

На правах рукописи



**ЕРЕЩЕНКО ВИКТОР ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ХОЛОДНОЙ СУШКИ  
ГИДРОБИОНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ  
ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И ТЕПЛОВИЗИОННОГО АНАЛИЗА**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

**Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

Мурманск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования (ФГАОУ ВО) «Мурманский арктический университет» (МАУ).

**Научный руководитель:** **Благовещенский Иван Германович**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», профессор  
кафедры «Информатика и вычислительная техника пищевых производств»

**Официальные оппоненты:** **Петров Сергей Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ)», профессор  
кафедры систем автоматизированного управления

**Бунеев Алексей Владимирович**  
кандидат технических наук,  
ООО «СП Автоматизация», директор по развитию

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Воронежский государственный университет инженерных технологий**»

Защита состоится «28» сентября 2023 г. В 10 час. 00 мин. на заседании Диссертационного совета 24.2.334.01 (Д 212.148.02) на базе ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д.33.

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

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

Автореферат разослан «26» августа 2023 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета 24.2.334.01 (Д 212.148.02),

кандидат технических наук



Мокрушин С. А

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Традиционным сектором экономики Мурманской области, помимо добычи и переработки полезных ископаемых, является рыбная промышленность, играющая важную роль в социально-экономической специализации региона. Данная отрасль занимает четвертое место по значимости после горнодобывающей промышленности и энергетики. Однако, из-за сурового северного климата производство продукции в Мурманской области требует большого расхода энергоносителей, поэтому продукция при прочих равных условиях получается более дорогой.

Государственной программой Мурманской области «Рыбное и сельское хозяйство» от 11 ноября 2020 года с изменениями и дополнениями от 28 июля 2022 года закреплено повышение обеспечения населения рыбной продукцией местного производства. Кроме этого, государственной «Энергетической стратегией России до 2030 года» повышение энергетической эффективности промышленного оборудования закреплено на уровне правительства.

Термическая обработка является довольно распространенным процессом при консервировании в рыбной промышленности и требует значительных затрат энергии. Помимо этого, режимы обезвоживания часто разрабатываются на базе инженерных расчетов по упрощенным формулам. Разработка энергоэффективных режимов под уникальный продукт (или изменяемые параметры продукта) требует проведения экспериментальных исследований со значительными временными и энергетическими затратами. Поэтому разработка систем автоматического управления и методов, позволяющих достичь низкого энергопотребления, реализация адаптивных режимов обезвоживания рыбного сырья, повышение качества готовой продукции, является актуальной задачей на сегодняшний день.

### **Степень разработанности темы**

Вопросами теории и совершенствования техники и технологии сушки пищевых продуктов в конце прошлого века занимались такие учёные, как Воскресенский Н. А., Кизеветтер И. Н., Гинзбург А. С., Лыков А. В., Базилевич В. И., Никитин Б. Н.

Вопросами совершенствования техники и технологии сушки занимались такие исследователи, как Ершов М. А., Ершов А. М., Селяков И. Ю., Бурдо О. Г., Терзиев С. Г., Суслов А. Э., Гроховский В. А.

Вопросами внедрения современных информационных технологий в технологические процессы занимались: Вотинов М. В., Благовещенская М. М., Жиров М. В., Красинский А. Я., Краснов А. Е., L. Wang, Z. Zhu, M. Iwase, S. Hatakeyama, Y. Shiino, J. Zhao, X. Liu, T. Dai, M. Velez-Reyes, C. Rentel-Gomez, S. Hosseinpour и др.

### **Цели и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности процесса холодной сушки и технологических характеристик

готовой рыбной продукции при автоматическом управлении с применением технологии интернета вещей, динамического контроля потерь массы и тепловизионного анализа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить комплекс задач:

1. Разработать и предложить способ автоматического управления процессом холодной сушки гидробионтов.

2. Провести цифровое моделирование тепловых и влажностных процессов при обезвоживании рыбного сырья.

3. Разработать интеллектуальный датчик температуры поверхности для процесса холодной сушки.

4. Модернизировать систему автоматического управления малогабаритной сушильной установки.

#### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования данной работы является технологический процесс холодной сушки гидробионтов. Предметом исследования является автоматическое управление процессом холодной сушки гидробионтов в промышленных установках.

#### **Научная новизна исследования**

Разработан способ управления процессом обезвоживания по температуре и влагосодержанию.

Разработан программно-аппаратный комплекс для исследования режимов обезвоживания.

Разработан интеллектуальный датчик температуры поверхности рыбного сырья с применением тепловизионного анализа.

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение передачи потока данных с применением технологии интернета вещей.

#### **Практическая значимость исследования**

Разработаны элементы аппаратной составляющей комплекса: автоматические воздушные заслонки, генераторы тумана, нагреватели, регуляторы мощности, информационный шлюз с поддержкой формата ВТФ, камера подготовки сушильного агента, массоизмерительная подсистема для отслеживания динамики изменения массы в секции сушки, система непрерывного контроля теплового состояния поверхности продукта в секции сушки.

Разработаны управляющие программы для элементов программно-аппаратного комплекса.

Разработано программное обеспечение системы управления и контроля процесса холодной сушки.

Предложена методика построения подсистемы передачи данных с применением современных технологий интернета вещей (IoT).

Предложена методика построения дистанционного графического web-интерфейса оператора управления технологическим процессом.

Предложена методика построения компьютерной модели процесса обезвоживания, которая может быть использована для получения цифрового двойника сушильной установки.

Разработанный программно-аппаратный комплекс может быть использован в научно-исследовательских работах, направленных на изучение процесса холодной сушки. Предложенные технологии могут быть использованы в промышленности.

#### **Степень достоверности.**

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается тщательной проработкой моделей исследуемых процессов, корректным применением методов аппроксимации, идентификации и теории оптимального управления, использованием апробированных расчетных методик, согласованием данных расчетов и экспериментов.

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Система автоматического управления процессом холодной сушки по температуре и влагосодержанию сушильного агента, которая не требует дополнительного развязывания контуров температуры и относительной влажности.

2. Зависимость температуры и влагосодержания приточного воздуха и сушильного агента в секции сушильной установки, полученная в результате математического моделирования процесса сушки.

3. Подсистемы контроля массы сырья, температуры поверхности рыбы посредством тепловизионного контроля в совокупности с видеомониторингом состояния рыбы (интеллектуальный датчик), позволяющие снизить энергетические и временные затраты на разработку режима сушки.

4. Алгоритмы и программное обеспечение подсистемы передачи потока данных с применением технологии промышленного интернета вещей с возможностью их реализации во встраиваемых системах.

5. Способ автоматического управления в реальном времени процессом холодной сушки рыбного сырья и технические решения для его реализации, которые являются основанием для разработки адаптивных переменных режимов обезвоживания.

Научные положения соответствуют 4, 5, 6, 11 и 12 областям исследований паспорта специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Основные результаты работы представлены и обсуждены на ежегодных научно-практических конференциях. Отдельные этапы работ были выполнены в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы «Исследование, разработка и модернизация систем автоматического управления технологическими и производственными процессами» и проекта № 22-26-20116 «Создание ресурсо-энергосберегающих технологий конвективной тепловой обработки водных биоресурсов Северного бассейна» при поддержке Российского научного фонда и гранта Министерства образования и науки

Мурманской области по направлению «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами».

### **Личный вклад автора**

Результаты теоретических и экспериментальных исследований получены в 2013-2023 гг. лично автором и при его непосредственном участии. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 28 работ. В том числе 4 работы в российских научных периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 2 работы, индексируемых в базе данных Scopus, получено 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и 1 патент РФ на полезную модель. Имеются акты о внедрении результатов работы в учебный процесс и производство.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения и трех глав, включающих обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы, существующих решений в области консервирования гидробионтов методом сушки, автоматизации данного процесса, результаты собственных исследований, заключение, список литературы и приложений. Основной текст работы изложен на 195 страницах компьютерного текста, содержит 13 таблиц и 111 рисунков. Список литературных источников включает 130 наименований, в том числе 47 – иностранных авторов.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту

**В первой главе** проведен анализ современного состояния промышленности в области обезвоживания гидробионтов. Проведен аналитический обзор литературы и патентный поиск, охватывающий российских и зарубежных исследователей. Рассмотрены основные сведения о процессе холодной сушки. Рассмотрены направления совершенствования процесса обезвоживания. Проведен анализ современных технологий применяемых в промышленности. Основным направлением совершенствования процесса обезвоживания является повышение энергоэффективности за счет адаптивных алгоритмов управления и разработки режимов с использованием цифровых двойников. Рассмотрены современные типовые системы управления сушильными установками и цифровые промышленные технологии, применяемые при автоматизации и цифровизации систем управления пищевыми технологическими процессами. Рассмотрено современное оборудование

отечественного производства для построения систем управления процессом конвективного обезвоживания.

**Во второй главе** приведена программно-целевая модель исследований, представленная на рисунке 1. Объектом исследований в работе является технологический процесс холодной сушки рыбы, а предметом - оптимальное автоматическое управление процессом холодной сушки гидробионтов в промышленных установках с применением современных технологий.

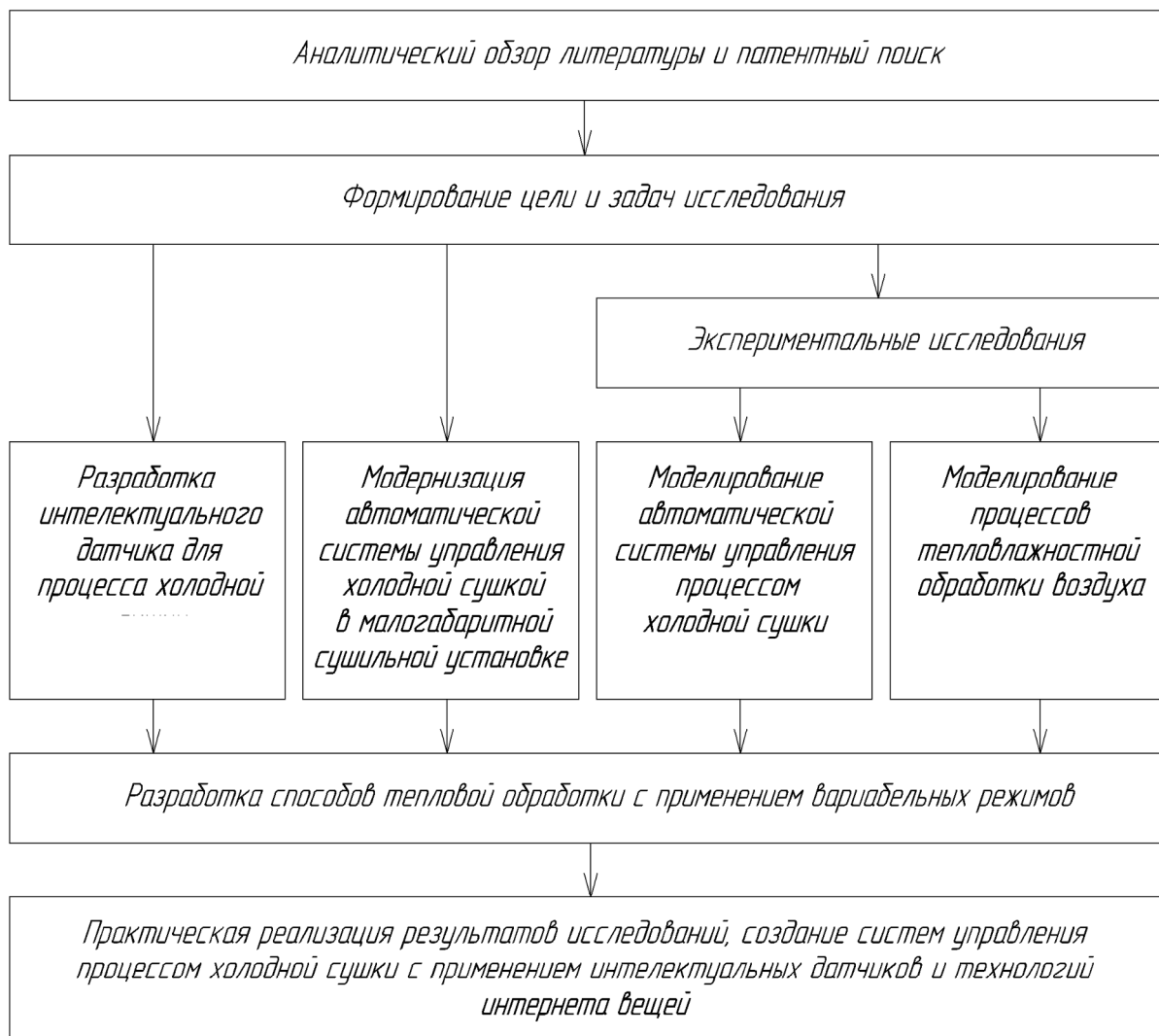


Рисунок 1 – Программно-целевая модель исследований

Проведен обзор существующей системы для исследования режимов сушки сырья УПОР-М и выявлены следующие недостатки:

- невозможность обеспечить повторяемость экспериментов для исследований из-за флуктуаций влажности цехового воздуха и отсутствия, необходимых для стабилизации параметров регулирующих органов;
- невозможность задания в существующей системе тепловлажностного режима внутри секции из-за отсутствия контура поддержания влажности;
- невозможность задания режимов с плавным изменением задания;
- отсутствие удобного интерфейса взаимодействия с установкой и доступа к нему;
- отсутствие возможности контроля массы продукта;

– использование для организации системы управления устаревших технологий, интерфейсов и протоколов.

В главе рассматриваются вопросы модернизации и дооснащения малогабаритной сушильной установки УПОР-М датчиками, исполнительными механизмами и регулирующими органами, на основе которых возможна реализация программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов, реализующего предлагаемые направления совершенствования процесса холодной сушки.

Для обеспечения регулирования температуры и влажности сушильного агента в сторону повышения, предлагаются регулирующие органы, представленные на рисунке 2.



Рисунок 2 – Нагревательный элемент канального типа а), генератор тумана б)

Регулирование температуры и влажности в сторону понижения предлагается осуществлять путем замещения объема воздуха изменением частоты вращения вытяжных вентиляторов. Сушильный агент, подаваемый в сушильные секции, предварительно предлагается подготавливать.

В качестве рабочего объема подготовки сушильного агента с минимальной температурой и влажностью изготовлена отдельная секция. Внешний вид секции подготовки сушильного агента представлен на рисунке 3а. В состав секции входит осушитель, нагреватель, вентиляторы притока и вытяжки, а также датчик температуры и влажности ПВТ100.

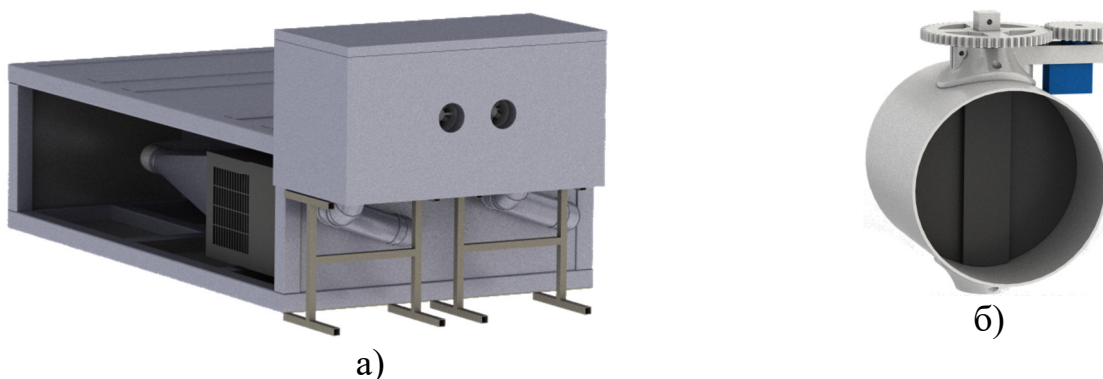


Рисунок 3 – Секция подготовки сушильного агента а), автоматическая заслонка круглого сечения б).



Для обеспечения регулирования подаваемого (или удаляемого) объема воздуха реализована автоматическая заслонка круглого сечения, представленная на рисунке 3б.

В рамках данной работы для организации взаимодействия между собой датчиков и исполнительных механизмов в программно-аппаратном комплексе предлагается использовать промышленный протокол передачи данных Message Queue Telemetry Transport (MQTT).

В главе проводится обзор форматов обмена данными при использовании MQTT, рассматриваются их достоинства и недостатки. Предлагается использование собственного двоичного формата BSON Transmission Format (BTF) передачи данных по протоколу MQTT. Формат представляет собой простую структуру и содержит заголовок, блок свойств, длину блока данных, блок данных и контрольную сумму. На рисунке 4а приведена структура формата передачи данных BTF.

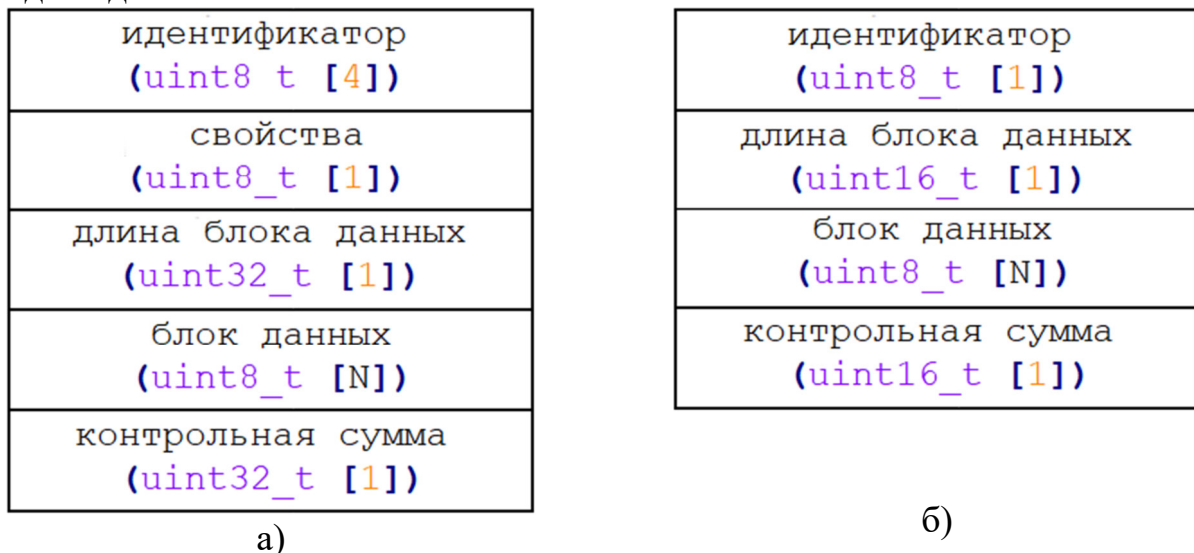


Рисунок 4 – Структура предлагаемого бинарного формата передачи данных а), структура пакета для передачи данных по частям б).

В качестве двоичного формата преобразования динамических структур данных в последовательность байтов (сериализацию) выбран BSON. Проведено сравнение предлагаемого формата без сжатия и с применением сжатия данных. В результате кодирования BSON-объекта в формате BTF размер данных без сжатия составил 138 байт, а с применением сжатия 120 байт, что на 13 % меньше.

Во встраиваемых системах на размер передаваемых данных накладывается ограничение, а данные в формате BTF могут теоретически достигать 250 Мбайт (ограничение протокола MQTT) в связи с этим реализован новый способ передачи данных по частям. Данный способ позволяет производить обмен пакетами данных, максимальная длина которых уникальна для конкретного устройства и не превышает 250 Мбайт. Пакет данных состоит из идентификатора, который может принимать три значения: начало передачи, часть или конец передачи, длины блока данных, собственно байтов данных и контрольной суммы. Структура такого пакета представлена на рисунке 4б.

Поскольку оконечные устройства в рамках разрабатываемой системы должны управляться и обмениваться информацией по протоколу MQTT в формате ВТФ, разработано устройство, предназначенное для преобразования и передачи данных с различных протоколов и интерфейсов в протокол MQTT и формат ВТФ. Структурная схема информационного шлюза представлена на рисунке 5.

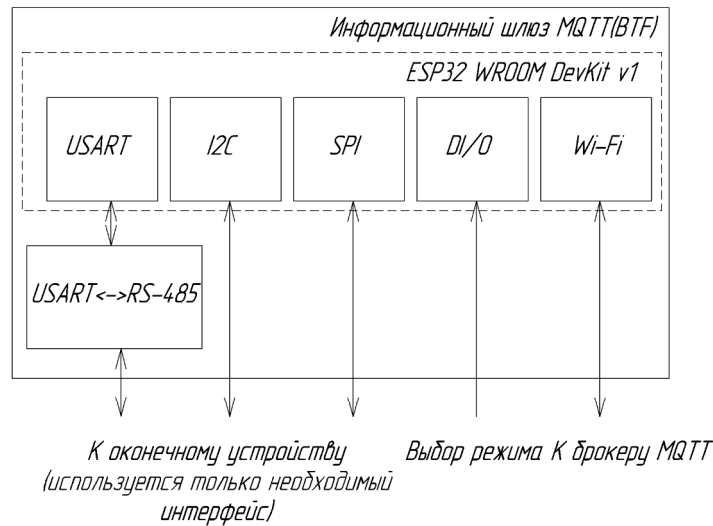


Рисунок 5 – Структура информационного шлюза

Устройство является одновременно издателем и подписчиком. Относительно базового канала, типа устройства и идентификатора устройства, формируется структура каналов позволяющая организовать взаимодействие с устройством согласно выбранному шаблону. В текущей реализации осуществлена поддержка 6 шаблонов модулей входящих в состав программно-аппаратного комплекса.

Приведено описание разработки оконечных устройств в рамках модернизации программно-аппаратного комплекса. Среди них выделяются подсистемы: массоизмерительная и тепловизионного контроля поверхности продукта. Для всех устройств приводится система команд для взаимодействия с ними.

Для системы управления процессом, использующей современный протокол MQTT, разработанный формат ВТФ и аналитику с применением технического зрения, реализовано соответствующее программно-аппаратное решение (рисунке 6).

Для реализации человеко-машинного интерфейса предлагается использовать библиотеку визуальных компонентов ImGui. В рамках работы разработан драйвер для ImGui, который использует протокол WebSocket для отображения интерфейса в web-браузерах и взаимодействия с ним. Такое решение позволяет использовать один код интерфейса для отображения на локальном TFT экране или удаленном web-сеансе.

Для взаимодействия пользователя с программно-аппаратным комплексом на базе ImGui реализован графический пользовательский интерфейс.

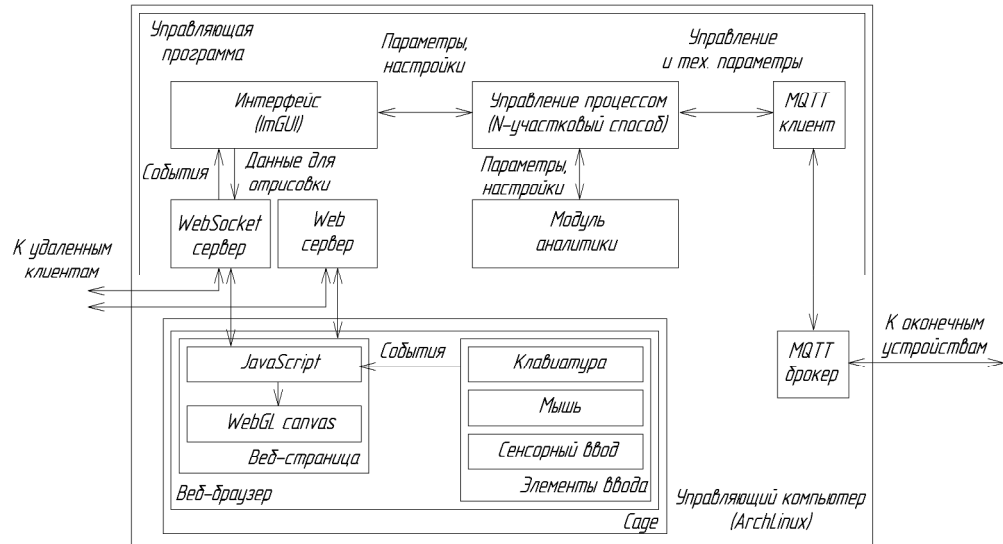


Рисунок 6 – Структурная схема программно-аппаратного решения

Секция сушильной установки с точки зрения управления представляет собой многосвязный объект. Так как на всем диапазоне возможных параметров режима холодной сушки температура не оказывает влияние на влагосодержание, в данной работе предлагается перейти от управления по температуре и относительной влажности к управлению по температуре и влагосодержанию. Прирост влаги в секции осуществляется только за счет удаляемой влаги из продукта и из внешних источников, в роли которых выступает генератор тумана. Прирост влаги адиабатическим способом снижает температуру, что является возмущающим воздействием для контура температуры. Структурная схема предлагаемой системы автоматического управления конвективным обезвоживанием представлена на рисунке 7.

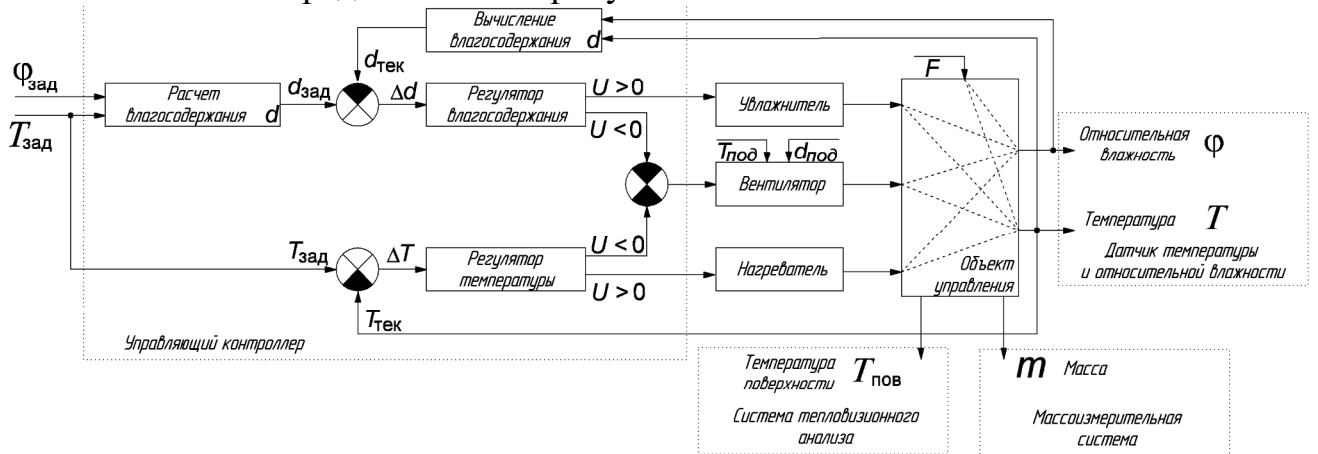


Рисунок 7 – Структурная схема системы автоматического управления процессом обезвоживания рыбного сырья

**Третья глава** посвящена результатам исследований, получению моделей, разработке и подтверждению предлагаемых решений.

Приводится математическое описание основных операций обработки влажного воздуха: нагрев, охлаждение, осушение, увлажнение и смешивание двух потоков. Проводится анализ результатов экспериментов по увлажнению и нагреву. В результате экспериментов подтверждается более слабая зависимость влагосодержания от изменения температуры при нагреве, чем относительной

влажности от температуры. Использование данной закономерности для реализации системы управления технологическим процессом обезвоживания сырья по температуре и влагосодержанию позволяет избежать сильной взаимосвязанности контуров управления.

Описана теоретическая модель секции сушки как объекта управления. С учетом этой модели создается экспериментальная модель и проводится сравнение переходных процессов двух моделей в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 8. Максимальное отклонение значений модели от экспериментальных данных не превышает 5% по температуре и 10% по влагосодержанию.

По аналогичной методике получены модели изменения состояния сушильного агента при прохождении через теплообменные аппараты, на основании которых построены функциональные блоки для численного моделирования тепловлажностных процессов.

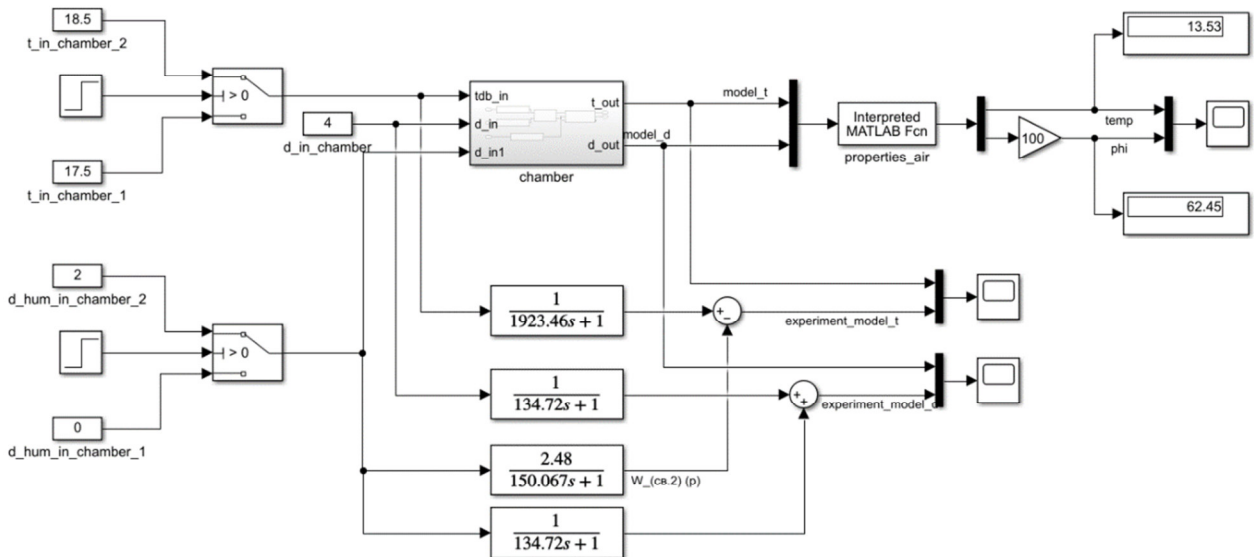


Рисунок 8 – Структурная схема сравнения переходных процессов, полученных с применением теоретической и экспериментальной модели

Описано моделирование системы автоматического управления. Структурная схема при моделировании процесса представлена на рисунке 9. Максимальное отклонение значений моделирования от эксперимента не превышает 10% по температуре и 10% по влагосодержанию.

Проведена оценка эффективности работы регулятора при изменении параметров модели по интегральной оценке  $J$  рассчитываемой как интеграл суммы квадрата от рассогласования и квадрата от управления. При изменении параметров модели в пределах 20%, также до 20% изменяется качество управления процессом с помощью ПИД-регулятора. Предложены варианты улучшения качества управления: применение МРС-регуляторов и ПИД-регуляторов с нечеткой коррекцией коэффициентов.

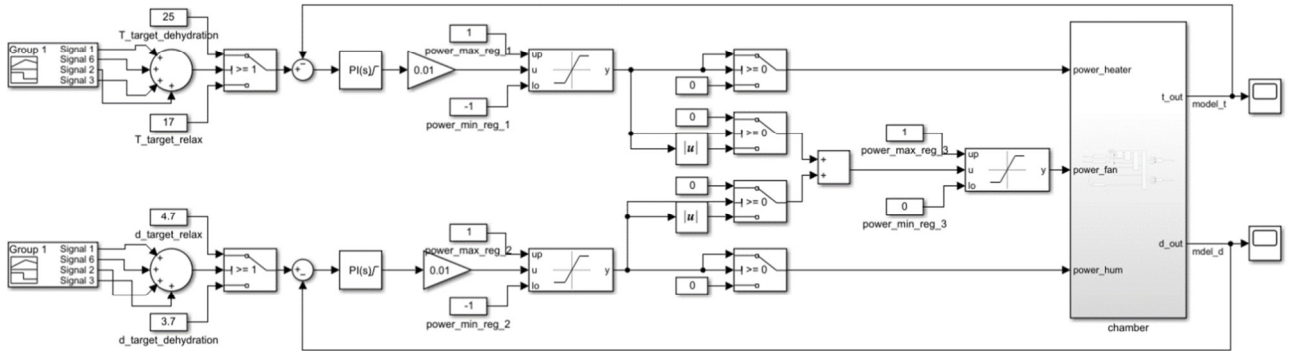
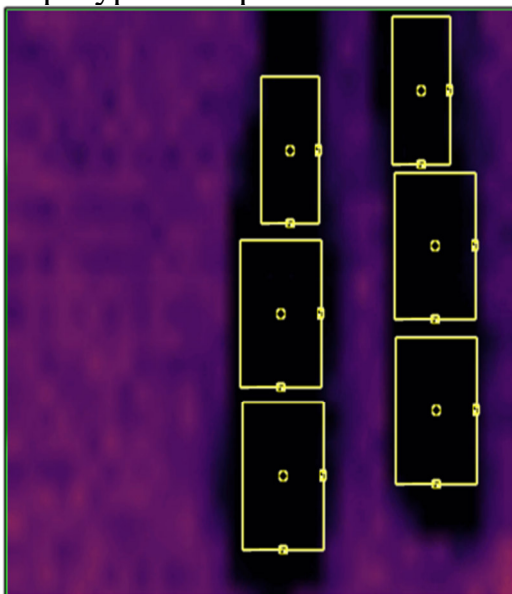


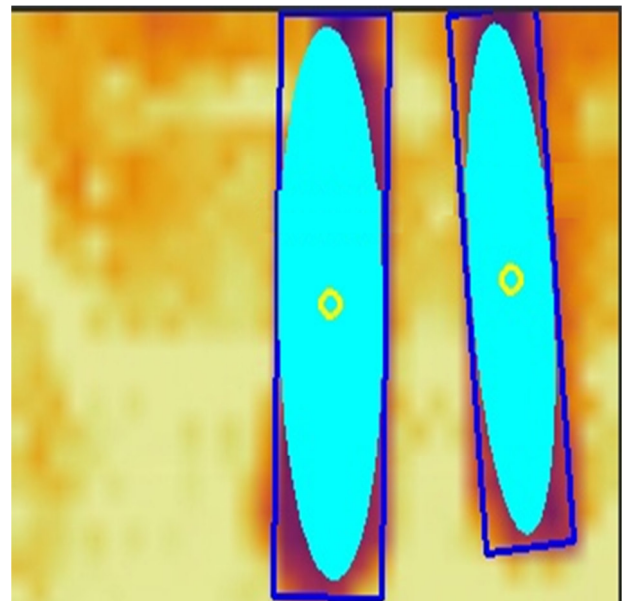
Рисунок 9 – Структурная схема при моделировании процесса холодной сушки гидробионтов по температуре и влагосодержанию

Температура поверхности сырья является важной кинетической характеристикой, поскольку для каждого исследуемого продукта существует определенная максимальная температура нагрева. Превышение предела по температуре поверхности может привести к ухудшению качества готовой продукции. Для определения изменения динамики температуры всего исследуемого объекта в работе реализована система технического зрения. Предложен способ калибровки и получения совмещенного изображения. Рассмотрены два варианта задания зон контроля поверхности продукта, представленные на рисунке 10. Для улучшения качества определения температуры поверхности продукта предлагается применение нейронных сетей.

Рассмотрены результаты исследования по передаче видеопотока в формате VTF без разбиения на части и по частям. Сделан вывод о том, что передача данных в формате VTF по частям не снижает скоростные характеристики и данный формат может быть использован во встраиваемых системах. На базе данного формата и способа его передачи реализована система контроля температуры поверхности.



а)



б)

Рисунок 10 – Методы контроля температуры поверхности

В работе предлагается объединить трехмерные модели технологических аппаратов и их численные модели в единое целое. Такое объединение осуществлено на базе программной платформы 3D-визуализации в реальном времени Godot и предлагаемых программных решений (рисунок 11), в виде компьютерной модели, которая в дальнейшем может быть доработана до цифрового двойника, при наличии модели продукта.

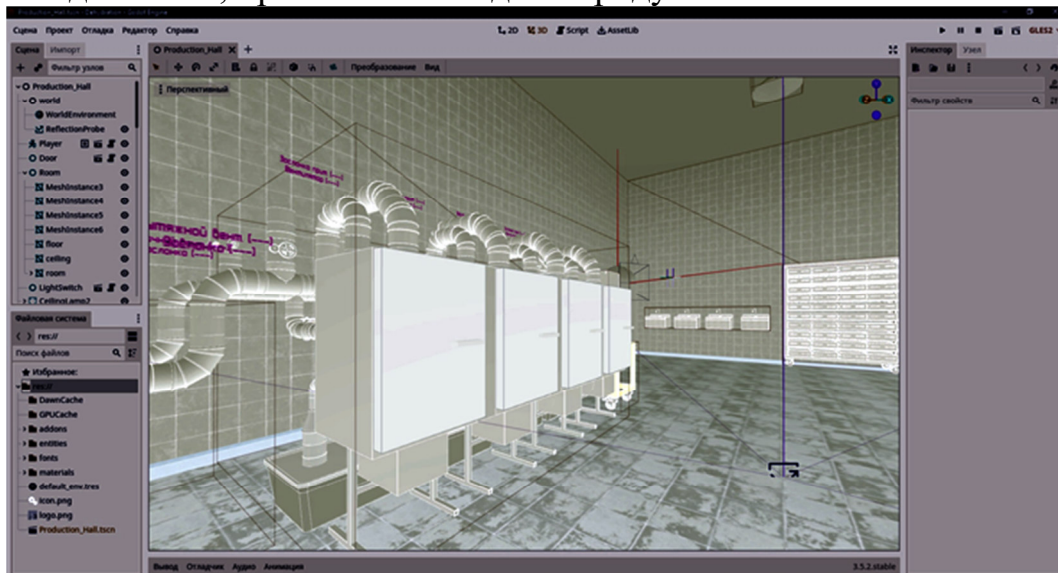


Рисунок 11 – Компьютерная модель на базе программной платформы 3D-визуализации в реальном времени Godot

Предложен N-участковый переменный способ обезвоживания. В данном способе используются режимы непосредственной сушки сырья с комбинацией режимов обеспечивающих перераспределение влаги внутри продукта - режимы «отлежки» (релаксации). Активное использование данного способа целесообразно после завершения периода постоянной скорости сушки. Переход от линейной зависимости скорости сушки к падающей скорости фиксируется САУ на основании данных поступающих от подсистемы контроля массы сырья. При осуществлении данного способа длительность всего процесса обезвоживания разбивается на N участков, со своими параметрами для режимов обезвоживания и релаксации. Каждый участок разбивается на интервалы. Каждый отдельно взятый интервал состоит из периода сушки и периода «отлежки». Параметры режимов обезвоживания (температура, влагосодержание теплоносителя) задаются с учетом технологических особенностей обрабатываемого сырья. При задании параметров релаксации обеспечиваются условия, снижающие внешний массообмен (уменьшение температуры, повышение влагосодержания теплоносителя) и приводящие к перераспределению влаги внутри объекта. В этих условиях влага из внутренних слоев рыбы стремится к более обезвоженным поверхностным слоям. Отношение продолжительности «отлежки» рыбы к общей продолжительности периода линейно увеличивается в течение рассматриваемого участка времени.

Описаны эксперименты с применением предлагаемого N-участкового переменного способа обезвоживания. В результате экспериментов сделан

вывод об экономии энергии на процесс при использовании предлагаемого способа обезвоживания до 10%.

В рамках проведенных экспериментов производилась оценка температуры поверхности рыбного сырья. В процессе обработки результатов экспериментов подтверждена гипотеза о зависимости температуры поверхности рыбы от скорости удаления влаги и потери массы. На рисунке 12 представлен график изменения температуры поверхности рыбы в процессе сушки.

Для этапа непосредственного обезвоживания подобран полином методом наименьших квадратов, описывающий зависимость температуры поверхности сырья от времени процесса для данного эксперимента:

$$T_{\text{тек}} = -0,0000000027 \cdot t^2 + 0,0002617201 \cdot t + 17,4417040341 \quad (1)$$

где  $t$  – время процесса обезвоживания (сек.);

$T_{\text{тек}}$  – текущая температура поверхности сырья ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Формула (1) адаптирована для описания графика потери массы рыбного сырья (рисунок 13) и выглядит следующим образом:

$$M_{\text{тек}} = (k \cdot (T_{\text{кон}} - T_{\text{тек}}) + M_{\text{кон}}) \cdot 1,06, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности ( $\frac{\text{г}}{^{\circ}\text{C}}$ );

$M_{\text{тек}}$  – масса сырья текущая (г);

$M_{\text{нач}}$  – масса сырья начальная (г);

$M_{\text{кон}}$  – масса сырья конечная (г);

$T_{\text{тек}}$  – температура поверхности сырья текущая ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{\text{кон}}$  – температура поверхности сырья конечная ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{\text{нач}}$  – температура поверхности сырья начальная ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$k = \frac{M_{\text{нач}} - M_{\text{кон}}}{T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}}. \quad (3)$$

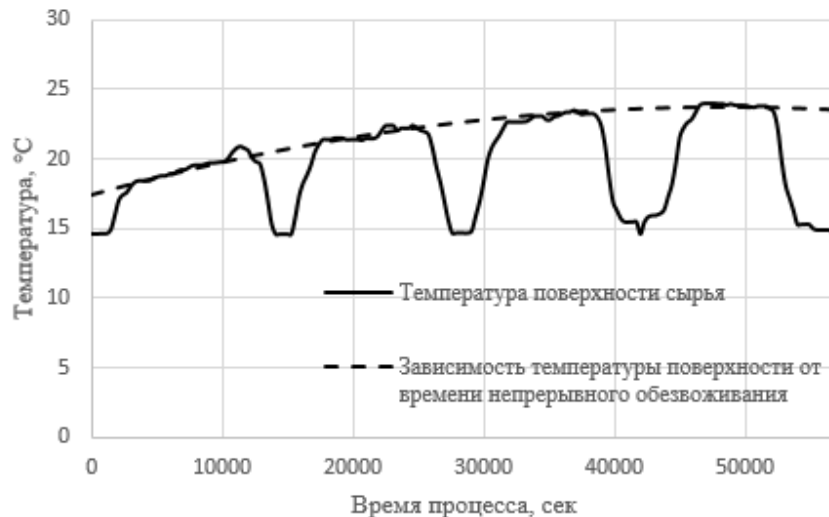


Рисунок 12 – Температура поверхности рыбного сырья

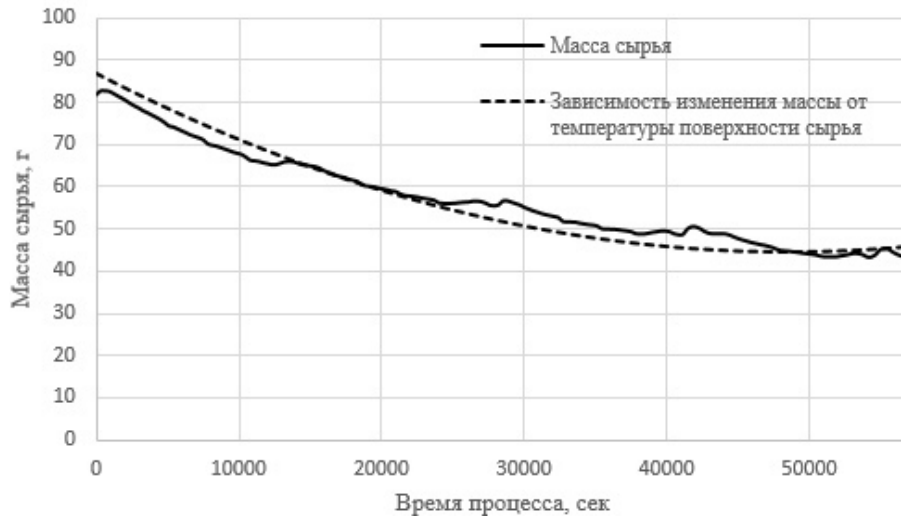


Рисунок 13 – График изменения массы рыбного сыра

Отклонение значений, полученных по расчетной формуле от экспериментальных данных изменения массы, не превышает 5%. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что измерение температуры поверхности рыбного сыра в процессе обезвоживания позволяет оценить скорость удаления влаги и потерю массы сыра. Контроль этих параметров позволит адаптировать многоконтурные системы автоматического управления на ускорение процесса обезвоживания и снижение энергопотребления. Добавление модуля аналитики позволит реализовать адаптивный N-участковый способ, при котором осуществляется корректировка длительности и параметров периодов сушки и релаксации. Структурная схема предполагаемой системы представлена на рисунке 14.

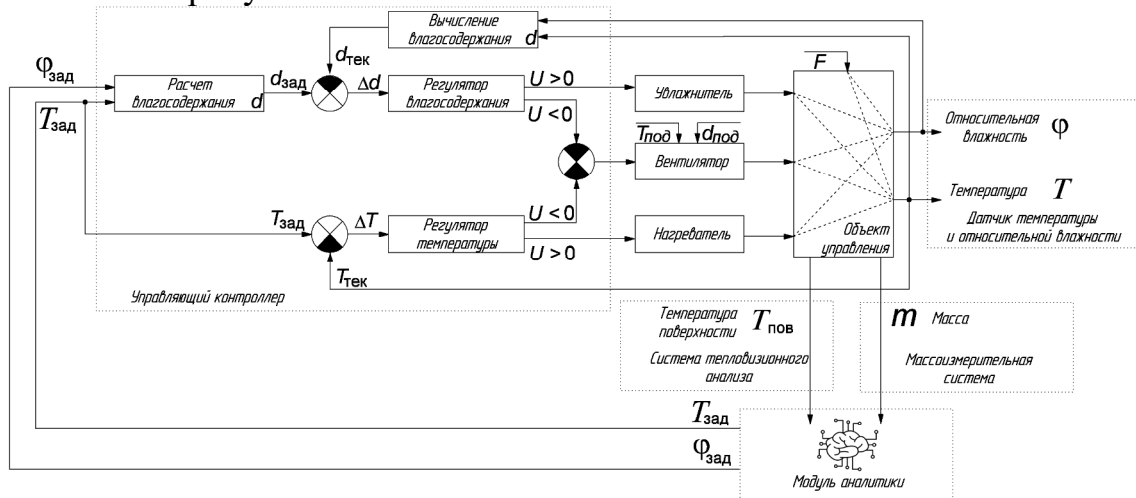


Рисунок 14 – Структурная схема системы с применением модуля аналитики

**В заключении** подведены итоги диссертационного исследования, изложены его основные выводы и обобщающие результаты.

Автор выражает благодарность за помощь в подготовке работы заведующему кафедрой АиВТ МАУ, доктору технических наук, доценту А. В. Кайчену; доценту, кандидату технических наук, профессору А. А. Маслову; доценту кафедры АиВТ МАУ, кандидату технических наук В. В. Яценко; доценту кафедры АиВТ МАУ, кандидату технических наук А. Ю. Вискову; доценту кафедры АиВТ МАУ, кандидату технических наук И. Ю. Селякову;



ассистенту кафедры АиВТ МАУ С. А. Лукину; ассистенту кафедры АиВТ МАУ Н. С. Потапову; доценту кафедры ТПП МАУ, кандидату технических наук М. А. Ершову; заведующему кафедрой ЭОС МАУ, доктору технических наук, профессору А. Б. Власову; заведующему лабораторией кафедры ЭОС МАУ В. В. Ерещенко.

### **Выводы**

1. Разработан и предложен способ автоматического управления процессом холодной сушки гидробионтов. В результате проведенных экспериментов и обработки полученных данных, установлено, что управление процессом обезвоживания рыбного сырья при регулировании температуры и влагосодержания сушильного агента обеспечивает выполнение заданного режима сушки и не требует дополнительного развязывания контуров температуры и относительной влажности. Предложены два варианта систем автоматического регулирования позволяющие добиться процесса обезвоживания рыбы с определённой энергоэффективностью технологического процесса. Первый, в котором объектом управления является температурно-влажностное поле. Второй, в котором объектом управления является температура поверхности продукта.

2. Проведено цифровое моделирование тепловых и влажностных процессов при обезвоживании рыбного сырья. Предложены математические модели, которые позволяют провести синтез регуляторов и получить оптимальные по качеству управления настройки системы, а также разработать алгоритмы управления программно-аппаратного комплекса.

3. Разработан интеллектуальный датчик для процесса холодной сушки. В его основе массоизмерительная система, которая позволяет фиксировать начальную массу продукта и отслеживать динамику изменения массы в течение технологического процесса и устройство непрерывного контроля температуры поверхности сырья с использованием тепловизионного анализа и технического зрения. Предложены методы получения совмещенного изображения и определения температуры поверхности продукта. Каналы контроля по массе сырья, температуре поверхности рыбы посредством тепловизионного контроля в совокупности с видеомониторингом состояния рыбы позволят в дальнейшем повысить динамическую точность, оптимизировать энергетические и временные затраты на управление за счет разработки адаптивных режимов.

4. Проведена модернизация системы автоматического управления малогабаритной сушильной установки. Предложен формат передачи динамических структур данных, обеспечивающий сжатие больших объёмов данных и минимизирующий время на интерпретацию данных в процессе десериализации. Предложена реализация информационного шлюза, позволяющего создать систему управления на базе предлагаемой структуры каналов и формата ВТФ. Предложена программно-аппаратная реализация уровня управления процессом и человеко-машинный интерфейс на базе графической библиотеки ImGUI и web-технологий. Созданы предпосылки для создания цифрового двойника сушильной установки холодной сушки гидробионтов.

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в изданиях, рецензируемых в международных базах данных (Scopus и WOS):**

1. Optimization of mass-transfer processes of fish convective dehydration / M. A. Ershov, I. Y. Selyakov, **V. V. Ereshchenko**, A. M. Ershov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" 18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, 18–19 марта 2020 года. Vol. 539. – Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012190. – DOI 10.1088/1755-1315/539/1/012190.
2. Vlasov, A. Development of a continuous thermal control device for highvoltage equipment / A. Vlasov, **V. Ereshchenko**, T. Volkova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" 18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia, Saint-Petersburg, 18–19 марта 2020 года. Vol. 539. – Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012135. – DOI 10.1088/1755-1315/539/1/012135.

**Публикации в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ:**

3. Математическое моделирование тепловых и влажностных процессов в камере обезвоживания пищевых продуктов / А. В. Кайченoв, **В. В. Ерещенко**, В. В. Яценко, И. Г. Благовещенский // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 4(16). – С. 76-87. – DOI 10.46573/2658-5030-2022-4-76-87.
4. Многоконтурная система управления процессом конвективного обезвоживания рыбного сырья / А. В. Кайченoв, **В. В. Ерещенко**, В. В. Яценко, И. Ю. Селяков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 254-262. – DOI 10.17277/vestnik.2023.02.pp.254-262.
5. Применение моделирования режимов тепловой стерилизации для улучшения показателей качества консервной продукции / А. В. Столянов, А. В. Кайченoв, А. А. Маслов, **В. В. Ерещенко** [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 110-116.
6. Программно-аппаратный комплекс для автоматического управления процессом подготовки сушильного агента с заданными параметрами температуры и влажности / А. В. Кайченoв, **В. В. Ерещенко**, В. В. Яценко, И. Г. Благовещенский // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 1(17). – С. 41-53. – DOI 10.46573/2658-5030-2023-1-41-53.

**В прочих изданиях:**

7. Разработка систем автоматизации технологических процессов переработки водных биологических ресурсов Арктики на основе интеллектуальных технологий / А. В. Кайченoв, **В. В. Ерещенко**, И. Г. Благовещенский [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. 138-141.
8. Столянов, А. В. Компьютерное моделирование как перспективное направление оптимизации процесса тепловой стерилизации консервной продукции. Обзор существующих решений / А. В. Столянов, А. А. Жук, **В. В. Ерещенко** // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 24–27 марта 2015 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2015. – С. 59-63.
9. Модернизация малогабаритной установки для поиска оптимальных технологических режимов сушки сырья / **В. В. Ерещенко**, И. Ю. Селяков, А. А. Маслов [и др.] // Техника и технологии: пути инновационного развития : сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 30 июня 2014 года / Ответственный редактор: А.А. Горохов. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2014. – С. 110-114.
10. **Ерещенко, В. В.** Модернизация малогабаритной установки для поиска оптимальных технологических режимов сушки сырья. Разработка плат управления исполнительными механизмами и сбора данных с интерфейсом RS-232 и поддержкой протокола MODBUS RTU / В. В. Ерещенко, А. А. Жук // Наука - производству : Материалы международной научно-

практической конференции, Мурманск, 24–27 марта 2015 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2015. – С. 21-26.

11. Обзор методов многоцелевой оптимизации термической обработки продуктов / А. В. Столянов, А. В. Кайченев, А. А. Маслов, **В. В. Ерещенко**, [и др.] // Техника и технологии: пути инновационного развития : сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 30 июня 2014 года / Ответственный редактор: А.А. Горохов. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2014. – С. 233-238.

12. Власов, А. Б. Разработка автономного извещателя контроля состояния высоковольтных систем судов на основе тепловизионной диагностики / А. Б. Власов, **В. В. Ерещенко** // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 18–20 апреля 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2018. – С. 9-11.

13. Разработка и исследование возможностей программно-аппаратного комплекса измерения температуры и влажности модельного объекта "Опытный" / **В. В. Ерещенко**, А. В. Кайченев, В. В. Яценко [и др.] // Наука и образование - 2020 : материалы всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 01 декабря 2020 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2021. – С. 12-17.

14. **Ерещенко, В. В.** Разработка исполнительных элементов воздухосмешивающей системы для программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 14–19 апреля 2017 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2017. – С. 29-33.

15. Разработка климатической камеры для малогабаритной сушильной установки УПОР-М / **В. В. Ерещенко**, А. В. Столянов, М. А. Ершов, А. А. Жук // Наука - производству : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 22–25 марта 2016 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2016. – С. 43-47.

16. Разработка системы автоматического взвешивания на базе сигма-дельта АЦП НХ711 и микроконтроллера PIC16F876A / **В. В. Ерещенко**, И. Ю. Селяков, А. А. Маслов [и др.] // Развитие науки и образования в современном мире : Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 7 частях, Москва, 30 сентября 2014 года / ООО "АР-Консалт". – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "АР-Консалт", 2014. – С. 107-112.

17. Разработка системы кондиционирования воздуха в составе установки по поиску режимов обезвоживания рыбы / Н. А. Ионов, **В. В. Ерещенко**, А. А. Маслов, М. А. Ершов // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств : Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 25 апреля 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2018. – С. 238-243.

18. Ионов, Н. А. Разработка системы подготовки воздуха для установки поиска режимов сушки пищевого сырья / Н. А. Ионов, **В. В. Ерещенко** // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств : МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, в 2х частях, Мурманск, 07 апреля 2017 года / Мурманский государственный технический университет. Том 2. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2017. – С. 133-137.

19. Власов, А. Б. Разработка устройства непрерывного ИК-контроля электрического оборудования на судах / А. Б. Власов, **В. В. Ерещенко**, В. В. Ерещенко // Наука и образование - 2018 : Материалы всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 15 ноября 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2019. – С. 292-298.

20. **Ерещенко, В. В.** Система управления на базе мобильного устройства под управлением операционной системы Android / В. В. Ерещенко, В. В. Яценко // Наука - производству :

Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 18–20 апреля 2018 года. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2018. – С. 35-40.

***Патенты, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:***

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614710 Российская Федерация. Программа для платы управления поворотным механизмом системы тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок : № 2019613548 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / **В. В. Ерещенко**, В. В. Ерещенко, А. Б. Власов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»).

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614708 Российская Федерация. Программа расчета степени открытия заслонок для процесса смешения воздуха : № 2019613544 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / **В. В. Ерещенко**, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»).

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614754 Российская Федерация. Программа управления для платы сбора данных : № 2019613527 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 11.04.2019 / **В. В. Ерещенко**, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»).

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614760 Российская Федерация. Программа управления для платы управления включением и выключением холодильной машины : № 2019613496 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 11.04.2019 / **В. В. Ерещенко**, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»).

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614709 Российская Федерация. Программа управления для программно-аппаратного комплекса поиска оптимальных режимов холодной сушки гидробионтов : № 2019613546 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / **В. В. Ерещенко**, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»).

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614706 Российская Федерация. Программа управления для программно-аппаратного комплекса тепловизионного контроля состояния электрооборудования и обследования электроустановок : № 2019613541 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / **В. В. Ерещенко**, В. В. Ерещенко, А. Б. Власов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»).

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614707 Российская Федерация. Программа управления системой воздухосмешения по беспроводному интерфейсу WI FI : № 2019613543 : заявл. 02.04.2019 : опубл. 10.04.2019 / **В. В. Ерещенко**, В. В. Яценко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МГТУ»).

28. Патент на полезную модель № 196894 U1 Российская Федерация, МПК G01J 5/00. Устройство для непрерывного контроля теплового состояния электрического оборудования : № 2019133421 : заявл. 21.10.2019 : опубл. 19.03.2020 / А. Б. Власов, В. В. **Ерещенко**, В. В. Ерещенко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Мурманский государственный технический университет" (ФГБОУ ВО "МГТУ").