых все узлы связаны с узлами в предыдущем и последующих слоях. Эти слои обычно используются на заключительных этапах CNN, чтобы делать прогнозы на основе функций, полученных из свёрточных слоев и слоев



объединения. За полностью связанными слоями следует функция активации, такая как softmax, для задач классификации нескольких классов.

На сегодняшний день существует огромное количество различных видов сверточных нейронных сетей (CNN). Рассмотрим самые базовые конфигурации, появившиеся раньше всего:

Одиночные свёрточные нейронные сети - наиболее простой тип CNN, состоящий из одного свёрточного слоя, за которым следует слой объединения и один или несколько полносвязных слоев. Одиночные CNN могут использоваться для простых задач классификации изображений, распознавания рукописных цифр или других задач обработки простейших изображений.

Многослойные свёрточные нейронные сети - более глубокие CNN, состоящие из нескольких свёрточных слоев, слоя объединения и полносвязных слоев. Глубокие CNN могут извлекать более сложные и абстрактные признаки из изображений, что делает их более мощными для более сложных задач классификации или обработки изображений.

Рекуррентные свёрточные нейронные сети – имеют рекуррентные слои, такие как LSTM (Long Short-Term Memory) или GRU (Gated Recurrent Unit), добавленные к свёрточным слоям. Это позволяет моделям использовать память и способность работать с последовательной информацией [49]. Такие сети полезны при обработке временных последовательностей, таких как видео или аудио.

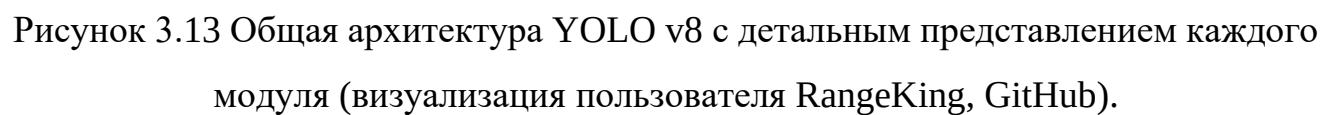
Inception-сети: Это тип CNN, который использует модуль Inception, представленный в одной из версий сетей Inception (например, Inception V3, Inception-ResNet). Модуль Inception предлагает эффективный способ использования различных размеров фильтров одновременно, что позволяет моделям обрабатывать детали на разных уровнях абстракции.

ResNet (Residual Networks – тип CNN, который использует блоки с пропусками (residual blocks), позволяющие модели обучаться на очень глубоких архитектурах без проблем с затуханием градиентов. ResNet введен для решения проблемы затухания градиентов и предлагает более глубокие архитектуры, такие как ResNet-50, ResNet-101 и ResNet-152.

С каждым годом появляются новые конфигурации нейронных сетей, позволяющие решать задачи нового уровня, а также значительно повышается их производительность. При исследовании современных архитектур нейронных сетей отмечена тенденция появления так называемых сетей «трансформеров». Такие сети не имеют привычной последовательной структуры операций, вместо этого используются модули, которые могут соединяться между собой на разных этапах. Это позволяет не упускать информацию на изображении и проводить анализ на разных уровнях масштаба.

В основу модуля детекции поверхностных дефектов была заложена одна из самых передовых, на сегодняшний день, архитектур нейронных сетей – YOLO (You Only Look Once) v8. Благодаря её структуре возможно решать задачи классификации изображений (classification), выполнять детекцию объектов (detection), сегментацию (segmentation), оценку позы (pose estimation) и даже отслеживание (tracking) в режиме реального времени. Это довольно универсальное и гибкое решение [10, 95].

На рисунке 3.13 представлена архитектура используемой нейронной сети.



На вход нейронной сети подается полноцветное изображение. Первичная обработка изображения происходит в области «Backbone». В его основе использована модифицированная версия архитектуры *CSPDarkNet*, которая

состоит из свёрточных слоёв, соединённых между собой на различных этапах. При помощи стратегии *CSPNet* происходит разделение карты объектов на две части и объединение через межэтапную иерархию. Это позволяет обеспечивать «плавность» потока информации, при прохождении через сеть [85].

Шея YOLOv8 использует структуру PANet (рисунок 3.14).

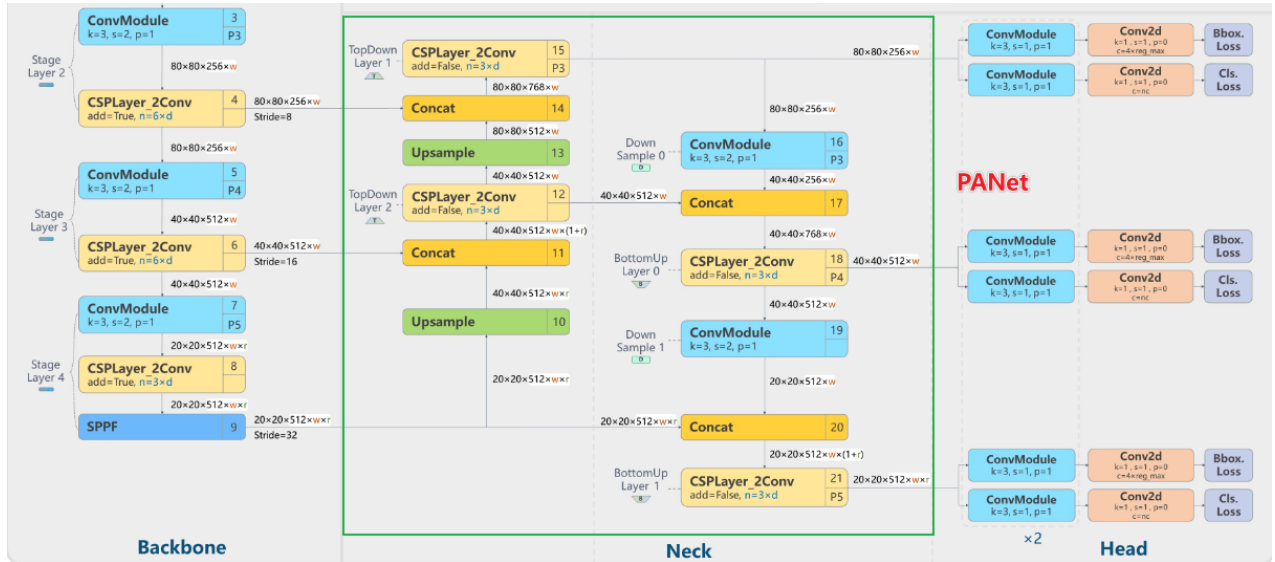


Рисунок 3.14. Строение модуля Neck.

После последнего модуля SPPF (Layer9) «Backbone»  $H$  и  $W$  субдискретизируются в 32 раза, соответственно, уровень 4 субдискретизируется в 8 раз, а уровень 6 субдискретизируется в 16 раз. Разрешение входного изображения составляет 640\*640, а разрешения Layer4, Layer6 и Layer9 — 80\*80, 40\*40 и 20\*20 соответственно.

Layer4, Layer6 и Layer9 используются в качестве входных данных для структуры PANet. После повышения дискретизации и объединения каналов три выходные ветви PANet наконец отправляются в «голову» для обнаружения для расчета потерь или расчета результатов.

Голова «Head» содержит две разделённые ветви регрессии и прогнозирования. Для ветви регрессии используется интеграл, предложенный в стратегии распределения фокусных потерь.

PANet представляет собой сеть с двусторонним каналом, которая представляет собой восходящий путь, что упрощает передачу информации нижнего уровня на верхний уровень.

В архитектуре семейства YOLO v8 предусмотрено 5 моделей нейронных сетей, отличающихся своим размером и производительностью при решении различных задач (таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Сравнение размера семейства сетей YOLOv8

| <b>Model</b>                | <b>size</b><br>(pixels) | <b>mAP<sup>box</sup></b><br>50-95 | <b>mAP<sup>mask</sup></b><br>50-95 | <b>Speed</b><br>CPU ONNX<br>(ms) | <b>Speed</b><br>A100 TensorRT<br>(ms) | <b>params</b><br>(M) | <b>FLOPs</b><br>(B) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------|---------------------|
| <a href="#">YOLOv8n-seg</a> | 640                     | 36.7                              | 30.5                               | 96.1                             | 1.21                                  | 3.4                  | 12.6                |
| <a href="#">YOLOv8s-seg</a> | 640                     | 44.6                              | 36.8                               | 155.7                            | 1.47                                  | 11.8                 | 42.6                |
| <a href="#">YOLOv8m-seg</a> | 640                     | 49.9                              | 40.8                               | 317.0                            | 2.18                                  | 27.3                 | 110.2               |
| <a href="#">YOLOv8l-seg</a> | 640                     | 52.3                              | 42.6                               | 572.4                            | 2.79                                  | 46.0                 | 220.5               |
| <a href="#">YOLOv8x-seg</a> | 640                     | 53.4                              | 43.4                               | 712.1                            | 4.02                                  | 71.8                 | 344.1               |

Каждая из моделей YOLOv8 имеет собственные значения параметров (d, w, r) для каждой конфигурации (таблица 3.2), и как следствие различное количество обучаемых параметров.

Таблица 3.2 – Параметры для сетей семейства YOLO v8

| <b>Model</b> | <b>d (depth_multiple)</b> | <b>w (width_multiple)</b> | <b>r (ratio)</b> |
|--------------|---------------------------|---------------------------|------------------|
| N            | 0.33                      | 0.25                      | 2.0              |
| S            | 0.33                      | 0.50                      | 2.0              |
| M            | 0.67                      | 0.75                      | 1.5              |
| L            | 1.00                      | 1.00                      | 1.0              |
| X            | 1.00                      | 1.25                      | 1.0              |

Для решения задач распознавания дефектов и сегментации на изображении достаточно использовать самые «лёгкие» конфигурации. Для классификации изображений была выбрана YOLOv8n-cls, а для сегментации YOLOv8n-seg.

### 3.3.2 Подготовка обучающей выборки и масштабирование экспериментальных данных

Для качественного обучения нейронной сети были проведены дополнительные эксперименты по 3D печати образцов с различной геометрией фигур, и подготовлен набор данных для обучения. Для хороших показателей качественного обучения ИНС необходимо большое количество данных, поэтому их необходимо масштабировать. Для масштабирования данных существует несколько методик: сбор, генерирование, аугментация.

В нашей работе была применена аугментация данных [38, 86]. В результате этого процесса каждое изображение видоизменялось (проводилось зеркальное отражение, наклон, перемещение центра, изменение оттенка и деформация) и сохранялось в обучающую выборку. Таким образом был подготовлен набор уникальных данных 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

На рисунке 3.15 представлены произвольные изображения полученные после процедуры аугментации для использования в обучающей выборке.





Рисунок 3.15. Изображения из обучающей выборки.

На графиках представлены результаты обучения модели YOLO v8 (рисунок 3.16).

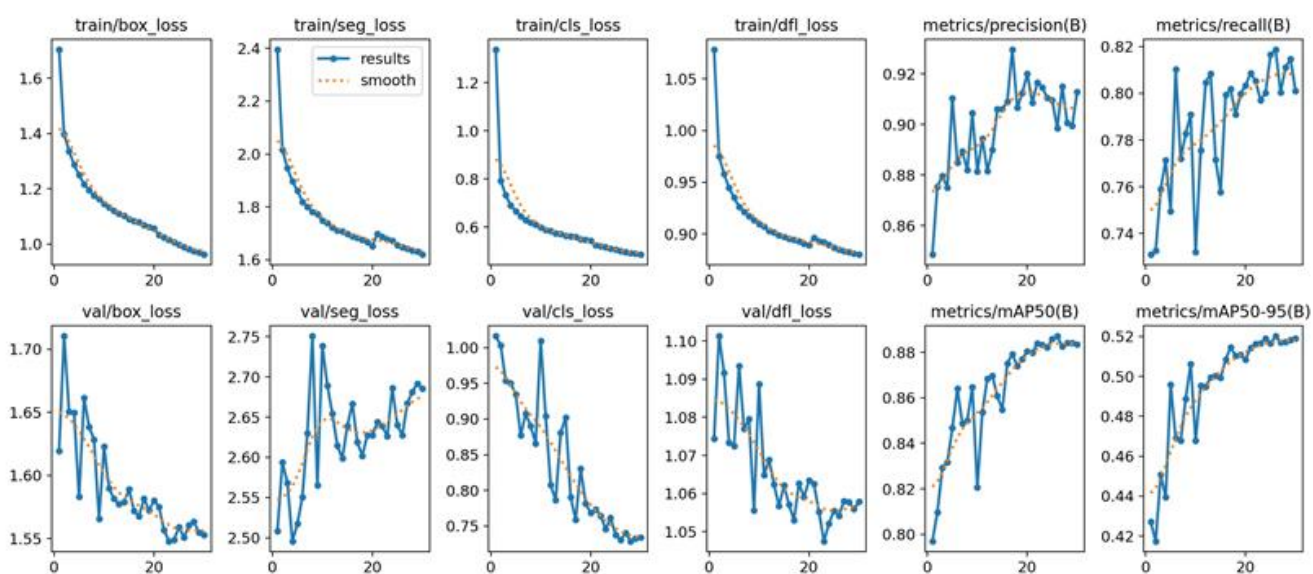


Рисунок 3.16. Графики обучения нейронной сети.

### 3.3.3 Алгоритм детекции поверхностных дефектов

В результате обучения, нейронная сеть способна обнаруживать поверхностные дефекты на контролируемом изображении и классифицировать их. На рисунке 3.17 представлен разработанный алгоритм модуля детекции поверхностных дефектов.

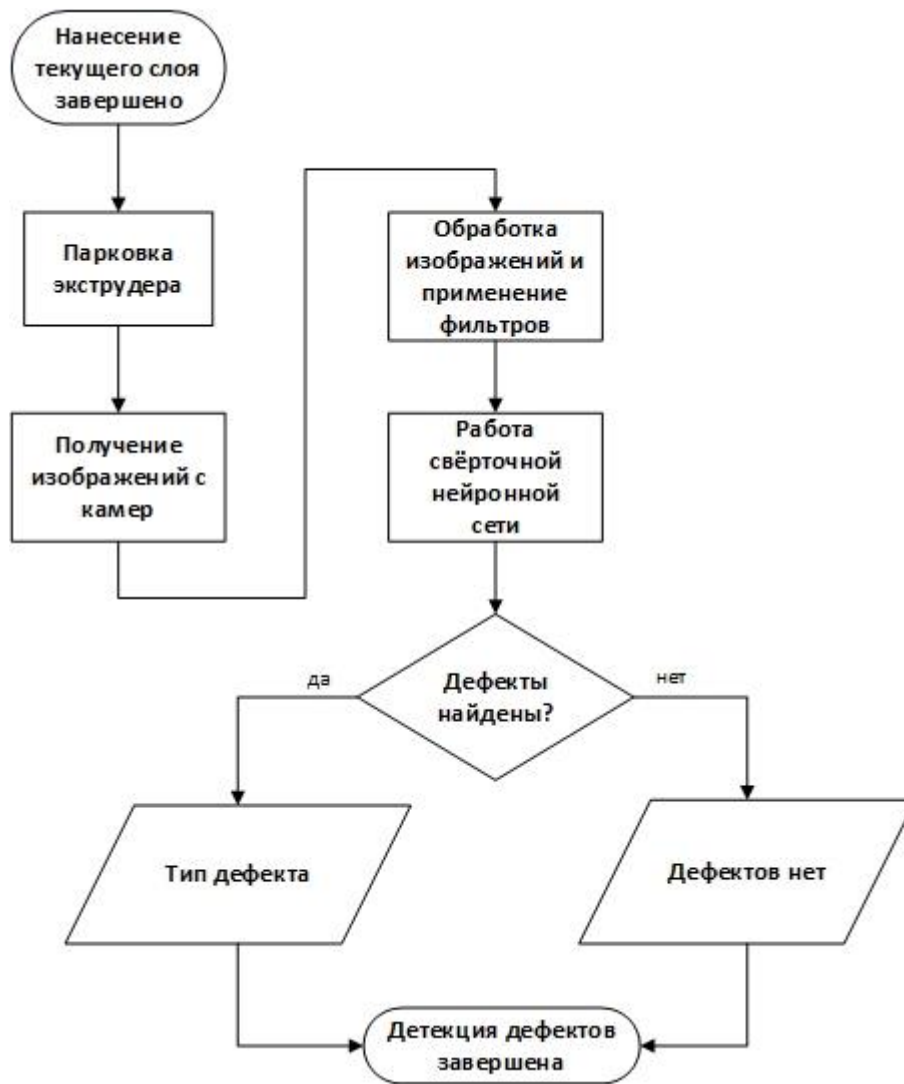


Рисунок 3.17. Изображения из обучающей выборки.

В момент завершения печати слоя, происходит парковка экструдера и получение изображений с камер. Контролируемые изображения поочерёдно подаются на вход нейронной сети с предварительно обученными коэффициентами. После проведения расчётов на выходе нейронной сети появляется метка ( $D_s$ ), соответствующая одному из четырёх классов (дефектов нет, перегрев, неравномерная экструзия, пропуск слоя). Также, в случае обнаружения дефектов, возможно сегментировать изображение и выделить в кадре бракованную область (рисунок 3.18).





Рисунок 3.18. 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.

### 3.3 Выводы по третьей главе

В третьей главе были разработаны компоненты позволяющие осуществлять автоматизированный визуальный контроль органолептических показателей качества печатаемого продукта. Для решения этой задачи используется система технического зрения.

Поставлена математическая задача контроля геометрии печатаемого блюда. Предложен метод визуального контроля и разработан алгоритм. Использование данного модуля позволяет выявлять глобальные проблемы протекания текущего ТП 3D печати шоколадом.

На основании предыдущих глав, а также сторонних исследований [118] показана актуальность адаптивного управления скоростью нанесения материала, что позволяет оптимизировать процесс печати. Поставлена математическая задача нахождения оптимальной скорости печати для каждого слоя, в зависимости от визуальной оценки его состояния. Предложен метод контроля агрегатного состояния нанесённого материала, на основе анализа его оттенка. Были проведены исследования [76], показавшие жизнеспособность данного метода. Математически описана задача детекции момента начала этапа кристаллизации нанесённого

материала.

На основании проведённых ранее экспериментальных исследований [75], сделан вывод о необходимости дополнительного контроля получаемого изделия. Разработан алгоритм детекции поверхностных дефектов пищевой 3D печати шоколадом на основе нейросетевых технологий. Проведён обзор существующих архитектур нейронных сетей для работы с изображениями в результате которого была выбрана одна из самых современных и производительных моделей - YOLO v8. Была подготовлена обучающая выборка для классификации и сегментации изображений, путём разметки и аугментации. После чего проведено обучение нескольких архитектур нейронной сети: для классификации дефектов и сегментации.

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.

## ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ И КОРРЕКТИРОВКИ ПАРАМЕТРОВ ТП ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ

Система принятия решений должна решать следующие задачи:

- автоматический контроль состояния печатаемого объекта на каждом слое на основе мониторинга информации в режиме реального времени;
- адаптивное управление параметрами технологического процесса (температура, скорость нанесения материала, степень внешнего охлаждения) для достижения оптимального качества печати (органолептический показатель – внешний вид);
- накопление информации о проводимых процессах печати и возникающих дефектах с целью дальнейшего дополнительного обучения системы.

4.1 Описание ключевых параметров контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати.

Для полноценного функционирования СПР необходимы знания о текущем ТП. В результате анализа предметной области и проведённых в предыдущих главах исследованиях были отмечены основные **входные и выходные** параметры технологического процесса пищевой 3D печати. Условно их можно разделить на 3 группы: информативные параметры, контролируемые параметры и управляемые параметры.

На **основные информативные параметры** в процессе печати в большинстве случаев повлиять невозможно, однако их значение играет не малую роль на протекание ТП. К ним относятся:

**Материал** – параметр характеризующий класс и вид сырья. Характер поведения сырья будет различаться для шоколадных изделий и, например, мясного сырья. Для управления качеством 3D печати блюд из разных материалов необходимы различные коэффициенты и логика контроля. Однако инструменты контроля и управления – схожи.

**Диаметр сопла** – фиксированный параметр влияющий, на ширину наносимой линии и высоту слоя.

**Температура окружающей среды** ( $t_{o.c.}$ ) – значения датчика температуры, расположенного внутри рабочей камеры принтера.

**Номер текущего слоя** ( $n$ ) – информативный параметр численно обозначающий наносимый слой, для большего информирования системы о статусе печати, а также для более удобного хранения информации в базе данных о конкретном распечатанном блюде. Параметры печати первого слоя, обычно значительно отличаются от параметров печати всей фигуры. Это связано с низкой скоростью нанесения материала, с целью обеспечения адгезии к печатной платформе.

**Высота наносимого слоя** ( $h_{\text{слоя}}$ ) – параметр, влияющий на общее время печати и на разрешение печати по вертикальной оси. Обычно высота слоя задаётся в программе - слайсере, при подготовке файла G-Code (smart - рецепта). Эта возможность предоставлена пользователю. Стоит заметить, существует рекомендация по установке высоты слоя равной половине размера диаметра сопла.

Повлиять на этот параметр во время печати – довольно проблематично, так как это потребует вмешательство в файл G-Code и изменение управляющих траекторий для координатных осей принтера (ось Z). Поэтому в данной работе он будет рассмотрен как информативный параметр, который возможно учитывать при принятии управленческих решений.

**Длина пути текущего слоя** ( $L_{\text{слоя}}$ ) – информативный параметр, произвольно меняющийся в зависимости от номера текущего слоя (высоты напечатанной модели), зависящий от конкретной 3D модели. Характеризует количество нанесённого сырья и влияет на время его приготовления. Выражена в виде *длины пути* печатающей головки при рабочей подаче, на текущем слое.

**Время печати текущего слоя** ( $time$ ) – информативный параметр, показывающий длительность нанесения текущего слоя.

**Основные параметры визуального контроля** – характеризуют важнейшие органолептические показатели качества печатаемого объекта. Их оценка напрямую зависит от используемого материала. Они обновляются после нанесения каждого слоя. В третьей главе были разработаны алгоритмы контроля органолептических

показателей качества, к которым относится:

**Погрешность получаемой формы** ( $\delta_E$ ) – процентный показатель соответствия формы печатаемого блюда своему цифровому двойнику. Это первостепенный критерий контроля внешнего вида модели, позволяющий обнаружить глобальные и серьёзные дефекты печати.

**Состояние слоя** ( $Ls$ ) – бинарный параметр, характеризующий состояние нанесённого материала на текущем слое печати. Может принимать значение 0 или 1. Этот параметр играет решающую роль, при определении готовности блюда. Для шоколада и шоколадной глазури – он характеризует агрегатное состояние материала, для мясного сырья – может характеризовать степень прожарки, для мучного – степень запекания и т.д. На основании этого критерия система способна принимать решение о настройке параметров, оказывающих прямое влияние на материал.

**Время кристаллизации** ( $t_{\text{крист}}$ ) – На основании этого критерия возможно принимать решение об управлении параметрами, оказывающих прямое влияние на материал: скоростью нанесения материала, либо интенсивностью охлаждения.

**Наличие дефектов** ( $Ds$ ) – показатель, который обозначает отсутствие или наличие какого-либо дефекта, а также его класс.

Все вышеперечисленные параметры являются только входными и информируют о состоянии текущего процесса печати. Следующая группа параметров является управляемой.

**Основные входные параметры управления** технологическим процессом пищевой 3D печати обычно задаются при подготовке файла G-Code (смарт-рецепта). Однако их довольно просто можно изменить в ходе ТП, тем самым повлиять на результат продолжаемой печати. На первом слое используются заданные в файле настройки, но уже после печати второго слоя система имеет оценку состояния печати и возможность изменить выходные параметры, и повлиять на дальнейший результат печати.

**Температура печатающей головки** ( $t_{\text{сопла}}$ ) – регулируемый параметр, оказывающий прямое влияние на поведение сырья при экструзии.

**Температура платформы для печати** ( $t_{\text{стола}}$ ) – регулируемый параметр, влияющий на скорость и степень приготовления десерта на первых слоях (если речь идёт о мучных блюдах). При печати шоколадных изделий этот параметр равен нулю.

**Линейная скорость нанесения материала** ( $V_{\text{печати}}$ ) – регулируемый параметр, влияющий на скорость выращивания трёхмерного блюда. Необходимо соблюдать баланс между производительностью технологии и качеством получаемого продукта.

**Ширина экструзии** ( $w_{\text{экс}}$ ) – регулируемый параметр, влияющий на количество наносимого материала. По умолчанию задаётся значение (1,00).

**Степень обдува** ( $V_{\text{охл}}$ ) – регулируемый параметр, характеризующий уровень мощности, подаваемой на вентилятор, создающий воздушный поток. Управление происходит методом широтно-импульсной модуляции.

**Температура обдува** ( $t_{\text{охл}}$ ) – температура радиатора охладителя, влияющая на эффективность и быстроту застывания наносимых слоёв.

#### 4.2 Постановка задачи автоматизированного управления технологическим процессом пищевой 3D печати

Проблему мониторинга и управления технологическим процессом пищевой 3D печати необходимо свести к конкретной задаче проектирования системы предсказания набора управляющих величин  $Y_n$  для печати каждого последующего слоя [31]. Предсказания основываются на параметрах печати текущего слоя и на его автоматизированной визуальной оценке  $X_m$ .

$$Y_n = f(X_m) \quad (4.1)$$

В случаях, когда математическое описание объекта управления является трудоёмкой задачей, целесообразно применение нейрорегуляторов. Они включают в себя обучение и адаптацию нейронных сетей к изменяющимся параметрам системы. В таких комбинациях вместо управляющего контроллера используется полностью определённые нейронные сети для генерации управляющих сигналов. Они обладают рядом преимуществ, таких как способность к интерполяции,

экстраполяции и выявлению скрытых закономерностей среди огромных потоков данных. Использование нелинейных ИНС обеспечивает возможность реализации нелинейных регуляторов [9, 5, 62, 72].

Существует множество вариантов применения ИНС для нейроуправления, например последовательная и параллельные схемы, управление с самонастройкой, управление с эмулятором и контроллером (обратного распространения во времени), адаптивно-критическая схема и т.д. [31].

Простейшим вариантом является подражающий нейрорегулятор. Он имитирует работу управляющего контроллера. В процессе обучения (рисунок 4.1, а) на вход ИНС подаются значения желаемой величины  $r$ , а также выход объекта управления  $y$  поданный с задержкой по времени TDL (Tapped Delay Line). В качестве целевых значений выходов нейронной сети используются управляющие воздействия  $u$  на объект управления.

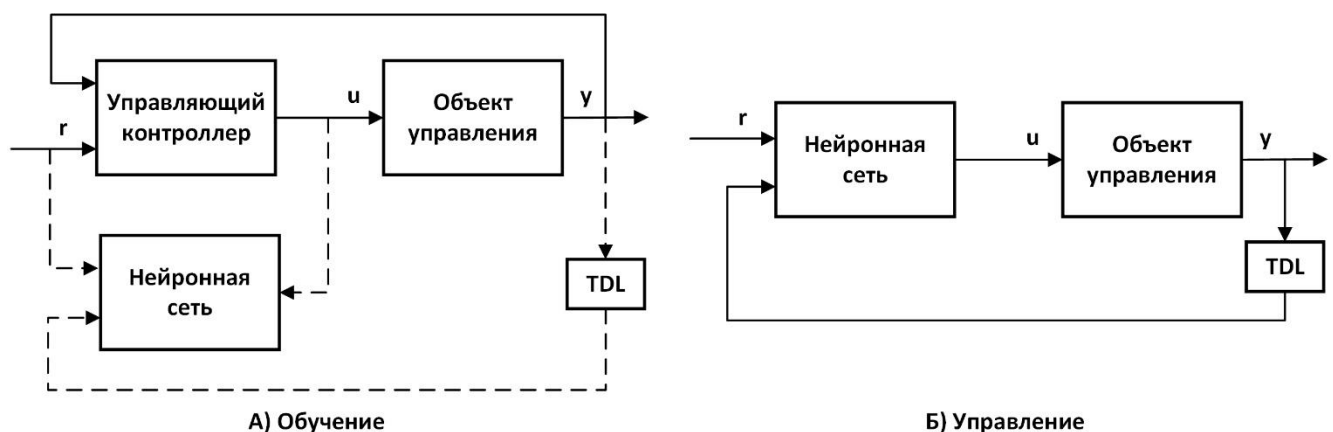


Рисунок 4.1 Схема подражающего нейрорегулятора.

В режиме управления нейрорегулятор полностью заменяет управляющий контроллер (рисунок 4.1, б).

Преимуществом такого метода является возможность его обучения прямо в процессе производства. При управлении объектом с переменными параметрами нейрорегулятор запоминает его состояния и не требует дальнейшей перестройки.

Также в схемах нейроуправления часто используется инверсный нейроэмулятор в качестве контроллера, который обучается на данных об объекте управления. Для обучения такого регулятора необходимо сформировать

обучающее множество, подавая на объект управления различные комбинации управляющих сигналов  $u$ , и регистрируя его выходные реакции  $Y$ . В режиме обучения нейрорегулятора (рисунок 4.2, а) на его вход подаются выходные реакции  $Y$  (выход объекта управления), задержанные модулем TDL. В качестве целевых значений используются управляющие сигналы  $u$  (вход объекта управления).

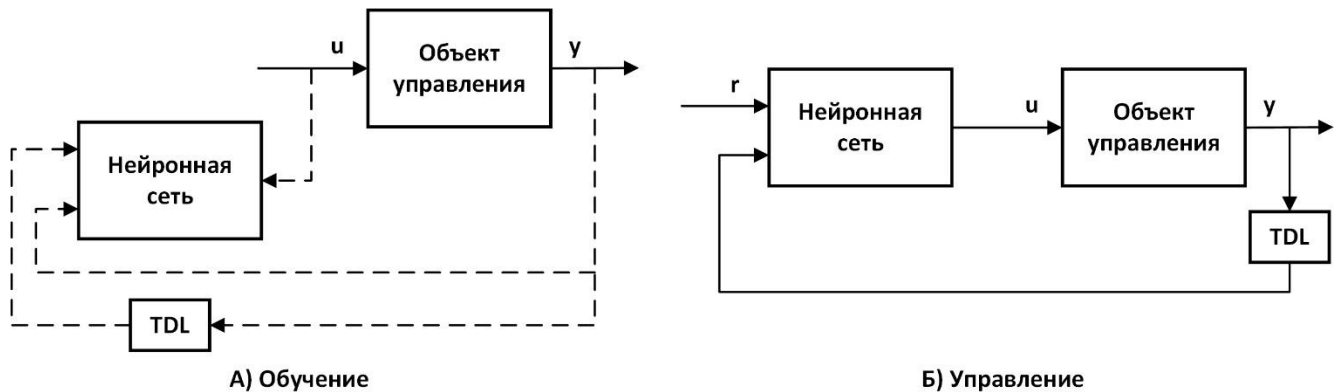


Рисунок 4.2. Схема инверсного нейрорегулятора.

После обучения, в режиме работы (рисунок 4.2, б), на инверсный нейрорегулятор подается требуемое значение реакции объекта управления и выходной сигнал, получаемый с объекта управления, задержанный во времени, в ответ на который ИНС выдаст необходимые управляющие воздействия  $u$ .

Для решения поставленной задачи разработана схема нейронного регулятора, представленная на рисунке (4.3). В технологическом процессе 3D печати, контроллер управляет множеством исполнительных механизмов (нагреватели, шаговые двигатели и т.д.), формируя суммарный вектор управляющих сигналов  $u$ , поэтому полностью исключить его — невозможно, да и не требуется. В рассматриваемой схеме реализуется выборочное управление основными параметрами ТП, путём воздействия на контроллер в приоритетном порядке вектором управляющих параметров  $C_{(n+1)}$ .



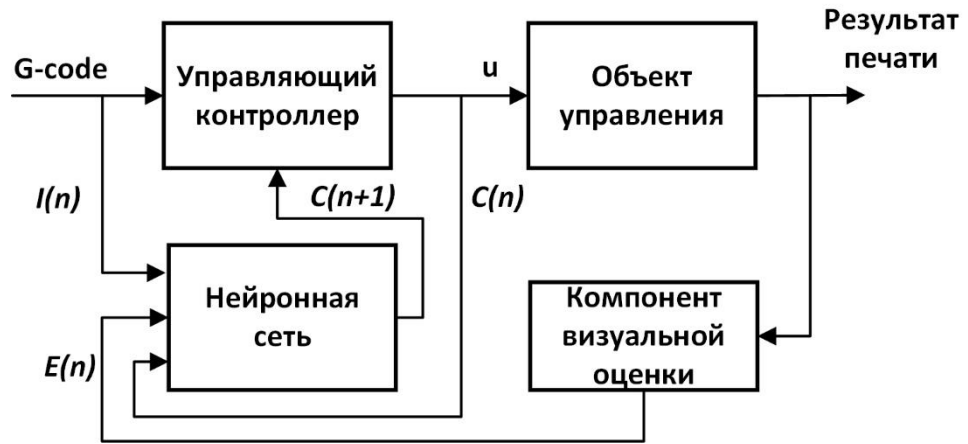


Рисунок 4.3. Схема нейрорегулятора.

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;  $\delta_E$  – 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):

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

Обучение нейронной сети возможно проводить в процессе 3D печати с оператором, либо путём обучения модели на накопленном наборе данных о результатах печати. Такой набор состоит из временных рядов значений управляющих векторов  $X_n$  и ожидаемых векторов регулирования  $Y_n$ .

Схема нейрорегулятора в режиме обучения представлена на рисунке 4.4.

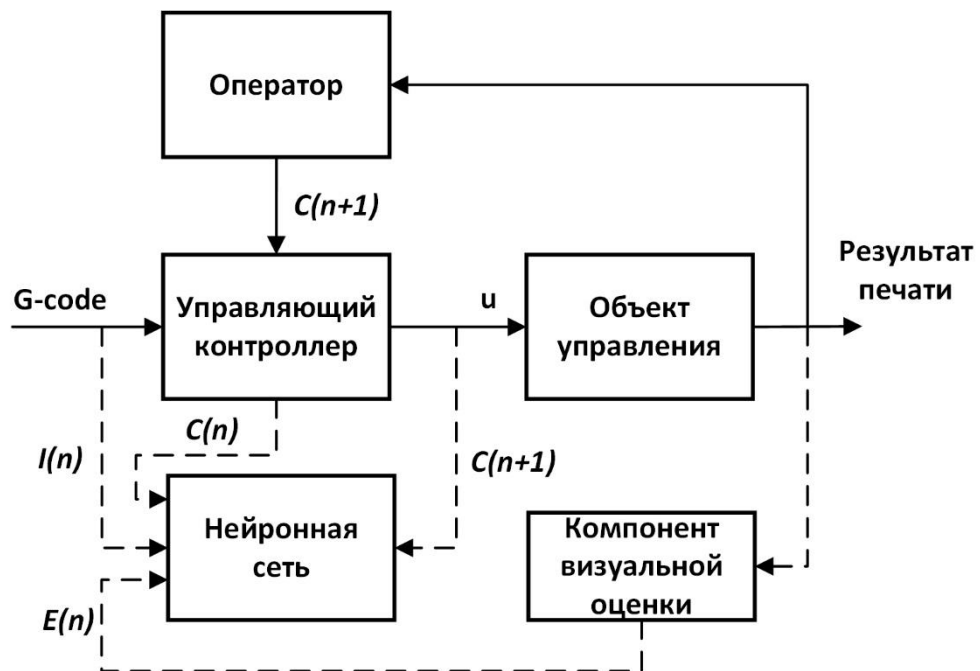


Рисунок 4.4. Схема нейрорегулятора в режиме обучения.

Во время обучения модели прогнозируемые значения вектора управляющих

величин сравниваются с фактическими значениями  $Y$ , а в качестве функции потерь вычисляется среднеквадратичная ошибка.

$$loss = \frac{1}{i} \sum_{n=1}^i (\bar{Y}_n - Y_n)^2 \quad (4.8)$$

где:  $i$  – размер обучающей выборки;

$n$  – номер текущего слоя.

Для обновления параметров ИНС при обучении с использованием метода обратного распространения ошибки вычисляется среднеквадратичная ошибка по всей обучающей выборке между предсказанным значением целевой величины и реальным. Метод среднеквадратического отклонения используется в качестве функции оптимизации параметров модели по целевому значению. Таким образом после процесса обучения нейронная сеть способна самостоятельно генерировать управляющие воздействия на контроллер в зависимости от входных параметров.

4.3 Разработка нейросетевой модели для модуля интеллектуального анализа, диспетчерского управления пищевой ТП 3D печати в режиме реального времени.

Стоит отметить, что исправление дефектов в процессе 3D печати вязкими неоднородными пищевыми материалами – это инерционный процесс, поэтому результат изменения настроек проявляется не сразу. Так как модель печатается по слоям, недостаточно просто применить новые настройки и сразу же ожидать готового результата на текущем слое и хороших органолептических показателей качества. При анализе произошедших изменений качества, после изменения параметров печати, необходимо учитывать предыдущий контекст. Важно иметь ввиду то, что предыдущий слой был плохим, и сравнивать нужно его со следующим, для того чтобы, оценить качество изменений.

Для возможности исправления возникающих дефектов и адаптации системы к текущему ТП 3D печати необходимо учитывать не только опыт и настройки предыдущих результатов печати, но и осознавать контекст происходящего в рамках данной печати, на последних слоях.

Весь процесс 3D печати можно представить в виде последовательности операций нанесения слоя материала. Каждая такая операция называется печать текущего слоя, которая имеет рассмотренные ранее, основные параметры управления.

Стоит обратить внимание, что во многом печать текущего слоя, зависит от качества нанесения и состояния предыдущего слоя. Он является «фундаментом» для нанесения текущего слоя и поэтому должен быть как можно лучше напечатан.

Таким образом, если он имеет дефекты, это обязательно скажется на качестве нанесения текущего слоя. Так, в процессе регулирования система должна учитывать не только нынешнее состояние, то есть отклонение от требуемого значения на данной итерации, но и иметь память о тех же отклонениях на нескольких предыдущих этапах печати.

Для работы с последовательностью информации и временными рядами хорошо зарекомендовали себя рекуррентные нейронные сети [29, 49, 54, 121, 126]. Они характерны тем, что каждый нейрон скрытого слоя, получает информацию о предыдущем состоянии каждого нейрона. Таким образом сеть наделяется инструментом обратной связи, что позволяет запоминать предыдущие состояния и в моменте предсказания учитывать их. Веса в такой сети будут одинаковыми для каждого временного интервала. Для удобства обратную связь представляют в развёрнутой форме (рисунок 4.5).

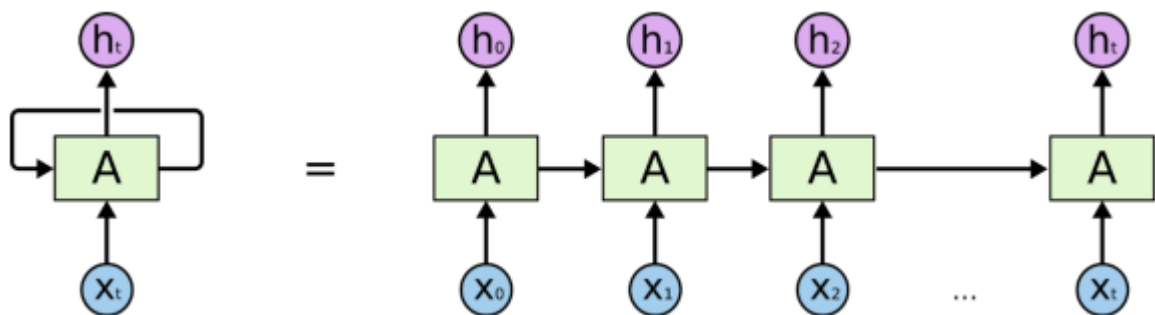


Рисунок 4.5. Структура рекуррентной нейронной сети для предсказания значений управляющих параметров печати следующего слоя.

Самая простая ячейка рекуррентной нейронной сети, содержащая один слой представлена на рисунке (4.6). Значение выходного слоя является функцией от

входного значения, а также от скрытого состояния на предыдущем шаге (4.9).

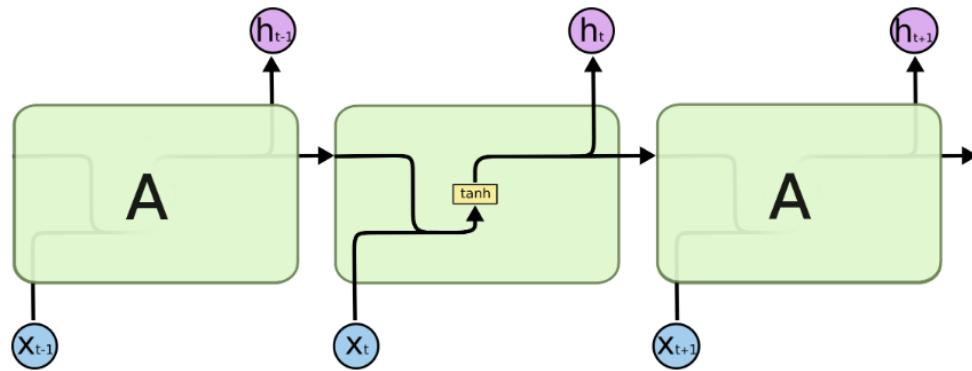


Рисунок 4.6. Строение простой ячейки РНС.

$$h_t = \tanh(h_{t-1} * W_1 + x_t * W_2) \quad (4.9)$$

где:  $h_{t-1}$  – предыдущее состояние слоя;

$x_t$  – входной вектор;

$W_1, W_2$  – весовые коэффициенты.

Учёт предыдущего состояния нейрона, при формировании выходного значения  $h_t$  наделяет нейронную сеть свойством памяти. В отличие от обычного перцептрона, рекуррентные нейронные сети способны учитывать динамику изменения во времени.

Однако рассмотренное выше строение нейрона (рисунок 4.6), имеет ряд существенных ограничений: проблемы с градиентом при обучении, а также отсутствие долгосрочной памяти.

В связи с этим учёными было предложено множество различных архитектурных решений для рекуррентных сетей. Наибольшее распространение получили: сеть с долговременной кратковременной памятью (LSTM – Long short-term memory) и управляемый рекуррентный блок (GRU - Gated Recurrent Unit) [17, 42]

LSTM сети (рисунок 4.7) способны обходить проблему затухающего или

взрывающегося градиента в процессе обучения методом обратного распространения ошибки.

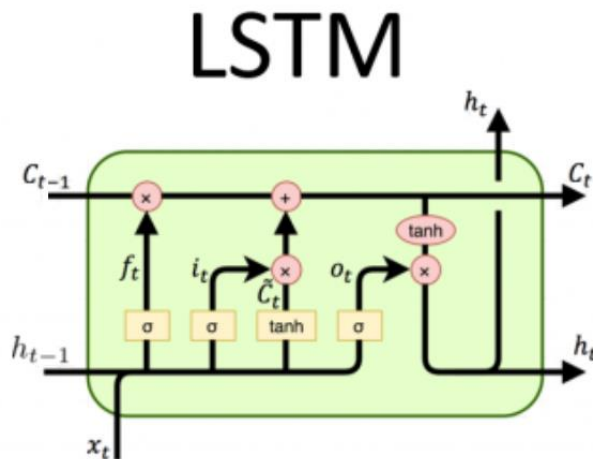


Рисунок 4.7. Архитектура одного модуля LSTM.

Ключевое отличие LSTM сетей заключается в наличии так называемого клеточного состояния (cell state), горизонтальная линия, проходящая через верхнюю часть диаграммы. Нейронная сеть хранит в ней информацию о предыдущих состояниях, а также может удалять её или добавлять новые значения благодаря «вентильям» (gates). С их помощью возможно избирательно пропускать информацию. В основе «вентилья» лежит операция поточечного умножения [119, 120, 122].

Самый первый «вентиль» способен отсечь или оставить информацию о предыдущем клеточном состоянии. Им управляет значение сигмоидальной функции (4.10), а на выходе получается значение от 0 до 1, что указывает на ценность информации «пропускаемой через вентиль».

$$f_t = \sigma(W_f * [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (4.10)$$

где:  $h_{t-1}$  – предыдущее состояние слоя;

$x_t$  – входной вектор;

$W_f$  – весовой коэффициент;

$b_f$  – биас.

Вторым «входным вентиляем» регулируется добавление новой информации (4.11), а слой гиперболического тангенса регулирует её содержание (4.12):

$$i_t = \sigma(W_i * [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (4.11)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C * [h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (4.12)$$

где:  $W_i, W_C$  – весовые коэффициенты;

$b_i, b_C$  – биасы.

Затем происходит обновление скрытого клеточного состояния  $C_t$ , которое будет определяться выражением (4.13):

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t \quad (4.13)$$

Итоговый результат, подаваемый на выход, будет основан на клеточном состоянии, но с применением фильтра (4.14):

$$o_t = \sigma(W_o * [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (4.14)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad (4.15)$$

где:  $W_o$  – весовой коэффициент;

$b_o$  – биас.

Обучить нейронную сеть LSTM возможно пользуясь алгоритмом обратного распространения ошибки сквозь время.

Для решения поставленной задачи управления была разработана рекуррентная нейронная сеть (рисунок 4.8), состоящая из входного слоя (13 нейронов), скрытого слоя (6 ячеек LSTM, работающих параллельно) и одного выходного слоя (6 нейронов).

Входные параметры  
напечатанного слоя

LSTM модули  
в скрытом слое

Регулируемые параметры  
печати следующего слоя

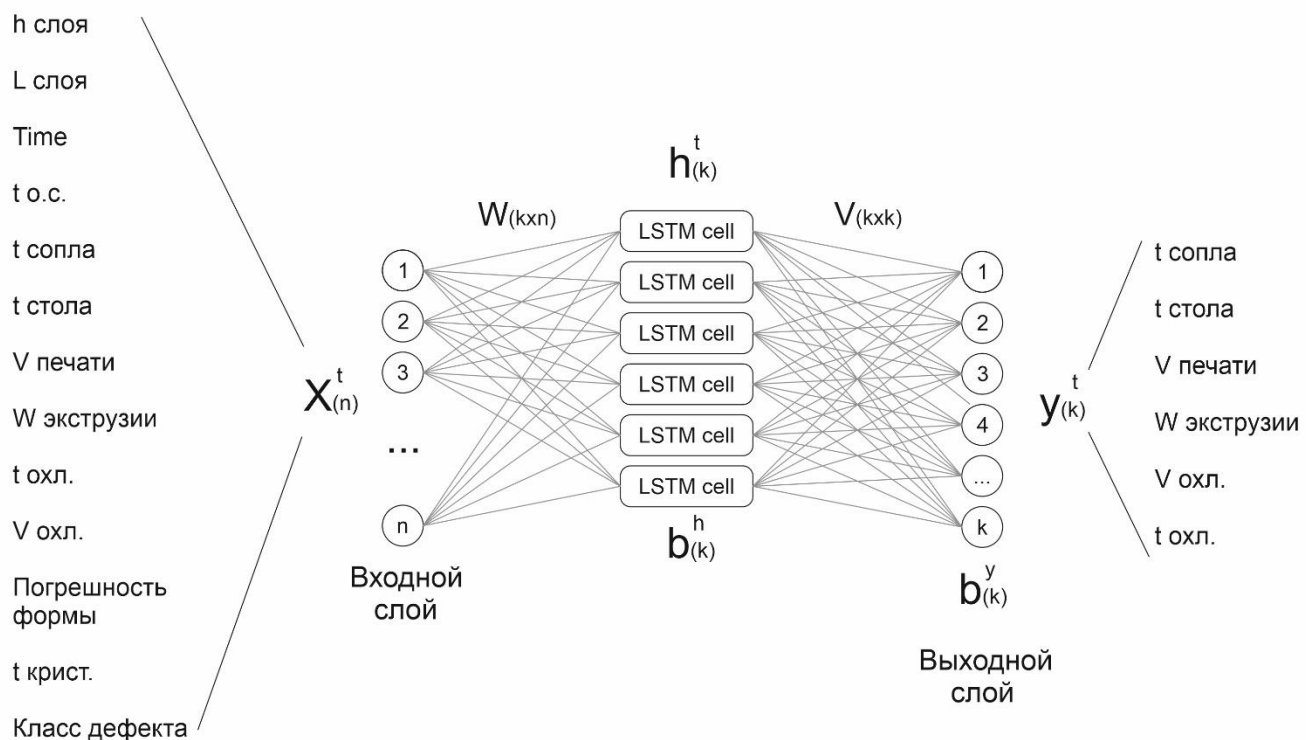


Рисунок 4.8. Архитектура рекуррентной нейронной сети для предсказания значений управляющих параметров печати следующего слоя.

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, рассматриваемые в разделе 4.1. 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).

#### 4.4 Процедура обучения

Для обучения нейрорегулятора необходима информация о протекании технологического процесса. Чем больше данных будет представлено для обучения – тем качественнее будет управляющий сигнал.

Для обучения нейрорегулятора был собран набор данных о результатах печати, структура которого показана в (таблице 4.1).



Таблица 4.1 – Структура обучающих данных.

| N   | n   | Входные данные обучения X |                   |      |                   |                    |                |                |   |                  |                  |            |    |                 | Требуемые значения Y |                |                |   |                  |                  |
|-----|-----|---------------------------|-------------------|------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|---|------------------|------------------|------------|----|-----------------|----------------------|----------------|----------------|---|------------------|------------------|
|     |     | Информативные - I         |                   |      |                   | Управляемые - C(n) |                |                |   |                  |                  | Оценка - E |    |                 | Управляемые - C(n+1) |                |                |   |                  |                  |
|     |     | h <sub>слоя</sub>         | L <sub>слоя</sub> | Time | t <sub>о.с.</sub> | t <sub>э</sub>     | t <sub>п</sub> | V <sub>п</sub> | w | t <sub>охл</sub> | V <sub>охл</sub> | δE         | Ds | t <sub>кр</sub> | t <sub>э</sub>       | t <sub>п</sub> | V <sub>п</sub> | w | t <sub>охл</sub> | V <sub>охл</sub> |
| 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.

Обучение такой сети проводится методом обратного распространения ошибки.

#### 4.5 Выводы по четвёртой главе

В четвёртой главе были отобраны и классифицированы основные параметры технологического процесса пищевой 3D печати шоколадом, 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.

Отмечено, что точное математическое описание взаимосвязи параметров ТП пищевой 3D печати шоколадом с качеством получаемого продукта – довольно

сложная и трудоёмкая задача. В этой связи предложено использование регулятора на основе нейронной сети. Рассмотрены основные схемы нейроуправления и представлена схема внедрения нейронной сети в ТП пищевой 3D печати. Таким образом система управления настройками является адаптивной, в зависимости от внешнего вида изделия и условий окружающей среды. Основным интеллектуальным компонентом была выбрана рекуррентная нейронная сеть, в виду её преимущества при работе с последовательностями информации. Рассмотрены основные структуры рекуррентных нейронных сетей.

На основе анализа существующих решений в области нейросетевых технологий, а также на основе отобранных параметров ТП была разработана архитектура нейрорегулятора. Представлена структура набора данных необходимая для обучения рекуррентной нейронной сети.

## ГЛАВА 5. ПРОГРАММНАЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПИЩЕВОЙ 3D ПЕЧАТИ

Для реализации описанных в предыдущих главах алгоритмов и отладки методов автоматизированного контроля и управления процессом пищевой 3D печати были разработаны программные модули. Разработка проводилась на языке Python в среде программирования PyCharm CE [39].

5.1 Программная реализация алгоритмов обработки изображений в модулях контроля органолептических показателей качества

Первичная обработка изображений реализована при помощи библиотеки компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV [22, 111, 113, 114], на языке программирования Python версии 3.9. Библиотека включает в себя реализацию множества алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения и подходит для использования поставленных в работе задач.

Для захвата изображения из видеопотока веб-камеры был использован класс **VideoCapture()**. Также применяется обработка размера кадра **set()** и полученное изображение сохраняется в БД при помощи **imwrite()**. Затем выполняется преобразование в оттенки серого **cvtColor()** и производится бинаризация изображения **adaptiveThreshold()** - операция, которая конвертирует чёрно-белое изображение в изображение, состоящее только из белых, либо из черных пикселей. Суть операции бинаризации заключается в том, чтобы отсеять ненужную для работы информацию, например платформа, на которой печатается изделие, или боковые стенки 3D принтера. Это позволяет упростить последующие операции. Важно отметить, что алгоритм бинаризации имеет порог, который необходимо правильно подбирать под конкретную задачу. В противном случае это может привести к искажениям на изображении и неправильной интерпретации результата печати.

Для сравнения изображений использована библиотека PIL. Обработанное изображение результата печати, представленное в бинаризованном виде попиксельно сравнивается с эталонным изображением при помощи функции ***difference()***, находящейся в модуле ***ImageChops()***.

Построение эталонного изображения результата печати реализовано при помощи библиотек ***Mathplotlib*** и ***Numpy*** с применением интерфейса ***pyplot()***. Он предоставляет возможность построения графиков, в том числе и трёхмерных. Для удобной обработки файла G-Code: выделения, сортировки и группировки нужной информации, применялись библиотеки: ***Collections***, ***Pandas***, ***Math***. Таким образом были выделены только команды G1 которые отвечают за рабочую подачу (нанесение слоя материала). После чего запущен цикл позволяющий построить трёхмерный график.

Калибровка внутренних параметров видеокамер установленных на 3D принтере проводилась при помощи встроенных инструментов библиотеки Open CV [51, 71, 112]. Это позволило устранить эффект «рыбьего глаза», возникновение которого связано с конструктивными особенностями оптической системы. Для осуществления калибровки необходимо было сделать не менее 10 фотографий шахматной доски, выступающей в роли шаблона. Сперва на изображении в оттенках серого происходил поиск углов клеток шахматной доски при помощи методов ***findChessboardCorners()*** и ***cornerSubPix()***. Для наглядности процесса калибровки на изображение накладывался узор ***drawChessboardCorners()***. Используя функцию ***calibrateCamera()*** были получены внутренние параметры (матрица камеры, коэффициенты искажения, векторы вращения и перемещения и т. д.) для каждой камеры. Расчёт скорректированных значений происходил при помощи ***getOptimalNewCameraMatrix()***, что позволило применить к картинке эти значения воспользовавшись функцией ***undistort()***, чтобы получить на выходе откорректированное изображение.

## 5.2 Программная реализация нейросетевых моделей

Разработка и обучение нейронных сетей проводилась на основании анализа

предметной области, подробного изучения фундаментально-прикладной литературы и современных методик [19, 36]. Тренировка моделей проводилась на графическом процессоре GPU Nvidia GeForce GTX 1050 Ti под управлением операционной системы Windows 10. Для корректного запуска процесса обучения на GPU необходима установка дополнительного ПО и вспомогательных библиотек: Microsoft Visual Studio, CUDA, CuDNN, PyTorch, Python, Tensorflow.

### 5.2.1 Настройка и обучение детектора поверхностных дефектов

В основу детектора поверхностных дефектов заложена нейронная сеть архитектуры YOLOv8 от компании Ultralytics [98].

Для запуска процесса обучения импортирована библиотека **Ultralytics** из которой был вызван модуль **YOLO** с требуемой для нас конфигурацией (**'yolov8n-cls.pt'**). Далее при помощи команды **model.train()** с заданными параметрами был запущен процесс обучения.

Результаты тренировки нейронного классификатора поверхностных дефектов представлены на рисунке 5.1.

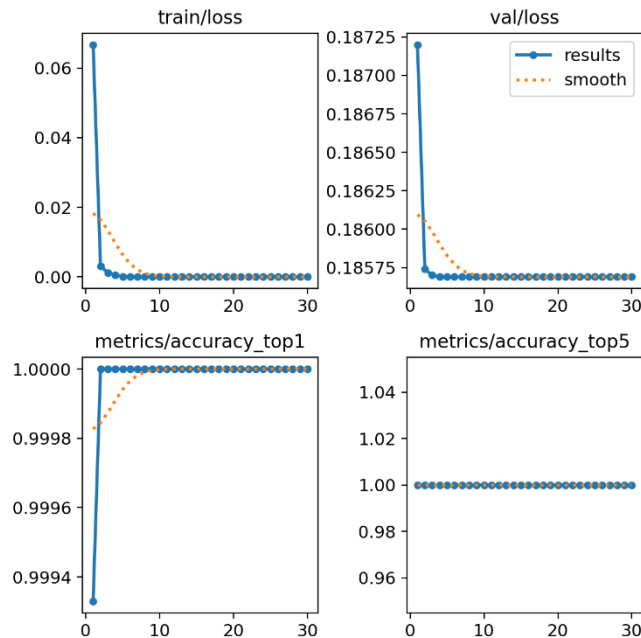


Рисунок 5.1. График процесса обучения нейронной сети YOLOv8 для классификации поверхностных дефектов.

После обучения нейронная сеть способна распознавать на изображении

характерные признаки, относящиеся к тому или иному дефекту и на их основе проводить классификацию результата печати (рисунок 5.2).

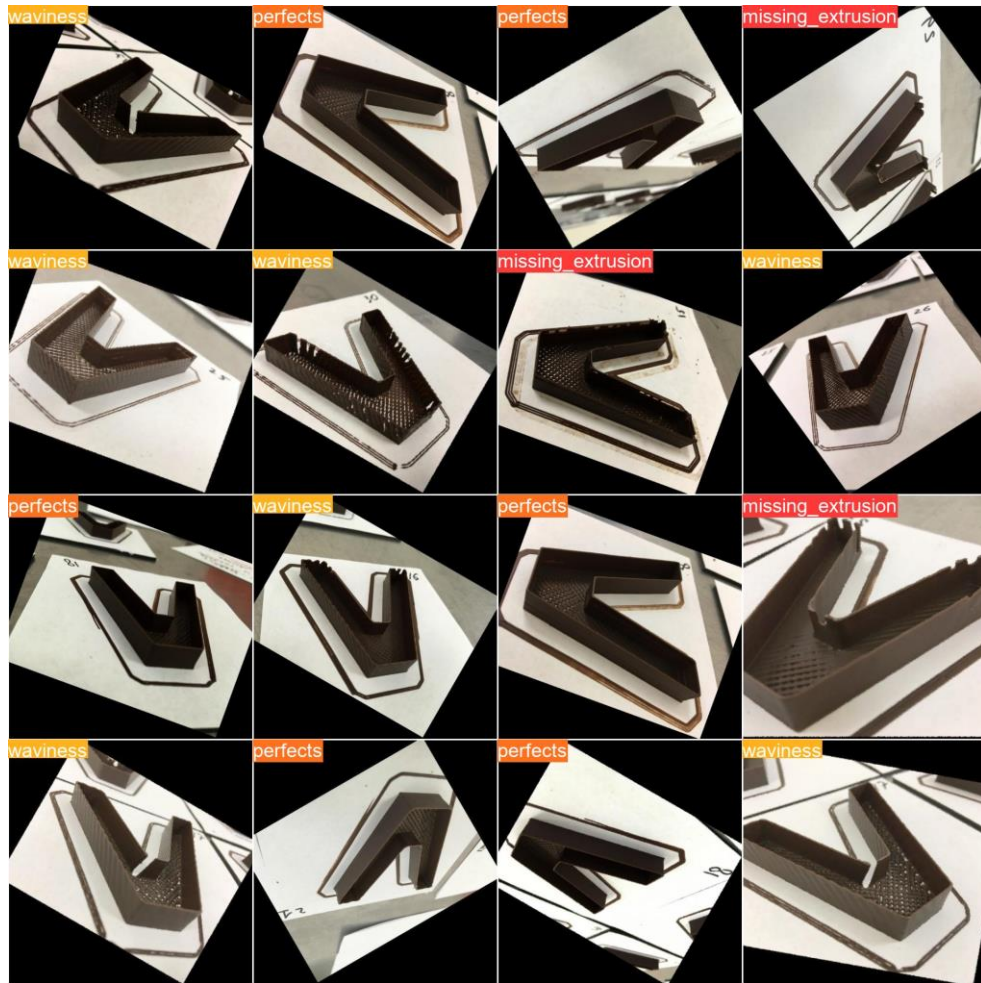


Рисунок 5.2. Результат классификации нейронной сетью YOLO v8.

Для запуска предсказания необходимо загрузить весовые коэффициенты полученные в процессе обучения в модель нейронной сети командой ***model = YOLO("yolov8n.pt")*** и вызвать процедуру предсказания ***model.predict()***. Весовые коэффициенты для различных материалов печати будут отличаться. Поэтому в базе данных хранятся коэффициенты для изученных материалов и могут быть вызваны перед началом печати нового продукта.

Для процесса аугментации исходных данных использовалась библиотека ***CLoDSA*** с открытым исходным кодом [86, 92]. Она генерирует изображения подходящие не только для задач классификации, но и для локализации объектов, семантической сегментации и сегментации отдельных классов. ***CLoDSA***

поддерживает широкий спектр методов аугментации и позволяет пользователю легко комбинировать их. Для запуска процесса аугментации использовались следующие модули: ***transformerGenerator()***, ***createTechnique()*** и ***createAugmentor()***.

Для разделения набора данных на обучающую и тестовую выборки использована библиотека ***Splitfolders*** [93]. При помощи процедуры ***ratio()*** исходный набор данных был автоматически распределён по каталогам обучающей, оценочной и тестовой выборок в соотношении (8:1:1).

### 5.2.2 Настройка и обучение нейрорегулятора

В основу системы принятия решений была заложена рекуррентная нейронная сеть. Разработка проводилась на основе фреймворка TensorFlow с модулем Keras [6, 100, 125]. TensorFlow Keras — это высокоуровневый API-интерфейс нейронной сети, созданный на основе TensorFlow, который эффективно решает проблему создания, обучения и развертывания моделей глубокого обучения. В частности, он предоставляет удобный интерфейс для создания и обучения нейронных сетей для таких задач, как классификация изображений, обработка естественного языка и т.д.

Для создания последовательной модели нейронной сети использован класс ***tf.keras.Sequential()*** позволяющий последовательно сгруппировать стек слоев. Он обеспечивает функции обучения и вывода для построенной модели. Для добавления и комбинирования слоёв использован метод ***add()***. В качестве входного полносвязного слоя используется класс ***layers.Dense()***, число нейронов которого равно количеству входных параметров  $X$ . Затем следует рекуррентный слой ***layers.LSTM()***, с числом нейронов равному 6, и выходной полносвязный слой ***layers.Dense()***, с 6 нейронами. Чтобы завершить конфигурацию нейронной сети используется метод ***summary()***. Компиляция модели проводилась с использованием метода ***compile()***. В качестве оптимизатора использовался ***adam***, а функцией потерь была выбрана среднеквадратичная ошибка ***mean\_squared\_error***. Для запуска обучения нейронной сети вызывается процедура ***fit()***, с указанием

входных параметров  $X$  и целевых значений  $Y$ . Для запуска предсказания значений используется процедура ***predict()***. Обучение проводилось на наборе данных, полученных в результате практических экспериментов по 3D печати шоколадом с использованием 30 образцов.

Стоит обратить внимание, что в обучающем наборе данных входной вектор  $X$  содержит достаточно разношёрстные параметры, которые отличаются единицами измерения и размерностью. Например, скорость средние значения которой составляют 20-30 мм/с, температура, которая изменяется в пределах 0.1 °C, класс дефекта, который принимает целочисленное значение класса. Для корректного обучения нейронной сети, данные были нормализованы, приведены к нормальному виду при помощи библиотеки ***Sklearn.preprocessing*** инструмента ***MinMaxScaler()***.

### 5.3 Разработка базы данных АСК ТП пищевой 3D печати

Для корректного функционирования СПР, для сохранения результатов печати, для сохранения весовых коэффициентов ИНС и для возможности накопления опыта была разработана база данных (БД). Основные задачи БД: хранение информации о результатах печати, распределённой по материалам; хранение весовых коэффициентов для нейронной сети; хранение оперативной информации о текущем процессе печати.

При разработке БД потребовалось решить несколько задач: анализ предметной области для определения состава информации, построение концептуальной модели, физическое проектирование БД и её реализация в MySQL [110].

Основной целью разработки физической ERWIN обобщённой схемы данных на основе представлений о предметной области является описание основных сущностей и связей между ними [69] и определение ключевых идентификаторов каждой сущности. Основными конструктивными элементами концептуальных моделей являются сущности (объекты), их атрибуты и связи между ними.

Накопление данных обо всех результатах печати происходит в специальном



хранилище, созданным для накопления статистических данных о ТП 3D печати, а также для реализации функции самообучения СПР (PHC) (таблица 5.1).

Таблица 5.1 - Структура компоненты БД, журнал распечатанных моделей

| № | Дата | Имя файла | Материал | Вес, грамм | Время печати, сек. | Оценка, (0 - 10) |
|---|------|-----------|----------|------------|--------------------|------------------|
| 1 | 2    | 3         | 4        | 5          | 6                  | 7                |

Параметры ТП для каждого отпечатанного блюда представляются построчно для каждого слоя. Таким образом для каждого блюда создаётся таблица, имеющая фиксированное число столбцов, характеризующее контролируемые параметры ТП, а число строк равно общему числу слоёв распечатанной модели. Таким образом сохраняется вся информация о протекании ТП, на основании которой возможно проследить зависимость влияния параметров печати на конечный результат. Такие данные являются очень важным ресурсом, и являются обучающей выборкой для рекуррентной нейронной сети. В таблице 5.2 приведена структура БД, создаваемая для каждого отпечатанного файла.

Таблица 5.2 - Структура компоненты БД, сведения о ТП для каждой печати

| № слоя | Высота слоя, мм. | L <sub>слоя</sub> , мм | Время печати, сек. | T <sub>сопла</sub> , град. ц | T <sub>стола</sub> , град. ц | V <sub>печати</sub> , мм/с | T <sub>обдува</sub> , град. ц | V <sub>обдува</sub> , % |
|--------|------------------|------------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1      | 2                | 3                      | 4                  | 5                            | 6                            | 7                          | 8                             | 9                       |

| T <sub>о.с.</sub> , град. ц | Система визуального контроля        |                                 |                | Изображение слоя | Визуализация слоя |
|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------|------------------|-------------------|
|                             | Погрешность формы ( $\delta_E$ ), % | Время застывания слоя (Time), с | Класс дефектов |                  |                   |
| 10                          | 11                                  | 12                              | 13             | 14               | 15                |

Представленные строки с данными формируются в течение всего процесса печати в блоке рабочей памяти, по завершению печати пользователь ставит свою оценку получившемуся блюду, и после этого информация о текущем ТП сохраняется в БД «Результаты печати».

Архитектура разработанной БД представлена на рисунке 5.3. Создание БД проводилось при помощи средств MySQL [110].

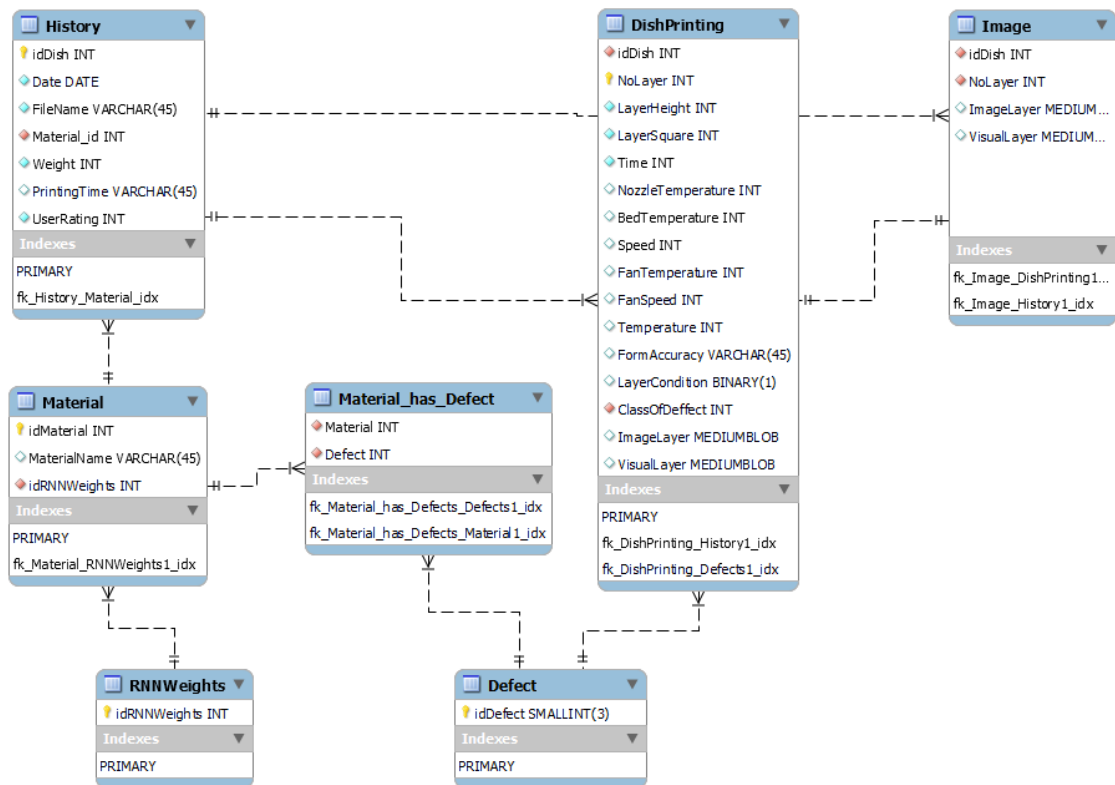


Рисунок 5.3. Архитектура БД АСК ТП пищевой 3D печати.

## 5.4 Интеграция системы автоматизированного контроля с принтером для пищевой 3D печати

### 5.4.1 Аппаратная реализация

На рисунке 5.4 представлена схема всего устройства. Обычно 3D принтеры включают в себя стандартные компоненты такие как: исполнительные механизмы (шаговые двигатели, нагревательные элементы), датчики (термодатчики, концевые датчики), экструдер, материнская плата, силовая рама и прочее. Для реализации автоматизированной системы контроля потребовалось дооснастить устройство: несколькими видеокамерами (в данном исследовании использовались камеры

NCM-198F R1.3) светодиодной подсветкой (с цветовой температурой 3200K и с рабочим напряжением 12В) и дополнительной платой управления, в качестве которой был выбран микрокомпьютер Raspberry Pi3В. С его помощью осуществляется работа АСК и выполняется основная задача анализа изображений, прогнозирование величин управляющих параметров и их отправка на материнскую плату принтера.

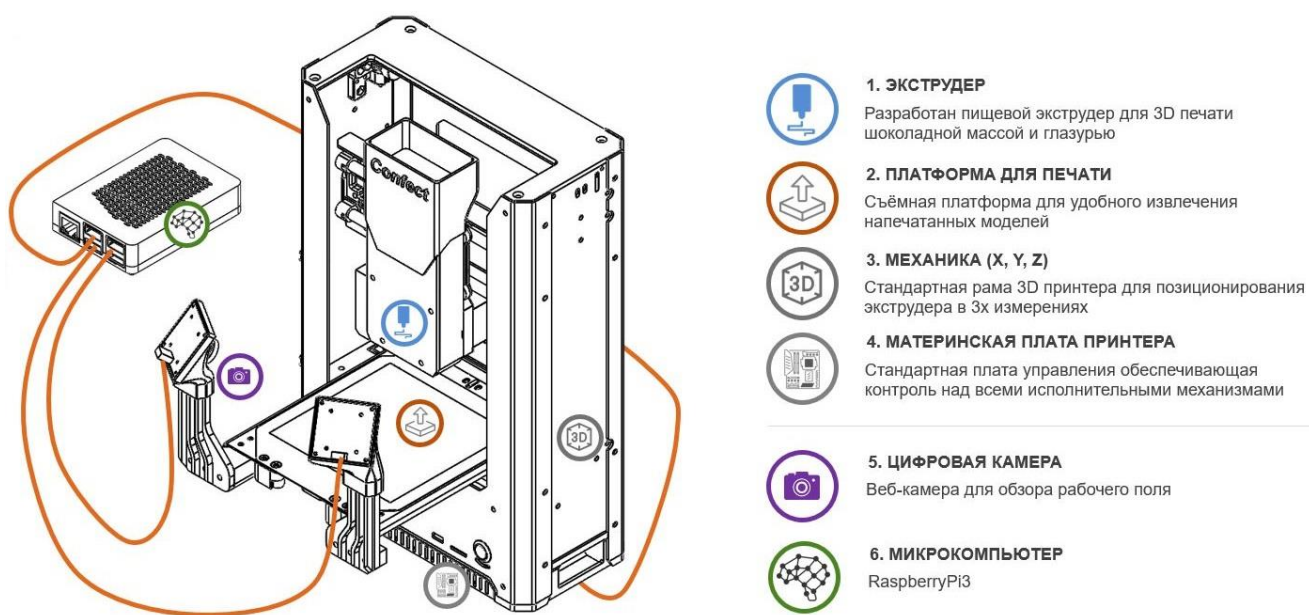


Рисунок 5.4. Пищевой 3D принтер с автоматизированной системой контроля органолептических показателей качества.

Видеокамеры подключены к микрокомпьютеру по интерфейсу USB. Соответственно запитаны они от USB портов Raspberry Pi3В. Микрокомпьютер имеет несколько вариантов подключения внешнего питания: непосредственно от материнской платы принтера, в виде отдельной линии 5 вольт, либо от внешнего блока питания.

В качестве материнской платы 3D принтера возможно выбрать практически любую стандартную плату управления. К ней подключаются все датчики и исполнительные механизмы. Для обмена информацией с материнской платой используется интерфейс USB. В нормальном режиме работы материнская плата принтера, подключенная к компьютеру, управляется через последовательный порт и воспринимает в качестве команд строки G-Code, после чего моментально их

выполняет или отправляет ответное сообщение. Для нашего проекта была использована плата BTT SKR Mini E3 V3 со стабильной версией прошивкой Marlin 2.0 с открытым исходным кодом [109].

Светодиодная подсветка подключается к материнской плате принтера и управляется посредством команд M106 S0-255 или M107.

#### 5.4.2 Архитектура программного обеспечения

Общая схема функционирования всего программно-аппаратного комплекса представлена на рисунке 5.5.

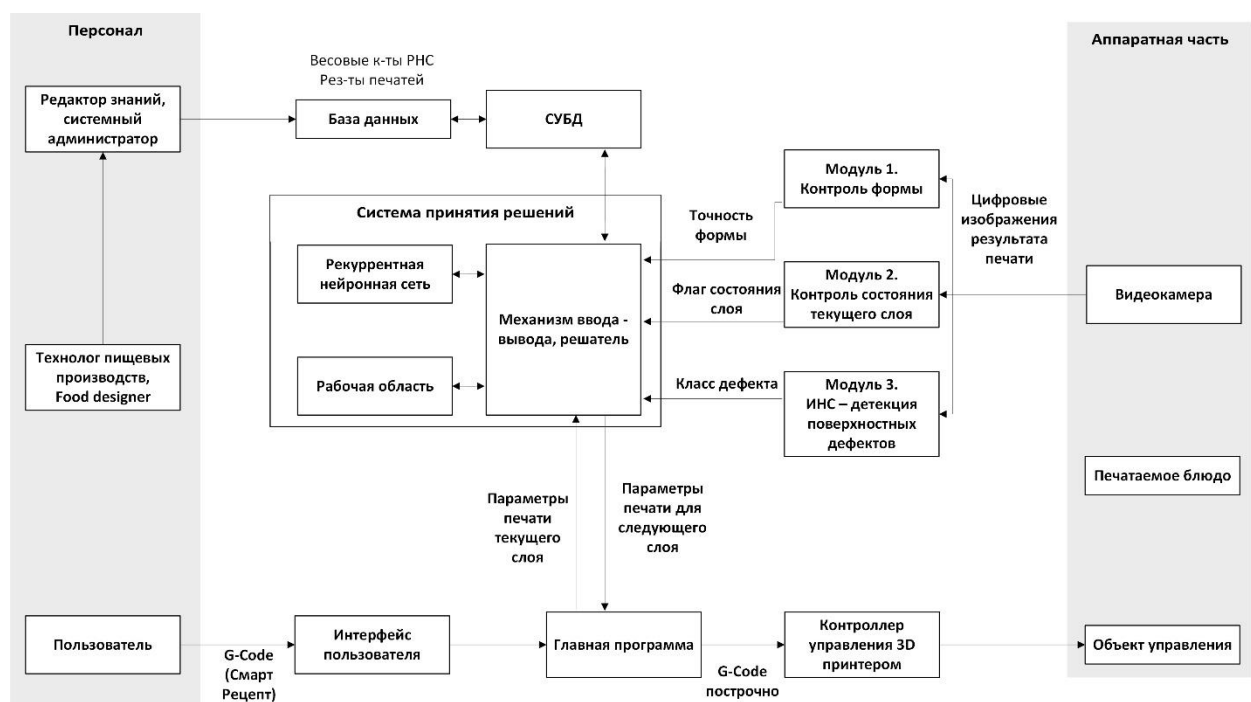


Рисунок 5.5. Архитектура ПАС АСКУ ТП 3D печати шоколадом.

В обычно 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 микрокомпьютер 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 для YOLO и PHC, обученных для

определённого материала, и загружает в нейронную сеть. После печати первого слоя, цифровые изображения, полученные видеокамерой, передаются в модули визуального контроля (модули 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, если установлено соответствующее разрешение на панели управления. Эта процедура циклична и равна общему числу слоёв печатаемого изделия. Таким образом осуществляется автоматизированный контроль, на протяжении всего ТП пищевой 3D печати.

#### 5.4.3 Пользовательский интерфейс

Для взаимодействия с автоматизированной системой контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати разработан пользовательский интерфейс, представленный на рисунке 5.6. Реализация GUI осуществлялась посредством ПО PyCharm CE, PySide6 и модуля QT Designer [117, 127].

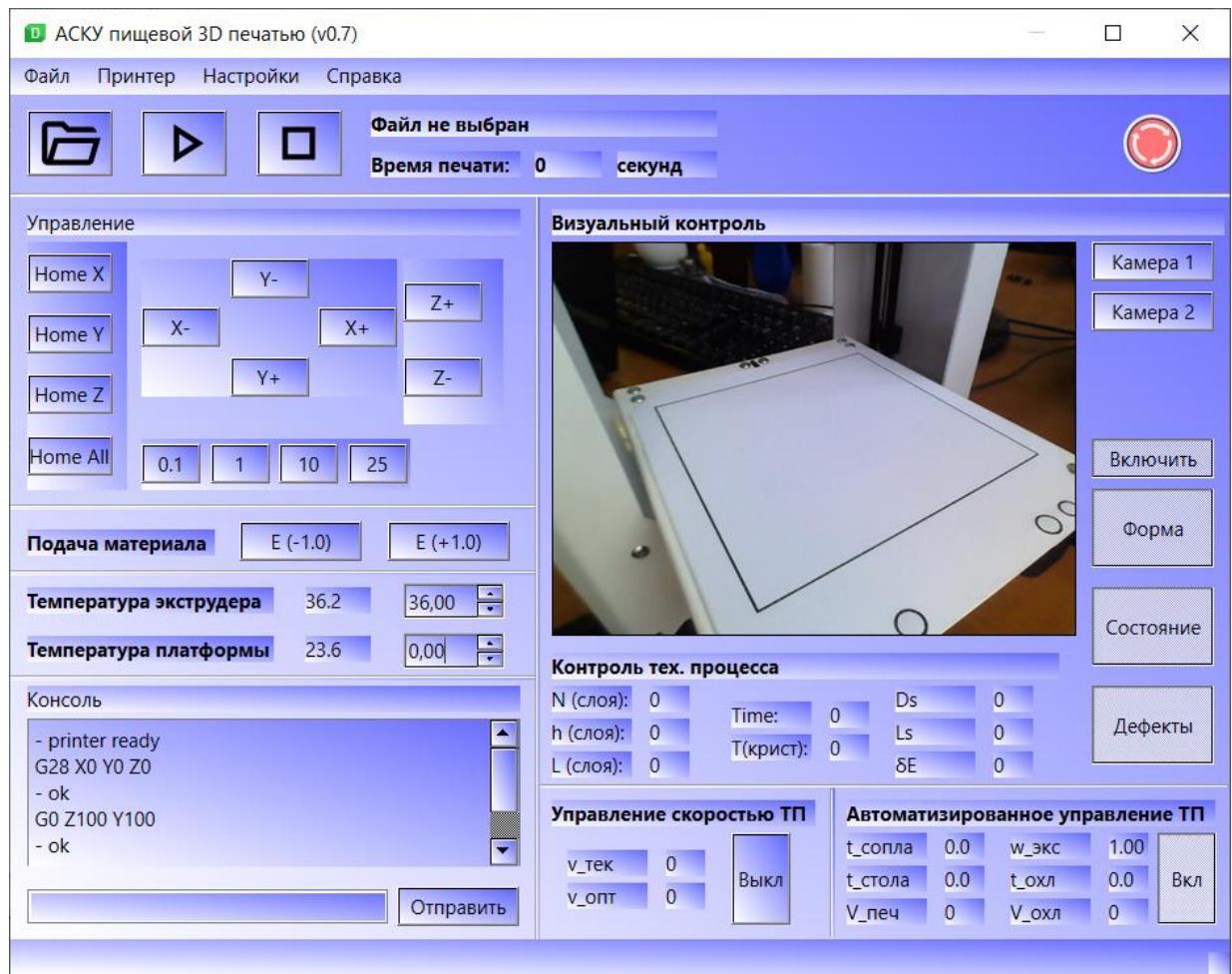


Рисунок 5.6. Пользовательский интерфейс АСКУ ТП 3D печати шоколадом.

В самой верхней части программы расположены модули для загрузки файла G-Code, запуска и остановки печати. Справа имеется кнопка аварийной остановки.

В левой части программы располагается блок управления 3D принтером. С его помощью возможно управлять исполнительными механизмами устройства, находить «домашние положения» принтера, перемещать экструдер по осям X, Z и печатную платформу по оси Y. Для удобства перемещений под кнопками управления расположен переключатель шага (0.1, 1, 10, 25 мм). Чуть ниже расположены модули управления подачей материала экструдером и его температурой.

В нижнем левом углу располагается «консоль» - последовательный порт принтера, в котором отражаются посылаемые команды «G-Code» и ответы. При необходимости, с её помощью возможно отправить какие-либо команды в ручном режиме.

В средней части программы располагается окно вывода изображений, получаемых с видеокамер. Иконки, расположенные справа, позволяют переключаться между левой и правой камерами.

В правой части приложения располагается блок управления модулями визуального контроля. С его помощью можно включать или отключать необходимые компоненты (контроль формы, оценка состояния слоя, детекция дефектов).

В центральной нижней части экрана располагается блок параметров технологического процесса, отражающий текущее состояние показателей (номер слоя, высота слоя, длина траектории слоя, время печати слоя, время кристаллизации, класс дефекта, состояние слоя, относительная погрешность формы).

Чуть ниже расположен блок автоматизированного управления, который отвечает за включение одного из алгоритмов автоматизированного управления (алгоритм контроля скорости или прогнозирование управляющих параметров при помощи РНС). Стоит заметить, что в процессе 3D печати возможен выбор только одного из вариантов автоматизированного управления.

## 5.5 Выводы по пятой главе

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 детекции поверхностных дефектов вошедшая в этот модуль. Проработана и реализована конфигурация рекуррентной нейронной сети, лежащей в основе системы принятия управленческих воздействий. Представлена структура обучающих данных.

Разработана база данных в MySQL для возможности функционирования АСКУ ТП 3D печати шоколадом. 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.

Предложен способ интеграции АСКУ в систему 3D принтера и подобрана модель управляющего микрокомпьютера для её реализации. 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.

Разработана архитектура ПО, и детально описан принцип работы всех компонентов входящих в АСКУ ТП 3D печати. Для управления всей системой был разработан графический пользовательский интерфейс, позволивший проводить точную настройку технологического процесса путём управления алгоритмами контроля.

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



## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И 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.

Результаты настоящей работы, а именно: автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой трёхмерной печати шоколадом, предложенные алгоритмы, модели и методы контроля, а также

программные модули прошли апробацию и были переданы для внедрения на производство в кондитерный и шоколадный цеха ОАО «Рот-Фронт» Холдинга «Объединённые кондитеры», в Лабораторию пищевых аддитивных технологий технопарка «Superfood технологии» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ», а также использованы в обучающем процессе кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ».

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

АСКУ – Автоматизированная система контроля и управления;

ИНС – Искусственная нейронная сеть;

РНС – Рекуррентная нейронная сеть;

СПР – Система принятия решений;

СТЗ – Система технического зрения;

ТП – Технологический процесс.

## 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: (ВСЕ ОСТАЛЬНЫЕ)*

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. – EDN BVCXQL.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адилов, Р.М. Системы искусственного интеллекта. Модуль 3. Системы машинного зрения: Учеб. пособие для вузов / Р.М. Адилов. – Пенза: ПГТА, 2008. – 132 с.
2. Айвазова М. А. Индустрия 4.0: влияние на экономическое развитие //Вестник науки. – 2021. – Т. 3. – №. 1. – С. 34.
3. Афолина Е. В. Перспективы реализации концепции" Индустрия 4.0" в отечественной промышленности //Друкерровский вестник. – 2018. – №. 1. – С. 173-182.
4. Балыхин М.Г., Борзов А.Б., Благовещенский И.Г. Методологические основы создания экспертных систем контроля и прогнозирования качества пищевой продукции с использованием интеллектуальных технологий: Монография/ М.Г. Балыхин, А.Б. Борзов, И.Г. Благовещенский. – М.: Франтера, 2017, 395 с.
5. Белов М. П., Лань Н. В. Разработка нейросетевого наблюдателя для оценки координат системы управления электроприводом оптико-механического комплекса //Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2021. – №. 3. – С. 65-72.
6. Библиотека Keras - Русскоязычная документация: [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-keras.com/home/>. (Дата обращения: 21.01.2023).
7. Благовещенская М. М., Благовещенский И.Г., Назойкин Е.А. Методика автоматической оценки качества пищевых изделий на основе теории искусственных нейронных сетей. // «Пищевая промышленность». 2015. №7.
8. Благовещенская М.М., Шаверин А.В., Благовещенский И.Г. Автоматизация контроля показателей вкуса шоколадных изделий на основе использования нейронных сетей // «Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья». 2012. №8.

9. Благовещенский В. Г. Интеллектуальная автоматизированная система управления качеством халвы с использованием гибридных методов и технологий: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Благовещенский Владислав Германович, 2021. – 219 с. – EDN RAAQHK.
10. Благовещенский В.Г., Благовещенский И.Г., Холопов В.А., Зеленова Е.Н. Применение на производстве нейронной сети YOLO для определения качества пищевой продукции //Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности. – 2023. – С. 66-72.
11. Благовещенский, И. Г. Автоматизированная экспертная система контроля в потоке показателей качества помадных конфет с использованием нейросетевых технологий и систем компьютерного зрения: специальность 05.13.07: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Благовещенский Иван Германович, 2015. – 229 с. – EDN SGUENP.
12. Благовещенский, И. Г. Методологические основы создания экспертных систем контроля и прогнозирования качества пищевой продукции с использованием интеллектуальных технологий: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Благовещенский Иван Германович, 2018. – 443 с. – EDN WDNRNZ.
13. Благовещенский И.Г., Носенко С.М. Экспертная интеллектуальная система мониторинга процесса формирования помадных конфет с использованием системы технического зрения // «Пищевая промышленность», №6 , 2015. №6.

- 14.Благовещенский И.Г., Троицкий А.К. Теоретические основы использования системы технического зрения в системе автоматического управления технологическими процессами / И.Г. Благовещенский, А.К. Троицкий //Материалы первой международной НПК «Планирование и обеспечение подготовки и переподготовки кадров для отраслей пищевой промышленности и медицины». - М.: Изд. комплекс МГУПП, 2012. с. 165 – 172.
- 15.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.
- 16.Брехт Э. А., Коншина В. Н. Применение нейронной сети YOLO для распознавания дефектов // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2022. – №. 2 (30). – С. 41-47.
- 17.Будыльский Д. В. GRU и LSTM: современные рекуррентные нейронные сети // Молодой ученый. – 2015. – №. 15. – С. 51-54.
- 18.Визильтер, Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Осоков, А.В. Моржин. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
- 19.Гафаров Ф.М. Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. Пособие / Ф.М. Гафаров, А.Ф. Галимянов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 121 с.
- 20.Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: "Техносфера", 2012. – 1104 с.
- 21.Гончарова О. Н. и др. Аддитивные технологии-динамично развивающееся производство // Инженерный вестник Дона. – 2016. – Т. 43. – №. 4 (43). – С. 123.



22. Гончаров К.А., Благовещенский И.Г., Назойкин Е.А., Благовещенский В.Г., Макаровская З.В. Использование библиотеки *opencv* для работы с техническим зрением // Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности. Сборник материалов конференции. 2019. С. 53-60.
23. ГОСТ 4570 – 93 «Конфеты. Общие технические условия» ( с 01.08.97 ИУС №4/97).
24. ГОСТ 5897-90 «Изделия кондитерские. Методы определения органолептических показателей качества». – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 5 с.
25. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2017. - 16 с.
26. ГОСТ Р 57590-2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы - часть 3. Общие требования. - М.: Стандартинформ, 2017. - 16 с.
27. ГОСТ Р 59585-2021/ISO/ASTM 52921:2013 Аддитивные технологии. Системы координат. Общие положения. - М.: Российский институт стандартизации, 2022. - 24 с.
28. Гришин А. С. и др. Новые технологии в индустрии питания-3D-печать // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2016. – Т. 4. – №. 2. – С. 36-44.
29. Демидова Л. А., Марчев Д. В. Применение рекуррентных нейронных сетей в задаче классификации отказов работы сложных технических систем в рамках проактивного технического обслуживания // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – №. 69. – С. 135-148.

- 30.Еделев Д. А., Благовещенская М. М., Благовещенский И.Г. Использование нейронных сетей как фактора повышения качества и безопасности производства пищевых продуктов при решении задач автоматизации // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2015. – Т. 1, № 7(1). – С. 7-10. – DOI 10.15673/2312-3125.21/2015.42856. – EDN VRNCSD.
- 31.Жилов Р. А. Постройка ПИД-регулятора с использованием нейронных сетей //Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – №. 5 (109). – С. 38-47.
- 32.Жиров М.В., Макаров В.В., Солдатов В.В. Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 204.
- 33.Ивашкин Ю.А. Системный анализ и исследование операций в прикладной биотехнологии. Учебное пособие. М.: МГУПБ, 2005. – 196.
- 34.Игнатьев М. А. Унификация элементов в промышленном дизайне (на примере модульной аддитивной системы) // ББК 85.1 М53. – 2022. – С. 128.
- 35.Карелина Е.Б., Благовещенская М.М., Благовещенский В.Г., Клехо Д.Ю., Благовещенский И.Г. Интеграция адаптивного управления в технологические процессы пищевой отрасли // Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности. Сборник материалов конференции. 2019. С. 81-89.
- 36.Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей. (The Essence of Neural Networks First Edition). / Р Каллан. – М.: «Вильямс», 2001. – 288 с.
- 37.Лукьяница А.А. Цифровая обработка изображений / А.А. Лукьяница, А.Г. Шишкин – М.: «Ай-Эс-Эс Пресс», 2009. – 518 с.
- 38.Ложкин И.А., Дунаев М.Е., Зайцев К.С., Гармаш А.А. Аугментация наборов изображений для обучения нейронных сетей при решении задач

семантической сегментации //International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 109-117.

- 39.Лутц, Марк. Изучаем Python, том 2, 5-е изд.: Пер. с англ. — СПб. : ООО “Диалектика”, 2020. — 720 с
- 40.Ляшева, С. А. Обработка изображений в системах компьютерного зрения / С. А. Ляшева, М. П. Шлеймович. — Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Редакционно-издательский центр "Школа", 2020. — 155 с. — ISBN 978-5-00162-260-4. — EDN EPOFXC.
- 41.Марценюк М.А. Компьютерное зрение: Уч.-метод. пособие / М.А. Марценюк. — Пермь: ПГУ, 2007. — 204 с.
- 42.Масалимов К. А., Мунасыпов Р. А. Интеллектуальные модели на основе нейронных сетей с долгой кратковременной памятью для диагностики состояния станков в машиностроении //Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2018. – Т. 22. – №. 2 (80). – С. 138-145.
- 43.Матисон В. А. Органолептический анализ продуктов питания: Учебник / В. А. Матисон, Д. А. Еделев, В. М. Кантере, М. : Изд-во РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева. 2010. — 294 с.
- 44.Михайлова, О. М. Перспективы развития систем автоматизации по контролю работы 3D-принтеров на базе различных технологий / О. М. Михайлова, В. В. Ковалева, Д. А. Пономаренко. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2021. — № 27 (369). — С. 60-62.
- 45.Насыров И. Ф., Вдовичев Н. М., Габитов Р. И. Использование свёрточной нейронной сети архитектуры uolo для обнаружения пневмонии на рентгеновских снимках //Наукосфера. – 2021. – №. 4-1. – С. 174-177.
- 46.Небаба С. Г. Методы оценки и подготовки изображений в видеопотоке к

распознаванию объектов //Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению" Графикон". – 2018. – №. 28. – С. 450.

- 47.Никитин Д. В., Тараненко И. С., Катаев А. В. Детектирование дорожных знаков на основе нейросетевой модели YOLO //Инженерный вестник Дона. – 2023. – №. 7 (103). – С. 91-99.
- 48.Носенко С.М., Благовещенский И.Г., Шаверин А.В., Благовещенская М.М. Автоматизация контроля показателей вкуса шоколадных изделий с использованием интеллектуальных технологий. / С.М. Носенко, И.Г. Благовещенский, А.В. Шаверин, М. М. Благовещенская // Кондитерское и хлебопекарное производство. 2014. №10.
- 49.Обрубов М. О., Кириллова С. Ю. Применение lstm-сети в решении задачи прогнозирования многомерных временных рядов //Национальная ассоциация ученых. – 2021. – №. 68-2. – С. 43-48.
- 50.Брылев В. С. Проектирование шестеренчатого насоса для создания изделий из воскоподобных веществ с помощью аддитивных технологий: выпускная квалификационная работа магистра: направление 01.04. 03 «Механика и математическое моделирование»; образовательная программа 01.04. 03\_03 «Механика и цифровое производство». – 2023.
- 51.Петриков И. А., Недорезов М. В., Ткаченко В. В. Совмещение изображений с двух камер с различными диапазонами излучения // Труды Московского физико-технического института. – 2021. – Т. 13. – №. 4 (52). – С. 30-38.
- 52.Петряков А.Н., Благовещенская М.М., Благовещенский В.Г., Крылова Л.А. Применение метода объектно-ориентированного программирования для контроля показателей качества кондитерской продукции Кондитерское и хлебопекарное производство. 2018. № 5-6 (176). С. 21-23.
- 53.Подшивалова М. В., Подшивалов Д. В. Развитие малых предприятий

промышленности России в условиях Индустрии 4.0 // Вестник Челябинского государственного университета. – 2020. – №. 11 (445). – С. 184-193.

- 54.Поезжалова С. Н., Селиванов С.Г., Бородкина О.А., Кузнецова К.С. Рекуррентные нейронные сети и методы оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП машиностроительного производства //Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15. – №. 5 (45). – С. 36-46.
- 55.Пономаренко Д. А., Михайлова О. М. Разработка концепции разноуровневой автоматизации аддитивного производства на базе 3d-печати // Интернаука. – 2020. – №. 4-2. – С. 26-28.
- 56.Прокопенко, В. В. Применения нейросетевой модели YOLO в рамках задачи детектирования эмоций / В. В. Прокопенко // Наукосфера. – 2023. – № 5-2. – С. 305-311. – EDN JCRBWE.
- 57.Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 г. № 1913-р
- 58.Родионов Л. В., Свербилов В. Я. Проектирование объемного насоса. – 2011.
- 59.Родионова О. И., Алешков А. В., Синюков В. А. 3D-печать пищевой продукции как инновационная технология // Вестник Хабаровского государственного университета экономики и права. – 2019. – №. 2 (100). – С. 119-124.
- 60.Румянцев А. Н. Автоматизация и роботизация пищевой промышленности в индустрии 4.0 // Балтийский морской форум. – 2022. – С. 291-294.
- 61.Савицкий В. В., Голубев А. Н., Быковский Д. И. Исследование влияния параметров 3D-печати на размерную точность изделий // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2018. – №. 2 (35). – С. 52-61.

- 62.Савостин Д.С., Благовещенская М.М., Семина Н.А. Использование цифровой видеокамеры в качестве интеллектуального датчика системы автоматического регулирования процесса формирования гранулированных комбикормов // «Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий», №2, 2014. – с. 48 - 56.
- 63.Сверточная нейронная сеть, часть 1: структура, топология, функции активации и обучающее множество // Хабр [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/post/348000/> (дата обращения: 24.01.2022)
- 64.Селянкин, В. В. Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения : Учебное пособие для магистрантов, аспирантов и специалистов в области обработки и распознавания изображений, компьютерного зрения / В. В. Селянкин, С. В. Скороход ; Южный федеральный университет. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2015. – 82 с. – EDN VKVHDH.
- 65.Селянкин, В. В. Компьютерное зрение. Анализ и обработка изображений / В. В. Селянкин. – Санкт-Петербург: Издательство "Лань", 2019. – 152 с. – ISBN 978-5-8114-3368-1. – EDN DOVFGP.
- 66.Спиридонов А. Б. и др. Цифровые технологии в пищевой и перерабатывающей промышленности //Научные инновации в развитии отраслей АПК. – 2020. – С. 174-178.
- 67.Спиридонов А. Б., Копысова Т. С., Волков М. Д. Пищевые 3D-принтеры // Технологические тренды устойчивого функционирования и развития АПК. – 2021. – С. 173-181.
- 68.Старовойтов В. В., Голуб Ю. И. Получение и обработка изображений на ЭВМ. – 2018.
- 69.Столяров А.И. Построение концептуальной схемы баз данных // Портал научно-практических публикаций [Электронный ресурс]. URL:

<https://portalnp.snauka.ru/2014/06/2064> (дата обращения: 24.02.2023)

70. Сычугов А. Н., Михейчиков В. Н., Чернышов М. В. Применение нейронных сетей для распознавания объектов на железнодорожном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20. – №. 2. – С. 478-491.
71. Толкачев Д. С. Повышение точности калибровки внешних параметров видеокамеры // Инженерный вестник Дона. – 2013. – Т. 26. – №. 3 (26). – С. 92.
72. Феофилов С. В., Хапкин Д. Л. Применение рекуррентных нейронных сетей в замкнутых следящих системах с нелинейными объектами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – №. 11. – С. 72-80.
73. Финогеев Д. Ю., Решетникова О. П. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения // Вестник СГТУ. – 2020. – №. 3. – С. 63-71.
74. Шаверин А.В., Благовещенская М.М., Благовещенский И.Г. Автоматизация контроля органолептических показателей качества шоколадных изделий // Сб. науч. трудов первой международной НПК «Планирование и обеспечение подготовки и переподготовки кадров для отраслей пищевой промышленности». - М.: Изд. комплекс МГУПП, 2012. с. 209 – 212.
75. 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.
76. Шибанов Э.Д., Благовещенский И.Г., Назойкин Е.А. Визуальная оценка состояния шоколадной массы при помощи системы технического зрения // Хранение и переработка сельхозсырья. (Принята редакцией для публикации)

- 77.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.
- 78.Шибанов Э. Д. и др. Обзор систем контроля за процессом fdm (fff) 3d печати // Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности. – 2022. – С. 346-354.
- 79.Экструдер для шоколада - готов! 3D today: [Электронный ресурс]. [URL:https://3dtoday.ru/blogs/twinshadoww/ekstruder-dlya-shokolada-gotov](https://3dtoday.ru/blogs/twinshadoww/ekstruder-dlya-shokolada-gotov). (Дата обращения: 21.01.2020).
- 80.Юдин Е. М. Шестеренчатые насосы. Основные параметры и их расчёт. Изд. 2-е, перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 1964. - 238 с.
- 81.Якимайнен Д. С., Кариков Е. Б., Шамраев А. А. Техническое зрение в задачах контроля качества производства курицы // Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТНОП-2023). – 2023. – С. 183-187.
- 82.Яфасов А.Я., Меркулов А.А., Майтаков Ф.Г. Роль цифровой трансформации в диверсификации рыбной отрасли на примере организации персонализированного питания в регионе // Известия КГТУ. – 2021. – №. 61. – С. 121-132.
- 83.Aradwad P., Kumar A., “3D Food Printing Technology: Future of Customized Food Products Scanned with CamScanner,” no. December 2019, 2020.
- 84.Beckett S. T. The science of chocolate. – Royal Society of Chemistry, 2019.
- 85.Bochkovskiy A., Wang C. Y., Liao H. Y. M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection //arXiv preprint arXiv:2004.10934. – 2020.



- 86.Casado-García Á. et al. CLoDSA: a tool for augmentation in classification, localization, detection, semantic segmentation and instance segmentation tasks //BMC bioinformatics. – 2019. – T. 20. – C. 1-14.
- 87.Delli, U., & Chang, S. (2018). Automated Process Monitoring in 3D Printing Using Supervised Machine Learning. Procedia Manufacturing, 26, 865–870. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.111>
- 88.Derossi A. et al. Accelerating the process development of innovative food products by prototyping through 3D printing technology //Food Bioscience. – 2023. – T. 52. – C. 102417.
- 89.Fasogbon B. M., Adebo O. A. A bibliometric analysis of 3D food printing research: A global and African perspective //Future Foods. – 2022. – C. 100175.
- 90.Ferreira I. A., Alves J. L., “Low-cost 3D food printing,” Cienc. e Tecnol. dos Mater., vol. 29, no. 1, pp. e265–e269, 2017, doi: 10.1016/j.ctmat.2016.04.007.
- 91.G-Code – RepRap [Электронный ресурс]. URL: <https://reprap.org/wiki/G-code> (Дата обращения: 13.07.2020).
- 92.GitHub - joheras/CLoDSA [Электронный ресурс] // GitHub. URL: <https://github.com/joheras/CLoDSA> (Дата обращения: 06.10.2022).
- 93.GitHub - jfilter/split-folders [Электронный ресурс] // GitHub. URL: <https://github.com/jfilter/split-folders> (Дата обращения: 08.10.2022).
- 94.Holzmond, O., & Li, X. (2017). In situ real time defect detection of 3D printed parts. Additive Manufacturing, 17, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.003>
- 95.Horvat M., Jelečević L., Gledec G.. A comparative study of YOLOv8 models performance for image localization and classification // 33rd Central European Conference on Information and Intelligent Systems (CECIIS), 2022, P. 349

96. Jagadiswaran B. et al. Valorization of food industry waste and by-products using 3D printing: A study on the development of value-added functional cookies //Future Foods. – 2021. – Т. 4. – С. 100036.
97. Jin Z., Zhang Z., Gu G.X. (2019). Autonomous in-situ correction of fused deposition modeling printers using computer vision and deep learning. Manufacturing Letters, 22, 11–15. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.09.005>
98. Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). YOLO by Ultralytics (Version 8.0.0) [Электронный ресурс] // GitHub. - URL: <https://GitHub.com/ultralytics/ultralytics> (Дата обращения: 03.04.2023).
99. Kazemian, A., Yuan, X., Davtalab, O., & Khoshnevis, B. (2019). Computer vision for real-time extrusion quality monitoring and control in robotic construction. Automation in Construction, 101 (August 2018), 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.022>
100. Keras: Deep Learning for humans: [Электронный ресурс]. URL: <https://keras.io/>. (Дата обращения: 21.01.2022).
101. Koranne V. et al. Exploring properties of edible hydrolyzed collagen for 3D food printing of scaffold for biomanufacturing cultivated meat //Procedia CIRP. – 2022. – Т. 110. – С. 186-191.
102. Kumbár V. et al. Rheological behaviour of chocolate at different temperatures //Potravinarstvo. – 2018.
103. Lanaro M. et al., “3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation,” J. Food Eng., 2017, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029.
104. Lanaro M., Desselle M.R., Woodruff M.A., 3D Printing Chocolate. Elsevier Inc., 2019.

105. Lipton Z. C., Berkowitz J., Elkan C. A critical review of recurrent neural networks for sequence learning //arXiv preprint arXiv:1506.00019. – 2015.
106. Liu Z., Zhang M. (2019). 3D Food Printing Technologies and Factors Affecting Printing Precision. In Fundamentals of 3D Food Printing and Applications. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814564-7.00002-x>
107. Ma Y., Zhang L. Formulated food inks for extrusion-based 3D printing of personalized foods: a mini review // Current Opinion in Food Science. – 2022. – T. 44. – С. 100803.
108. Malik A., Lhachemi H., Ploennigs J., Ba A., Shorten R. (2019). An application of 3d model reconstruction and augmented reality for real-time monitoring of additive manufacturing. Procedia CIRP, 81, 346–351. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.060>
109. Marlin firmware [Электронный ресурс]. URL: <https://marlinfw.org> (Дата обращения: 07.05.2022).
110. MySQL [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mysql.com> (Дата обращения: 24.02.2023).
111. OpenCV шаг за шагом. Уроки OpenCV по-русски от Чеширского Кота [Электронный ресурс]. URL: <http://robocraft.ru/blog/computervision/264.html>. (дата обращения: 21.01.2022)
112. OpenCV: Camera calibration [Электронный ресурс]. URL: [https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial\\_py\\_calibration.html](https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html) (Дата обращения: 24.08.2022).
113. OpenCV documentation [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.opencv.org/index.html>. (Дата обращения: 21.01.2022)
114. Open CV - Open Computer Vision Library: [Электронный ресурс]. URL: <https://opencv.org/>. (Дата обращения: 21.01.2022).

115. Portanguen S., Tournayre P., Sicard J., Astruc T., Mirade P. S. “Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing: A review,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 86, no. May 2018, pp. 188–198, 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.02.023.
116. Pitayachaval P., Sanklong N., Thongrak A., “A Review of 3D Food Printing Technology,” *MATEC Web Conf.*, vol. 213, p. 01012, Oct. 2018, doi: 10.1051/mateconf/201821301012.
117. PySide6 Tutorial 2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pythonguis.com/pyside6-tutorial/> (Дата обращения: 04.04.2023).
118. Rando P., Ramaioli M. Food 3D printing: Effect of heat transfer on print stability of chocolate // *Journal of Food Engineering*. – 2021. – Т. 294. – С. 110415.
119. Sak H., Senior A. W., Beaufays F. Long short-term memory recurrent neural network architectures for large scale acoustic modeling. – 2014.
120. Schmidhuber J. et al. Long short-term memory // *Neural Comput.* – 1997. – Т. 9. – №. 8. – С. 1735-1780.
121. Sherstinsky A. Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. – 2020. – Т. 404. – С. 132306.
122. Staudemeyer R. C., Morris E. R. Understanding LSTM--a tutorial into long short-term memory recurrent neural networks // *arXiv preprint arXiv:1909.09586*. – 2019.
123. Tan C., Toh W. Y., Wong G., Li L. “Extrusion-based 3D food printing - Materials and machines,” *Int. J. Bioprinting*, vol. 4, no. 2, pp. 1–13, 2018, doi: 10.18063/IJB.v4i2.143.
124. Tamir T. S. et al. 3D printing in materials manufacturing industry: A realm

of Industry 4.0 // Heliyon. – 2023.

125. TensorFlow. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tensorflow.org/?hl=ru>. (Дата обращения: 24.01.2022).
126. Van Houdt G., Mosquera C., Nápoles G. A review on the long short-term memory model //Artificial Intelligence Review. – 2020. – Т. 53. – С. 5929-5955.
127. Willman J. M. Creating GUIs with Qt Designer //Beginning PyQt: A Hands-on Approach to GUI Programming with PyQt6. – Berkeley, CA : Apress, 2022. – С. 217-258.
128. Xie Y., Tan Y., Ma G., Zhang J., Zhang F., “Design and Implementation of Chocolate 3D Printer,” DEStech Trans. Comput. Sci. Eng., 2017, doi: 10.12783/dtcse/itms2016/9434.

## СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Рисунок 1.1. Кинематическая схема 3D принтера RepRap для печати пластиком.

Рисунок 1.2. 3D принтер с экструдером для печати пищевыми компонентами.

Рисунок 1.3. Машино – аппаратурная схема ТП пищевой 3D печати шоколадом.

Рисунок 1.4. Машино – аппаратурная схема ТП пищевой 3D печати шоколадом оснащённого СТЗ.

Рисунок 1.5. ФСС влияния показателей сырья и режимов работы оборудования на качество получаемых шоколадных изделий на всех стадиях ТП.

Рисунок 1.6. ФСС формирования качества шоколадных продуктов, получаемых методом пищевой 3D печати с указанием информативных параметров контроля и регулирования.

Рисунок 2.1. Сравнение сопла для печати пластиком (слева) и шоколадом (справа) в разрезе.

Рисунок 2.2. Эскиз экструдера для 3D печати шоколадом и шоколадной глазурью.

Рисунок 2.3. Изготовленный экструдер для печати шоколадом.

Рисунок 2.4. Модернизированный 3D принтер для печати шоколадных фигур.

Рисунок 2.5. Режим предварительного просмотра модели в программе Simplify3D.

Рисунок 3.1. Пример построения трёхмерной реконструкции эталонной модели.

Рисунок 3.2. Используемые системы координат.

Рисунок 3.3. Пример проецирования точки на плоскость.

Рисунок 3.4. Пример проецирования объекта на плоскость, камера Обскура.

Рисунок 3.5. Алгоритм работы модуля контроля формы изделия.

Рисунок 3.6 Изменение площади сечения одной модели на разных высотах.

Рисунок 3.7. Структура одного напечатанного слоя.

Рисунок 3.8. Алгоритм работы модуля оптимизации линейной скорости печати.

Рисунок 3.9. График изменения цветности сырья в процессе охлаждения.

Рисунок 3.10. Алгоритм работы модуля визуальной оценки состояния текущего слоя.

Рисунок 3.11 Применение операции свёртки к бинарному изображению.

Рисунок 3.12. Применение операции MaxPolling.

Рисунок 3.13 Общая архитектура YOLO v8 с детальным представлением каждого модуля (визуализация пользователя RangeKing, GitHub).

Рисунок 3.14. Строение модуля Neck.

Рисунок 3.15. Изображения из обучающей выборки.

Рисунок 3.16. Графики обучения нейронной сети.

Рисунок 3.17. Изображения из обучающей выборки.

Рисунок 3.18. Результат сегментации дефектов на контролируемом изображении.

Рисунок 4.1 Схема подражающего нейрорегулятора.

Рисунок 4.2. Схема инверсного нейрорегулятора.

Рисунок 4.3. Схема нейрорегулятора.

Рисунок 4.4. Схема нейрорегулятора в режиме обучения.

Рисунок 4.5. Структура рекуррентной нейронной сети для предсказания значений управляющих параметров печати следующего слоя.

Рисунок 4.6. Строение простой ячейки РНС.

Рисунок 4.7. Архитектура одного модуля LSTM.

Рисунок 4.8. Архитектура рекуррентной нейронной сети для предсказания значений управляющих параметров печати следующего слоя.

Рисунок 5.1. График процесса обучения нейронной сети YOLOv8 для классификации поверхностных дефектов.

Рисунок 5.2. Результат классификации нейронной сетью YOLO v8.

Рисунок 5.3. Архитектура БД АСК ТП пищевой 3D печати.

Рисунок 5.4. Пищевой 3D принтер с автоматизированной системой контроля органолептических показателей качества.

Рисунок 5.5. Архитектура ПАК АСКУ ТП 3D печати шоколадом.

Рисунок 5.6. Пользовательский интерфейс АСКУ ТП 3D печати шоколадом.



**ПРИЛОЖЕНИЕ 1****АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

результатов диссертационной работы аспиранта ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» Шибанова Э.Д. по теме «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы технического зрения»

Настоящий акт подтверждает, что основные результаты диссертационной работы аспиранта кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» специальности 2.3.3. - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) Шибанова Э.Д. на тему «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы технического зрения» использованы в практике деятельности Холдинга «Объединённые кондитеры».

Разработанная автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой трёхмерной печати, а также созданные методы, модели, алгоритмы и программы прошли апробацию и были переданы для внедрения в конфетный цех ОАО «Рот-Фронт» Холдинга «Объединённые кондитеры».

Председатель Совета Директоров  
Управляющий компанией «Объединённые кондитеры»  
д.т.н., профессор

Носенко С.М.

г. Москва, 115184,  
2-й Новокузнецкий пер., 13/15, стр.1  
8 495 730 69 02  
E-mail: assist@uniconf.ru

25.05.23<sub>2</sub>





**ПРИЛОЖЕНИЕ 2****АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

результатов диссертационной работы аспиранта ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» Шибанова Э.Д. по теме «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы технического зрения»

Настоящий акт подтверждает, что основные результаты диссертационной работы аспиранта кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» специальности 2.3.3. - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) Шибанова Э.Д. на тему «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы технического зрения» использованы в практике деятельности предприятий, входящих в холдинг «Объединенные кондитеры».

Разработанная автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой трёхмерной печати, а также созданные методы, модели, алгоритмы и программы прошли апробацию и были переданы для внедрения в шоколадный цех ОАО «РОТ ФРОНТ» (входит в группу предприятий холдинга «Объединённые кондитеры»).

Директор департамента технической  
политики и инноваций  
ООО «Объединенные кондитеры»

*Головин*

Головин В.В.

22.05.2023

Подпись Головина В.В. заверяю:

НАЧАЛЬНИК  
ОТДЕЛА КАДРОВ  
ДЕМИДОВА Ю В



Контактные данные:

2-ой Новокузнецкий пер., д. 13/ 15, Москва, 115184.  
тел. (495)730-69-02, факс (495)730-69-46

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)»**  
**(ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ»)**

Волоколамское шоссе, дом 11, Москва, 125080.  
Тел: (499)750-01-11 (доб. 65-67); e-mail: info@rbtu-mgupp.ru; web:rbtu-mgupp.ru  
ОКПО 02068634; ОГРН 1037739533699; ИНН/КПП 7712029651/774301001

**АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

результатов диссертационной работы аспиранта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» Шибанова Эдуарда Дмитриевича по теме «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы технического зрения»

Настоящий акт подтверждает, что основные результаты диссертационной работы аспиранта кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» (далее – Университет, РОСБИОТЕХ) специальности 2.3.3. - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) Шибанова Э.Д. на тему «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы технического зрения» использованы в практике деятельности лаборатории «Прототипирования, инжиниринга и аддитивных технологий» РОСБИОТЕХ.

Разработанный программный модуль, предназначенный для управления процессом пищевой 3D печати, прошёл апробацию и внедрён в Лабораторию пищевых аддитивных технологий технопарка «Superfood технологии» РОСБИОТЕХ по адресу г. Москва, ул. Врубеля д.12, учебный корпус «В», лаб. 6-02.

Проректор по молодёжной политике,  
к.э.н., доцент, почётный работник сферы  
образования Российской Федерации, РОСБИОТЕХ



В.В. Шутенко

Заместитель директора Технопарка РОСБИОТЕХ

А.Э. Кесватера

28.06.23

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ»

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по образовательной деятельности

Жукова Н.В.

«07» июня 2023г.

**АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

в учебный процесс кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» материалов диссертационной работы Шибанова Эдуарда Дмитриевича по теме «Автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом с использованием системы технического зрения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Результаты диссертационного исследования Шибанова Э.Д. связанные с разработкой автоматизированной системы контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати используются в учебном процессе, в лекционных курсах, при проведении лабораторных и практических занятий, в курсовом проектировании, при выполнении ВКР кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» 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», а именно:

- методика и этапы разработки автоматизированной системы контроля и управления технологическим процессом пищевой 3D печати шоколадом;



- разработанный комплекс функционально-структурных схем влияния параметров ТП 3D печати шоколадной массой на стабильность протекания процесса и конечный результат;
- разработанные методы, способы и алгоритмы контроля органолептических показателей качества с использованием нейросетевых технологий;
- предложенный метод и сопутствующие алгоритмы визуальной оценки состояния шоколадной массы с использованием технического зрения;
- набор обучающих данных, основанный на результатах практических экспериментов проводимым Шибановым Э.Д.

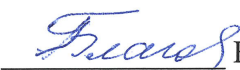
Данные разработки включены в разделы следующих дисциплин:

- Программирование и алгоритмизация
- Системы искусственного интеллекта
- Программирование на языках высокого уровня
- Проектирование систем распознавания образов
- Проектирование баз данных и баз знаний
- Интеллектуальные технологии

Зав. кафедрой АСУБП

Заслуженный деятель науки РФ

д.т.н., профессор

 Благовещенская М.М.

Зам. директора по научной работе  
института «ПИИТМ»,

к.т.н., доцент кафедры АСУБП

 Назойкин Е.А.

Д.т.н., профессор  
кафедры «АСУБП»

 Гданский Н.И.

Зам. зав. кафедрой «АСУБП»

 Сумерин В.А.