



СТОЛЯНОВ АЛЕКСАНДР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРОЦЕССОВ СТЕРИЛИЗАЦИИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

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 «Мурманский арктический университет» (ФГАОУ ВО «МАУ»).

Научный руководитель: **Кайченов Александр Вячеславович**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики и вычислительной техники ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»

Официальные оппоненты: Первый оппонент
Ахремчик Олег Леонидович
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов»

Второй оппонент
Холопов Владимир Анатольевич
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет», заместитель директора Института искусственного интеллекта, заведующий кафедрой промышленной информатики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»

Защита состоится 28 сентября 2023 г. в 12 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. ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ»

Автореферат разослан « 26 » 08 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.

Одной из целей Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года является цифровая трансформация с учетом текущих внешнеполитических и экономических рисков, а ключевым ориентиром развития – «внедрение новых решений, позволяющих оптимизировать производственные процессы».

В недавнем прошлом режимы термической обработки продуктов были такими, чтобы на любом автоклаве получить промышленную стерильность готовой продукции. Из-за недостаточной точности аппаратного и программного обеспечения консервного оборудования было важно обеспечить микробиологическую безопасность и здоровье конечного потребителя. Также не учитывались энергетические, временные и материальные затраты необходимые для производства, так как результат оценивался только по одному параметру – количеству готовой продукции, произведенной в установленные сроки. Однако развитие техники не стоит на месте и, в настоящее время, продолжительности этапов режима термической обработки продуктов можно задавать с точностью до десятков секунд, что позволяет достигать заданного значения фактического стерилизующего эффекта (F-эффекта, фактической летальности) с превышением не более чем на 10 %. Поэтому непрерывное совершенствование режимов стерилизации пищевых продуктов, сочетающих сохранение микробиологической безопасности и органолептических качеств готового продукта вместе с повышением экономической эффективности процесса, не теряет актуальность для современного промышленного производства. Однако оно требует проведения большого количества повторений процесса стерилизации, а, следовательно, использования значительного количества ресурсов.

В общем случае процесс разработки режимов стерилизации пищевых продуктов состоит из шести этапов: предварительного подбора, лабораторного испытания, производственной проверки, оформления, согласования и представления на утверждение. Самым продолжительным и затратным является первый этап, поскольку продолжительность дальнейших стадий зависит от выбора ориентировочного режима стерилизации. Сокращение затрат на этапе предварительного подбора позволит сэкономить значительное количество времени и средств разработчика, что является актуальным в рамках концепции бережливого производства. Упрощение данной процедуры возможно при наличии математической модели процесса, представляющей совокупность температурных моделей стерилизационной камеры автоклава и пищевого продукта.

В настоящее время наблюдается постоянное сокращение численности разработчиков режимов стерилизации пищевых продуктов, поэтому возникает необходимость в кратчайшие сроки создать комплекс для научных исследований процессов стерилизации с целью изучения существующих и получения новых оптимальных по энергозатратам режимов стерилизации пищевых продуктов с заданной фактической летальностью.

Перечисленные выше проблемы определяют актуальность разработки и использования АСНИ процессов стерилизации пищевых продуктов на этапе

предварительного подбора, позволяющей повысить экономическую эффективность разрабатываемого режима при сохранении микробиологической безопасности и органолептических качеств готового продукта, а также осуществлять поддержку принятия решений инженером-технологом при разработке нового режима стерилизации для пищевого продукта.

Степень разработанности темы.

Проблемы разработки и научного обоснования технологий изготовления консервов исследовали Флауменбаум Б. Л., Бабарин В. П. и др.

Научно-педагогические работники кафедр автоматики и вычислительной техники и технологий пищевых производств ФГАОУ ВО «МАУ» более 10 лет проводят исследования, направленные на совершенствование стерилизации консервов. Аналогичный подход к синтезу систем управления применен в работах Выскубова Е. В., Мокрушина С. А.

Вопросы поиска критериев для оптимизации параметров режимов стерилизации консервов рассматриваются в работах таких исследователей, как Холдсворт С. Д., Тейшейра А. А., Банга Дж. Р., Эрдогду Ф. и др.

Абакаров А., Маслов А. А., Кайченев А. В., Власов А. В., Жук А. А., Бородин А. В. и др. использовали методы оптимизации процессов тепловой обработки пищевых продуктов с применением собственного программного обеспечения.

Многие ученые, в частности Абакаров А., Дюранс Т. Д., Банга Дж. Р., уделяют большое внимание тепловой обработке продуктов при переменной температуре среды стерилизационной камеры автоклава.

Исследователями Благовещенской М. М., Благовещенским И. Г., Чен С. Р. и др. было выявлено преимущество компьютерного моделирования с применением интеллектуальных технологий над традиционными методами оптимизации.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является исследование и научное обоснование разработки АСНИ для оптимизации затрат на разработку нового режима стерилизации. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Предложить способ совершенствования методики разработки режимов стерилизации на этапе предварительного подбора для промышленных автоклавов.

2. Разработать цифровой двойник автоклава.

3. Предложить новый способ управления процессом стерилизации пищевых продуктов.

4. Разработать АСНИ для процессов стерилизации пищевых продуктов и провести ее исследование.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования является процесс стерилизации пищевых продуктов по заданному режиму в промышленных автоклавах периодического действия.

Предмет исследования – оптимальный режим для управления процессом стерилизации пищевых продуктов в промышленных автоклавах периодического действия.

Методы и средства исследования.

Для проведения научных исследований процессов тепловой обработки используются лабораторный автоклав АВК-30М, промышленные автоклавы АСКАМАТ-230 и Н2-ИТА602, а также комплексы логгеров Ellab TrackSense PRO и ТЕРМОХРОН. Для поиска параметров, связанных с процессом стерилизации пищевых продуктов, применяются методы адаптивного симплекса, Брента и численного интегрирования Рунге-Кутты 4 порядка точности. В исследованиях используется ПО собственной разработки.

Научная новизна.

Предложена классификация температурных профилей греющей среды в стерилизационной камере для управления процессом стерилизации пищевых продуктов.

Предложена модернизированная экономичная методика разработки режимов стерилизации пищевых продуктов для промышленных автоклавов.

Предложен способ управления процессом стерилизации, основанный на прогнозировании фактического стерилизующего эффекта продукта.

Научно обосновано использование и разработка АСНИ для поиска оптимальных режимов стерилизации пищевых продуктов.

Практическая значимость исследования.

В рамках диссертационной работы создан программный комплекс, позволяющий повысить экономическую эффективность разрабатываемого режима тепловой обработки продуктов из гидробионтов при сохранении микробиологической безопасности и органолептических качеств готового продукта и оптимизировать рабочее время инженера-технолога при разработке нового или совершенствовании существующего режима на этапе предварительного подбора.

Получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017612613, № 2020665739, № 2021613099 и №2021613155 Российская Федерация.

Результаты научного исследования внедрены в производство на предприятиях группы компаний «ФЭСТ» (рыбопромышленный холдинг «Норебо»).

Для разработанного в рамках диссертационной работы способа управления процессом тепловой обработки консервов зарегистрирован патент на изобретение № RU2789344C1 от 01.02.2023 г.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами в части пунктов 8, 11, 12 и 18.

Основные положения, выносимые на защиту.

Предложенный цифровой двойник промышленного автоклава позволяет реализовать экономичную методику разработки режимов стерилизации пищевых продуктов.

Разработанный программный комплекс является основой для проведения компьютерного моделирования процесса стерилизации консервов и оформления теплофизических данных для утверждения режима на этапе предварительного подбора.

Предложенное программное обеспечение автоматизированной системы управления автоклава позволяет сохранять информацию в базе данных при проведении процесса стерилизации пищевых продуктов, основанного на прогнозировании фактического стерилизующего эффекта.

Разработанная АСНИ применима для поиска режимов стерилизации пищевых продуктов как инструмент поддержки принятия решений.

Личный вклад автора.

Представленные результаты диссертационной работы являются итогом многолетних исследований, проведённых в 2014-2023 гг. лично автором и при его непосредственном участии.

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.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на всероссийских и международных научно-технических и научно-практических конференциях различного уровня.

Разработка и исследование программного комплекса выполнены в рамках НИР «Исследование, разработка и совершенствование систем управления технологическими процессами» (ГР № 1.28/18).

Использование составляющих АСНИ позволило получить на этапе предварительного подбора оптимальные по фактическому стерилизующему эффекту режимы стерилизации консервов в банке №3 для промышленного автоклава, о чем имеются соответствующие акты о внедрении.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 5 работ в российских рецензируемых научных периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 5 работ, индексируемых в международной базе данных Scopus, получены 4 авторских свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы (106 источников, из которых 34 на иностранных языках) и 4 приложений. Работа изложена на 148 страницах, содержит 75 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ представлены основные сведения о процессе тепловой обработки, проведен аналитический обзор состояния и тенденций научных исследований в области процессов стерилизации пищевых продуктов и

критический анализ литературы, описаны объекты, методы и средства, необходимые для проведения работы, а также представлена программно-целевая модель исследований (рисунок 1).

В результате анализа выявлено, что большинство производственных предприятий по-прежнему применяют традиционные режимы стерилизации по причине высоких временных и материальных затрат на проведение разработки новых режимов тепловой обработки пищевых продуктов.



Рисунок 1– Программно-целевая модель исследований

На сегодняшний день одним из рациональных способов поиска оптимальных температурно-временных режимов стерилизации пищевых продуктов, снижающих энергозатраты и продолжительность проведения процесса, является их численное моделирование.

Проанализировав научные исследования, можно сделать вывод о наличии большого количества наработок, связанных с процессом стерилизации пищевых продуктов для промышленных автоклавов. Все это предопределяет актуальность разработки автоматизированной системы научных исследований для процессов стерилизации пищевых продуктов в рамках комплексной автоматизации научных исследований.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ описано исследование параметров процессов стерилизации пищевых продуктов.

Математическое моделирование этапов нагрева и охлаждения режимов стерилизации продуктов проведено с помощью программы PRSC.

Для этапа нагрева независимо варьировались начальная температура продукта и греющей среды стерилизационной камеры и продолжительность процесса нагрева автоклава в минутах. Полученные результаты показывают, что отклонение конечного значения фактического стерилизующего эффекта для процессов с различными начальными температурами продукта и греющей среды составляет не более 2 %. Изменение продолжительности этапа напрямую влияет на конечное значение F-эффекта процесса. Процесс нагрева желательно осуществлять как можно быстрее для сокращения суммарного времени процесса стерилизации продукта и увеличения скорости прогрева продукта.

В результате статистического анализа проведенных реальных процессов стерилизации было получено, что среднее приращение значения F-эффекта за время процесса охлаждения составляет 18 %. При проведении процессов в автоклавах АВК-30М и АСКАМАТ-230 влияние этапа охлаждения на значение F-эффекта составляет 24 % и 17 % соответственно.

Влияние профиля изменения температуры греющей среды автоклава на этапе охлаждения процесса на конечный F-эффект составляет в среднем 16-41 %.

Продолжительность реального процесса охлаждения полностью зависит от возможностей выбранной модели автоклава по скорости остывания греющей среды стерилизационной камеры.

Проведен расчет энергозатрат для процесса стерилизации пищевых продуктов. Выявлено, что процесс нагрева автоклава является самым энергозатратным этапом. На этапе стерилизации можно сэкономить до 4 % электроэнергии от всего процесса. Использование лабораторного автоклава взамен промышленного позволяет сэкономить до 85 % энергозатрат на процесс при разработке режима стерилизации (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение энергозатрат автоклавов

Тип автоклава	Затраты на этапе нагрева, кДж	Затраты на этапе стерилизации, кДж	Итоговые затраты, кДж	Итоговые затраты, в % от затрат для АСКАМАТ-230	Итоговые затраты, в % от затрат для АВК-30М
АВК-30М	8798	310	9108	14,8	100
АСКАМАТ-230	59537	1949	61486	100	675

Проведен поиск оптимального шага измерения температуры продукта, по которой рассчитывается F-эффект. Выявлено, что по методу средних прямоугольников, используя данные из справочных таблиц коэффициентов летальности, оптимальный шаг измерений составляет не более 5 минут (таблица 2), а с использованием численного интегрирования по методу трапеций оптимальный шаг – не реже 10 минут (таблица 3).

В зависимости от выбора оптимального шага измерения значение рассчитанного F-эффекта варьируется в пределах до 5 %.

Таблица 2 – F-эффект, рассчитанный табличным методом

Шаг измерения температуры, мин.	Режимы стерилизации			
	5 $\frac{25 - 55 - 20}{115}$ 0,2 МПа, 4,7 усл. мин.		6 $\frac{25 - 70 - 20}{115}$ 0,2 МПа, 4,7 усл. мин.	
	F-эффект, усл. мин.	ΔF относительно первого значения, %	F-эффект, усл. мин.	ΔF относительно первого значения, %
0,5	5,149	0	6,309	0
1	5,139	0,194	6,302	0,111
2	5,1	0,952	6,272	0,586
5	4,882	5,185	6,065	3,87
10	4,199	18,45	5,566	11,78
20	3,572	30,63	4,747	24,76

Таблица 3 – F-эффект, рассчитанный с использованием метода численного интегрирования по методу трапеций

Шаг измерения температуры, мин.	Режимы стерилизации			
	5 $\frac{25 - 55 - 20}{115}$ 0,2 МПа, 4,7 усл. мин.		6 $\frac{25 - 70 - 20}{115}$ 0,2 МПа, 4,7 усл. мин.	
	F-эффект, усл. мин.	ΔF относительно первого значения, %	F-эффект, усл. мин.	ΔF относительно первого значения, %
0,5	5,149	0	6,307	0
1	5,154	-0,1	6,314	-0,11
2	5,148	0,02	6,318	-0,17
5	5,144	0,1	6,312	-0,08
10	5,09	1,15	6,42	-1,79
20	6,04	-17,3	6,88	-9,1

В учебно-экспериментальном цехе МАУ было проведено исследование температурного поля стерилизационных аппаратов. В автоклаве АСКМАТ-230 оно равномерное на этапе собственно стерилизации, но в процессе охлаждения является неоднородным, поэтому при разработке режимов стерилизации рекомендуется банки с продуктом размещать в нижней корзине автоклава, чтобы учесть разницу F-эффектов в 10 %.

В автоклаве АВК-30М температурное поле симметрично относительно вертикальной оси, а наименее прогреваемая область стерилизационной камеры расположена в верхней части верхней корзины.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ описаны предлагаемые варианты совершенствования методик и алгоритмов разработки режимов стерилизации пищевых продуктов. Приведена классификация возможных температурных профилей греющей среды в стерилизационной камере автоклава (традиционный, ступенчатый, «модернизированный», переменный, кратковременный высокотемпературный, многоступенчатый и с использованием математической модели продукта) для управления процессом стерилизации пищевых продуктов в водной среде.

Этап предварительного подбора нового режима стерилизации традиционно проходит по алгоритму, представленному на рисунке 2. Основными

недостатками традиционного алгоритма являются большие затраты ресурсов, поэтому главной задачей является их снижение на проведение всего этапа предварительного подбора.



Рисунок 2 – Алгоритм проведения этапа предварительного подбора

В рамках научных исследований разработана экономичная методика предварительного подбора режима стерилизации пищевых продуктов для промышленных автоклавов при невозможности их использования.

Экономичная методика основана на использовании математического моделирования процесса совместно с лабораторным автоклавом АВК-30М. На первом этапе проводится перенастройка алгоритмов работы системы управления АВК-30М с целью реализации продолжительности этапов режима стерилизации промышленного автоклава в соответствии с заданием. На втором этапе используется разработанное программное обеспечение PRSC. Если желаемый F-эффект достигнут, то часть реальных процессов на этапе предварительного подбора заменяется на результаты численного математического моделирования.

Предложенная экономичная методика апробирована в экспериментальных исследованиях по разработке режима стерилизации консервов «Печень трески по-мурмански» в жестяной банке №3 для промышленных автоклавов типа АСКАМАТ-230, по результатам которых сделан вывод о необходимости модернизации методики.

В 2022 году получена модернизированная экономичная методика, в которой можно выделить две основные особенности:

1) построение имитационной модели промышленного автоклава на основе автоклава АВК-30М, повторяющей в достаточной степени точности динамику температуры среды в стерилизационной камере;

2) моделирование в программном обеспечении процесса стерилизации с использованием адекватных математических моделей промышленного автоклава и продукта для замены большей части процессов, проводимых на реальном оборудовании.

Сравнение затрат электроэнергии и сырья при применении различных методик разработки режима на этапе предварительного подбора представлено в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение затрат для различных методик

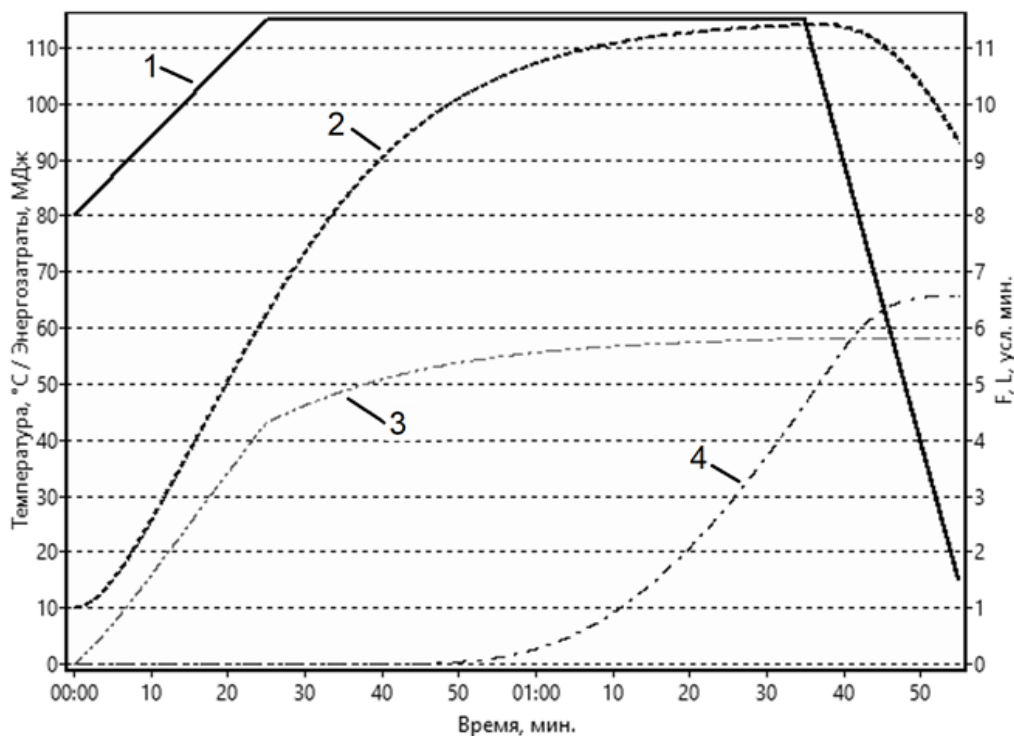
Методика разработки режима	Затраты на одну автоклавоварку		Затраты на этапе предварительного подбора	
	Электроэнергия, %	Сырье, %	Электроэнергия, %	Сырье, %
Стандартная	100	100	100	100
Экономичная	15	10	15	10
Модернизированная экономичная	12	10	5-7	5-6

Основной сложностью повсеместной реализации модернизированной экономичной методики остается наличие реального температурного профиля автоклава, для которого подбирается режим, ввиду неоднородности температурного поля в стерилизационных камерах промышленных автоклавов при нагреве и охлаждении водной среды в процессе стерилизации пищевых продуктов.

Предложен новый способ управления процессом стерилизации консервов из гидробионтов с использованием математической модели продукта, который предусматривает определение значения F-эффекта процесса при помощи измерения температуры среды автоклава и математического моделирования динамики температуры пищевого продукта в консервной таре, а также вычисление разности между текущим и заданным значением F-эффекта. В зависимости от этой разности осуществляют термообработку продукта, после чего выполняют этап охлаждения консервов. Предложенный способ сочетает в себе традиционный, ступенчатый и «модернизированный» температурные профили греющей среды автоклава.

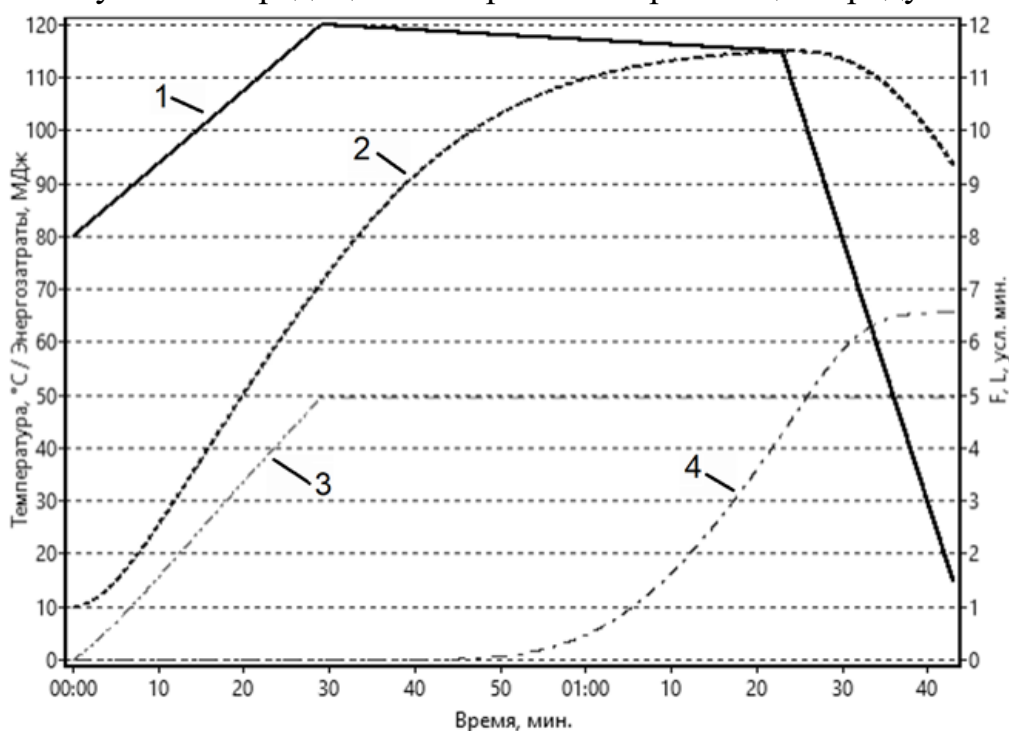
Для учета неравномерности температурного поля автоклава нормативный F-эффект дополнительно увеличивают на 10 %. Если точность приборов, регистрирующих температуру стерилизации в производственных условиях, составляет ± 1 °C, то учитывают разброс величины F-эффекта в 25,28 % от нормативного при температурном параметре термоустойчивости тест-микроорганизма равном 10.

Кривые температур в стерилизационной камере и консервной таре с продуктом, фактического стерилизующего эффекта и энергозатрат при проведении процессов стерилизации по традиционному режиму и по предлагаемому способу управления тепловой обработкой консервов, представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.



1 – температура в стерилизационной камере автоклава, °С; 2 – температура в консервной таре с продуктом, °С;
3 – энергозатраты при проведении процесса, МДж; 4 – фактический стерилизующий эффект, усл. мин.

Рисунок 3 – Традиционный режим стерилизации продукта

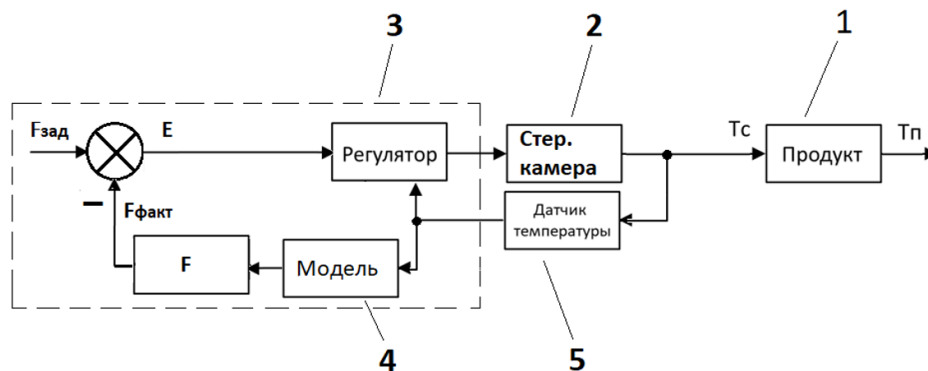


1 – температура в стерилизационной камере автоклава, °С; 2 – температура в консервной таре с продуктом, °С;
3 – энергозатраты при проведении процесса, МДж; 4 – фактический стерилизующий эффект, усл. мин.

Рисунок 4 – Процесс стерилизации, проводимый по предлагаемому способу

Процесс стерилизации в водной среде по предлагаемому способу отличается от традиционного тем, что время этапа стерилизации уменьшилось до 54 минут, при этом время нагрева и температура начала этапа стерилизации увеличились до 29 минут и 120 °С соответственно. Предлагаемый способ позволит сократить энергетические затраты на процесс на 14 % по сравнению с традиционным режимом стерилизации пищевых продуктов.

Новый способ стерилизации пищевых продуктов осуществляется по представленной на рисунке 5 структурно-функциональной схеме управления процессом.



1 – консервная тара с продуктом, 2 – стерилизационная камера автоклава,
3 – управляющая вычислительная машина, 4 – математическая модель продукта,
5 – датчик температуры среды автоклава

Рисунок 5 – Структурно-функциональная схема управления процессом стерилизации пищевых продуктов

Идентификацию параметров математической модели продукта в консервной таре 1 проводят по характеристике, которую получают экспериментально в наименее прогреваемой точке продукта в таре, расположенной в наименее прогреваемой области автоклава, или берут из результатов научных исследований.

Управление процессом тепловой обработки осуществляют с помощью управляющей вычислительной машины 3, где вводятся параметры математической модели продукта 4 в консервной таре и заданное значение F-эффекта процесса. В соответствии с режимом стерилизации выполняется настройка выбранного пользователем типа и (или) структуры регулятора.

В процессе стерилизации с помощью датчика температуры 5 в стерилизационной камере автоклава 2, осуществляют измерение текущей температуры среды T_c . По нему регулятор численно решает дифференциальное уравнение математической модели продукта 4 и с использованием виртуального датчика определяет температурную динамику T_n продукта.

В результате применения нового способа, можно повысить эффективность процесса стерилизации на 15-20 % в сравнении с традиционным режимом.

С целью создания ЦДА в разработанное на кафедре АиВТ МАУ ПО КМ «Модель автоклава для тренажера процесса стерилизации» добавлена подсистема связи. Для этого программа соединяется по протоколу Modbus-RTU через интерфейс RS-485 с СПК-107, получающим данные о текущем состоянии объекта управления – промышленном автоклаве Н2-ИТА602.

По двусторонним информационным связям передаются следующие данные:

1. от ПО КМ к СПК-107:

- а) сигналы о проценте заполнения автоклава водой и достижении верхнего уровня, срабатывании подрывного клапана в модельном автоклаве при отсутствии реального;
- б) сигнал о готовности магистралей подачи воды, пара, воздуха и спуска;

в) сигнал о состоянии крышки автоклава (закрыта/открыта);
 г) расчетные значения с виртуальных датчиков температуры и давления греющей среды стерилизационной камеры модельного автоклава при отсутствии реального;

2. от СПК-107 к ПО КМ:

а) состояние клапанов подачи воды, воздуха, пара, спуска и слива, а также сигнал о верхнем уровне воды при наличии реального автоклава;

б) сигнал для запуска моделирования работы автоклава;

в) полученные с датчиков значения температуры и давления греющей среды стерилизационной камеры реального автоклава при его наличии.

Структура АСНИ может быть изображена в общепринятом (рисунок 6) или альтернативном виде (рисунок 7).

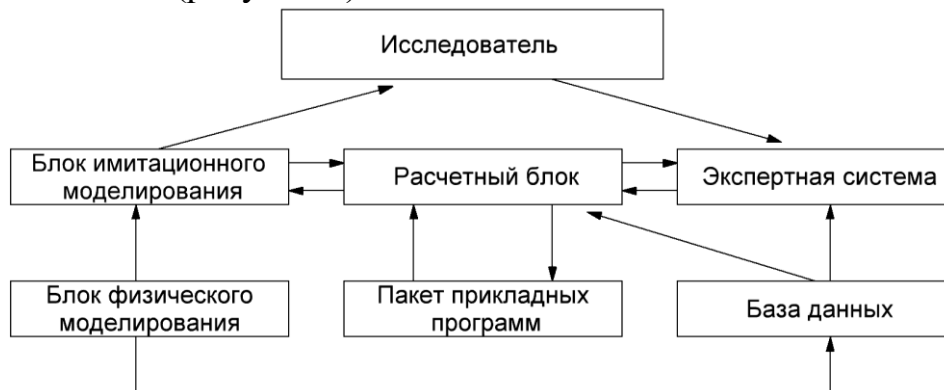


Рисунок 6 – Общепринятый вид структуры АСНИ

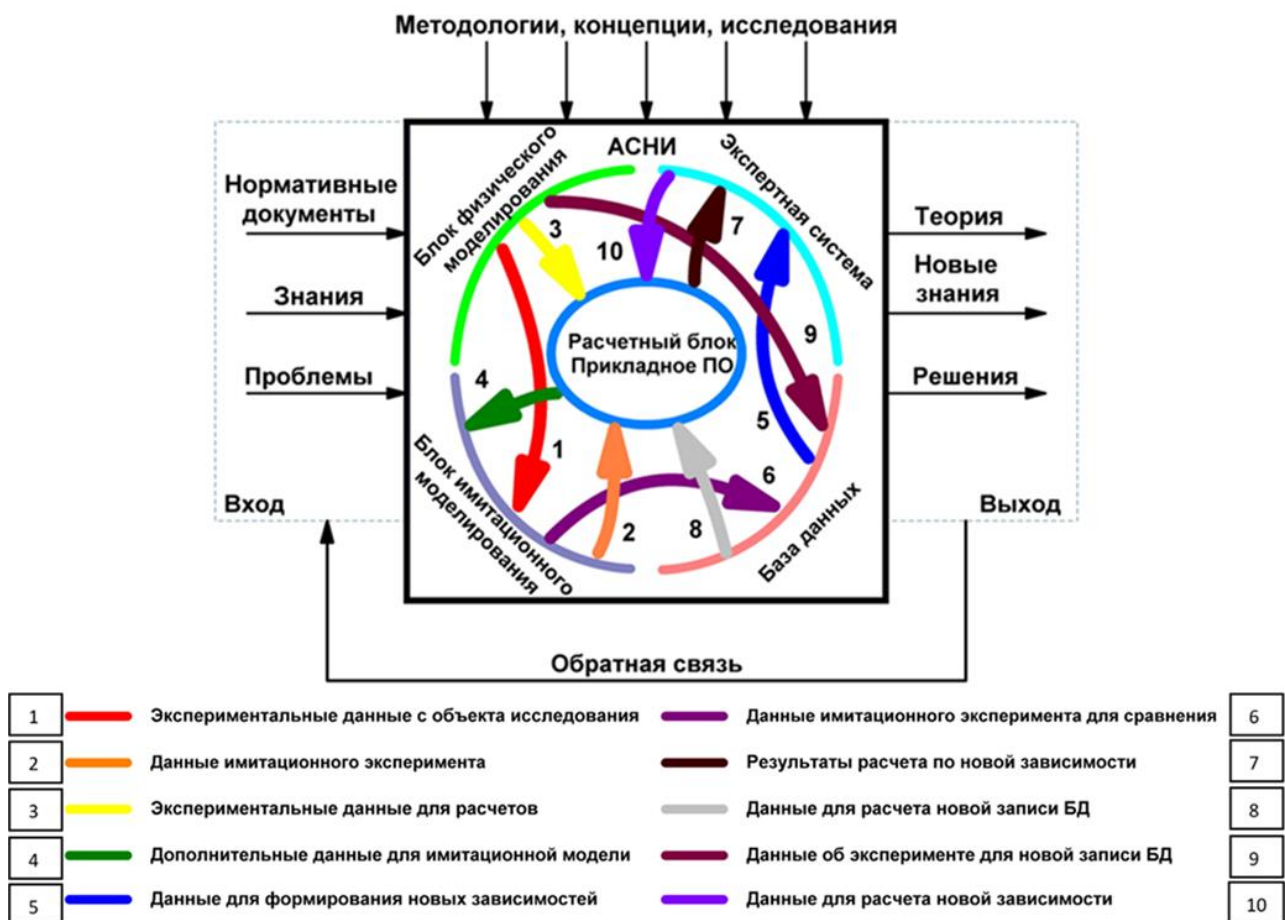


Рисунок 7 – Альтернативный вид структуры АСНИ

На рисунке 7 АСНИ представлена в виде модели «черного ящика». Входными параметрами АСНИ являются законы, нормативные документы, знания, проблемы. Для функционирования АСНИ необходимо применение методологии, концепций, исследований. Выходами АСНИ являются: теоретические сведения, знания, а также решения проблем. На стадии исследования происходит коррекция входных параметров АСНИ исследователем.

Структуры АСНИ и ЦДИ похожи (рисунок 8) в плане передачи данных от объектов исследования в цифровое пространство. Однако ЦДИ передает обратно информацию необходимую для принятия решения и формирования управляющих воздействий, в то время как обслуживающая подсистема АСНИ позволяет также напрямую управлять объектом исследования. Поэтому, ЦДИ включен в состав АСНИ.

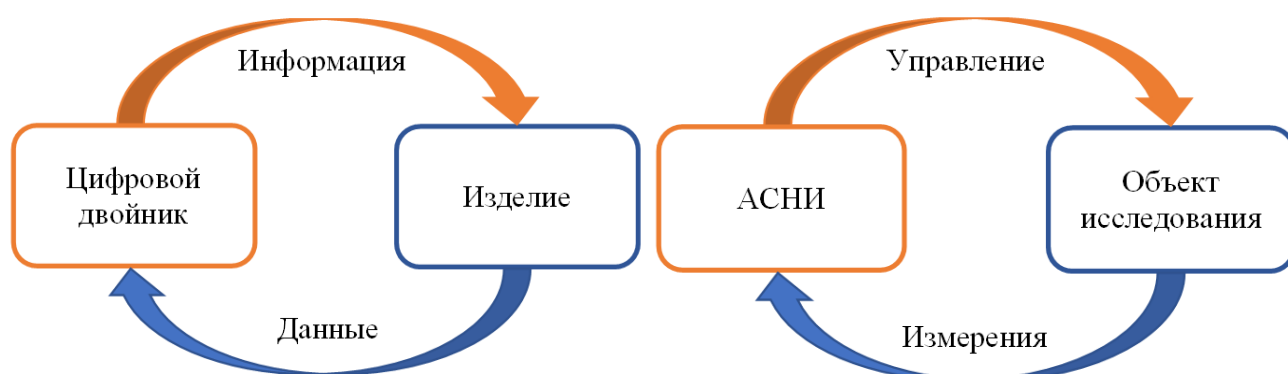


Рисунок 8 – Представление двусторонней связи в ЦДИ и АСНИ

В таблице 5 представлены звенья АСНИ, реализованные ранее на кафедре АиВТ МАУ.

Таблица 5 – Реализованные звенья АСНИ

Объектная подсистема	САУ процессами стерилизации пищевых продуктов для автоклавов АВК-30М, АСКАМАТ-230 и Н2-ИТА602, датчики температуры и давления
Обслуживающие подсистемы	подсистемы моделирования, ввода и вывода графической информации, создания документов о теплофизическом исследовании
Методическое обеспечение	существующие методики исследования температурного поля автоклава, подбора режимов стерилизации и их утверждения; инструкции и руководства по использованию автоклавов АВК-30М, АСКАМАТ-230 и Н2-ИТА602 при стерилизации консервов в водной среде; методики подбора моделей процесса и параметров режимов стерилизации
Техническое обеспечение	установленное промышленное оборудование для автоматизации; запатентованная стерилизационная установка АВК-30М, промышленные автоклавы АСКАМАТ-230 и Н2-ИТА602; логгеры температуры Ellab TrackSense и Thermochron; ПК для обработки измеренных данных; средства измерения и регулирования
Программное обеспечение	ПО от производителя датчиков; ПО разработанное на кафедре АиВТ; ПО для разработки САУ и графических интерфейсов пользователя; ПО тренажера процесса стерилизации и его САУ
Организационно-правовое обеспечение	научные отчеты о проведении исследований и внедрении режимов стерилизации пищевых продуктов из гидробактерий; технологические инструкции по производству рыбных консервов

Определены и реализованы недостающие компоненты АСНИ.

Разработан программный комплекс TPM&PRSC для получения режима стерилизации консервов на этапе предварительного подбора. Сначала в TPM загружается экспортированный файл температурных профилей. На основе этой информации подбираются температурные модели продукта, которые сохраняются наряду с реальным температурным профилем греющей среды автоклава. После этого полученные файлы открываются в PRSC и подбирается необходимый режим стерилизации консервов. Окончательный выбор режима оформляется в виде файла теплофизических данных для утверждения режима на этапе предварительного подбора.

БД АСНИ состоит из набора таблиц. «Таблица 1» содержит информацию, связанную с проведенным процессом стерилизации. «Таблица 2» представляет собой данные об изменении температур греющей среды автоклава и внутри банок с продуктом, давления внутри стерилизационной камеры (если оно измерялось) и рассчитанных значений F-эффекта для каждой банки с продуктом. «Таблица 3» содержит информацию об используемых автоклавах: основные параметры, минимально возможные параметры режимов стерилизации, особенности конструкции, ссылка на файл с параметрами модели (при ее наличии), примечания для исполнителя. Аналогично предыдущей таблице, организована «Таблица 4», содержащая информацию о номерах жестяных круглых банок и их параметрах. «Таблица 5» представляет собой данные о консервируемом продукте: наименование, номер банки, наличие гомогенизированной структуры, параметры кислотности и теплоемкости, состав, соотношение ингредиентов, нормативный F-эффект для продукта и ссылка на файл с параметрами модели (при ее наличии). Структура БД АСНИ представлена на рисунке 9.

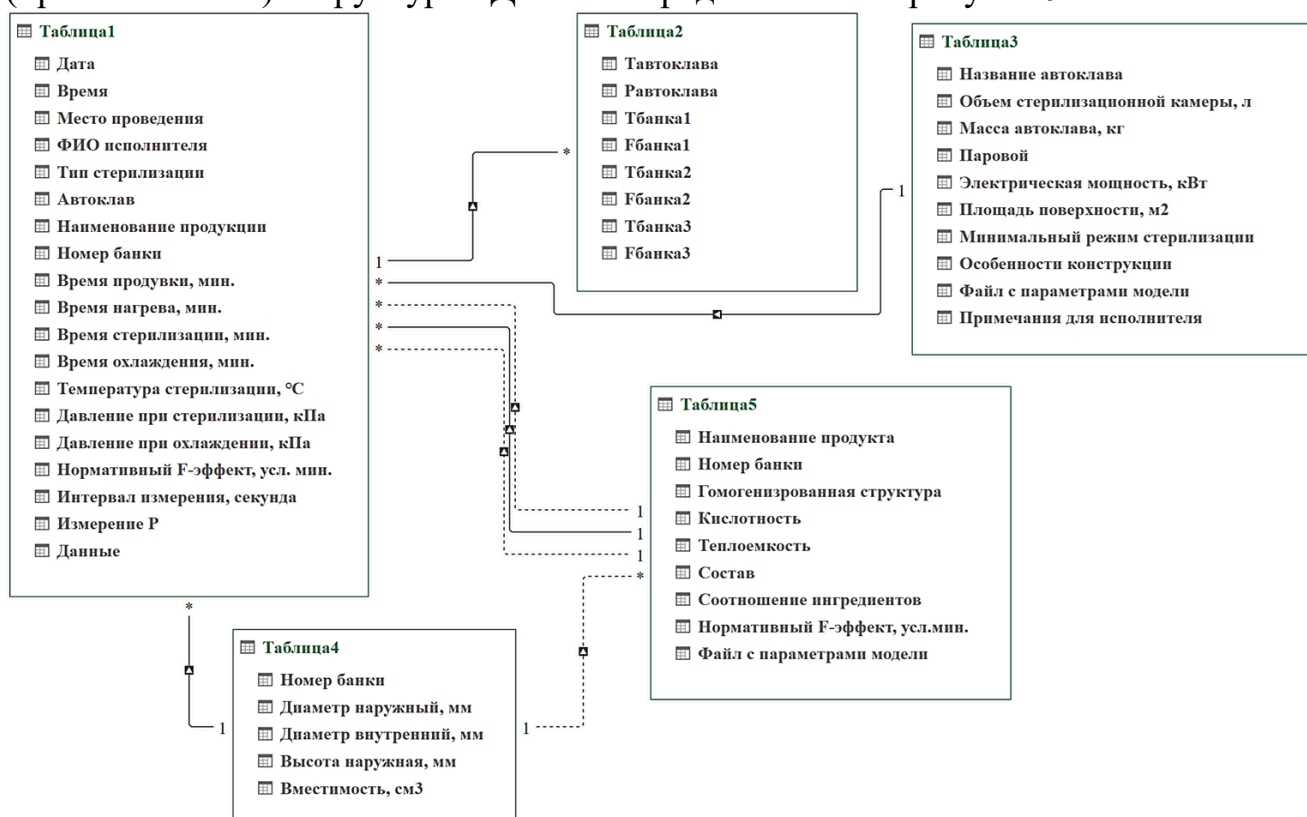


Рисунок 9 – Структура БД АСНИ

База знаний экспертной системы содержит утвержденные режимы стерилизации для конкретных продуктов, номеров банок и автоклавов.

На основе использования средств нечеткой логики экспертная система осуществляет поддержку принятия решений в поиске необходимого режима стерилизации для пищевого продукта после нескольких ответов пользователя на вопросы в интерфейсном модуле ввода/вывода информации.

Все используемые в экспертной системе правила образуют систему. При выполнении определенных условий предлагается набор решений.

После согласия с предложенным режимом и рекомендациями может быть проведен имитационный модельный процесс стерилизации с использованием математических моделей продукта и стерилизационной камеры автоклава для поиска оптимальной модели действий исполнителя с использованием интеллектуальных технологий. Информация по каждому из проведенных процессов накапливается и сохраняется в базы знаний и данных.

Таким образом, были выполнены задачи разработки компонентов АСНИ: программного комплекса, базы данных и экспертной системы.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена практической реализации АСНИ.

Блок физического моделирования АСНИ реализован в виде АС ПУ ВС АВК-30М, используемой в качестве физического двойника промышленного автоклава, и разработанной системы автоматического управления Н2-ИТА602 для организации двусторонней связи с ЦДА.

Структурная схема АС ПУ ВС АВК-30М представлена на рисунке 10.

В ходе процесса стерилизации ПУ ВС АВК-30М, написанная в среде разработки CoDeSys v2.3.9.41, получает данные о текущих температуре и давлении, состоянии клапанов воды и воздуха, уровне воды в автоклаве и состоянии крышки автоклава от ПЛК-154, который считывает их с модулей аналогового и дискретного ввода-вывода по протоколам Modbus-RTU или ОВЕН. В ходе процесса стерилизации осуществляется управление автоклавом с помощью подачи соответствующего управляющего воздействия на электромагнитные клапаны и трубчатые электронагреватели.

В состав ПУ АВК-30М ВС входят подсистемы: проверки уровня доступа персонала; контроля температуры в стерилизационной камере автоклава; контроля давления в стерилизационной камере автоклава; управления нагревательными элементами автоклава, а также клапанами подачи и стравливания воздуха, залива и слива воды; хранения данных о процессе; визуализации переменных процесса стерилизации.

Модернизация системы автоматического управления процессом стерилизации для вертикального автоклава Н2-ИТА602 проведена с помощью соединения ОВЕН СПК-107 с модулями ввода/вывода через существующий в системе промышленный интерфейс RS-485 по протоколу DCON.

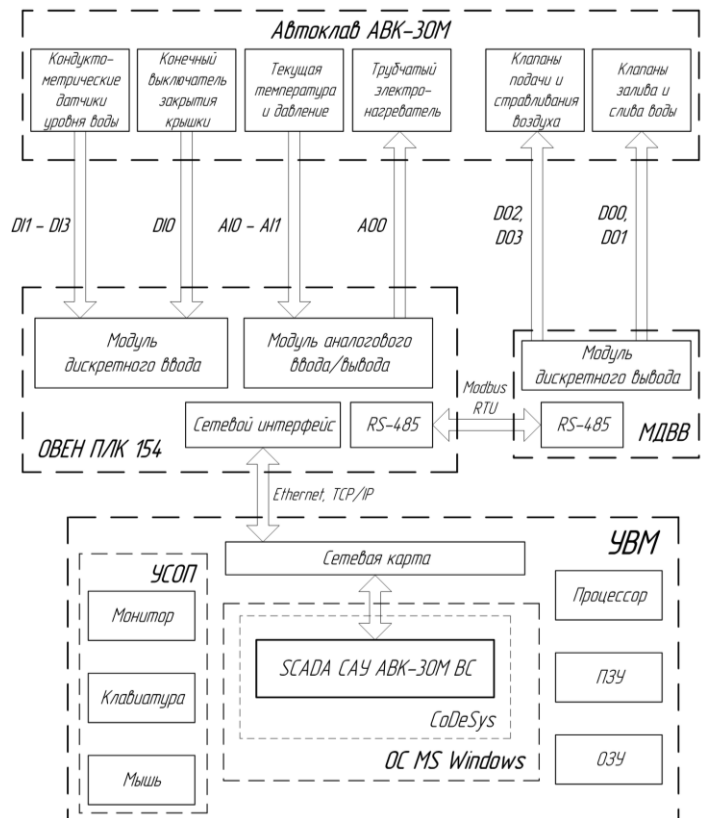


Рисунок 10 – Структурная схема АС ПУ ВС АВК-30М

Структурная схема передачи сигналов в модернизированной системе управления представлена на рисунке 11.

Цифровой двойник автоклава Н2-ИТА602

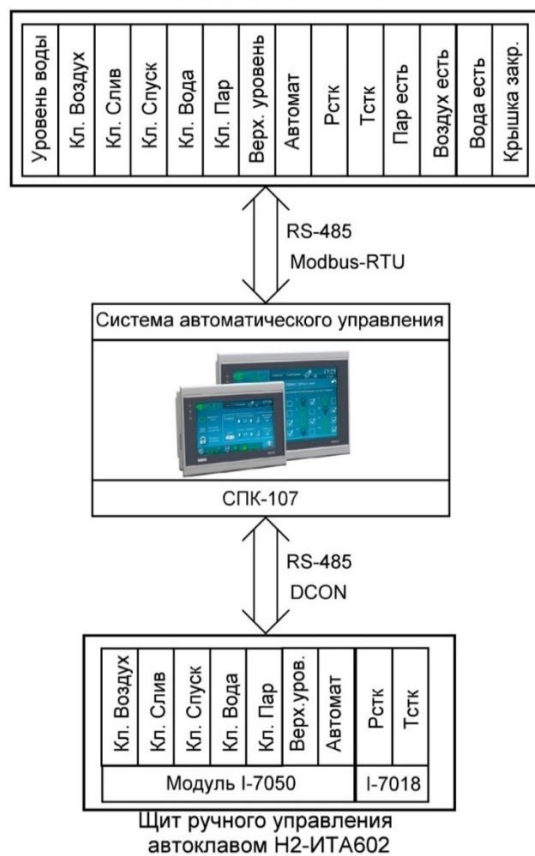


Рисунок 11 – Структурная схема передачи сигналов в модернизированной системе управления

В программу управления от существующей системы на СПК-107 приходят сигналы о включении тумблера «Автомат», срабатывании датчика верхнего уровня воды и значениях температуры и давления в стерилизационной камере Н2-ИТА602. Аналогично по протоколу DCON от СПК-107 к модулям ввода/вывода щита ручного управления передаются сигналы открытия/закрытия клапанов подачи воды, пара, воздуха, спуска и слива.

В процессе эксплуатации автоклава Н2-ИТА602 все данные СПК-107 параллельно передает цифровому двойнику автоклава.

Автор выражает благодарность за помощь в подготовке работы А. А. Жук, канд. техн. наук А. В. Власову, канд. техн. наук, профессору А. А. Маслову, доктору техн. наук, профессору В. А. Гроховскому, старшему преподавателю кафедры АиВТ В. В. Ерещенко и канд. техн. наук В. В. Яценко, а также сотрудникам кафедры ТПП канд. техн. наук Л. К. Курановой и канд. техн. наук М. А. Ершову за помощь в организации и проведении экспериментов в учебно-экспериментальном цехе МАУ.

ВЫВОДЫ

1. Представлена классификация режимов стерилизации пищевых продуктов в водной среде в вертикальном автоклаве периодического действия по признаку изменения температурного профиля греющей среды.

2. Представлена модернизированная экономичная методика разработки нового режима стерилизации пищевого продукта для промышленного автоклава на этапе предварительного подбора, которая позволила сократить потребление электроэнергии и расхода сырья до 95 % на один цикл. Модернизированная экономичная методика позволит рыбопромышленным предприятиям повысить свою эффективность в рамках концепции бережливого производства.

3. Предложен новый способ управления процессом стерилизации пищевых продуктов с использованием математической модели продукта, который предусматривает определение прогнозируемого значения F-эффекта процесса при помощи измерения температуры среды автоклава и математического моделирования динамики температуры пищевого продукта в консервной таре, а также вычисление разности между прогнозируемым фактическим значением и заданным значением эффекта стерилизации. В зависимости от этой разности осуществляют термообработку продукта до достижения прогнозируемым значением фактической летальности заданного значения, после чего выполняют этап охлаждения консервов согласно режиму. Применение нового способа может повысить эффективность процесса тепловой обработки на 15-20 %.

4. Представлена структура разрабатываемой АСНИ. Выполнены задачи разработки недостающих компонентов АСНИ: программного комплекса, базы данных и экспертной системы. Рассмотрена реализация блоков имитационного и физического моделирования, а также экспертной системы АСНИ. Программное обеспечение «Модель автоклава для тренажера процесса стерилизации» преобразовано для использования в качестве цифрового двойника автоклава.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Kaychenov A, **Stolyanov A**, Zhuk A Lean method for development of thermal treatment regimes for canned food from aquatic organisms for industry autoclaves // International Conference P2ARM 2021, IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. – 2022. – Vol. 1052, 012068.
2. Software for calculating the actual lethality of canned food heat treatment processes: Development and application / A. Zhuk, **A. Stolyanov**, A. Kaychenov [et al.] // E3S Web of Conferences:, 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. – EDP Sciences, 2021. – Vol. 273, 13002.
3. Review advances of Automation and Computer Engineering Department in the field of canned food sterilization over the past decade / **A. Stolyanov**, A. Zhuk, A. Kaychenov // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.: 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" 18-19 March 2020. – Institute of Physics Publishing, 2020. – Vol. 539, 012086.
4. Complex for modeling and optimization the sterilization process / **A. Stolyanov**, A. Zhuk, A. Vlasov [et al.] // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.: 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019. – Institute of Physics Publishing, 2019. – Vol. 403, 012016.
5. Comparative analysis of temperature loggers used in the development of regimes for heat treatment of food production in autoclaves / **A. Stolyanov**, A. Zhuk, A. Kaychenov, L. Kuranova // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 302, 012031.
6. Исследование температурного поля промышленного автоклава ASCAMAT 230 / **А. В. Столянов** [и др.] // Вестник МГТУ. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2017. – Т. 20, № 3. – С. 563–571.
7. Маслов А. А., **Столянов А. В.**, Кайченев А. В., Куранова Л. К. Предварительный подбор режима стерилизации консервов "Скумбрия атлантическая натуральная с добавлением масла" на основе разработанных математических моделей процесса // Вестник МГТУ, 2016. – Т. 19, № 4. – С. 861–868.
8. Разработка модели автоклава для тренажера процесса стерилизации / А. В. Власов, А. В. Кайченев, **А. В. Столянов** [и др.] // Рыбное хозяйство. – 2015. – № 6. – С. 106–109.
9. **Столянов А. В.**, Кайченев А. В., Власов А. В., Маслов А. А. Экономичная методика разработки режимов стерилизации консервов из гидробионтов для промышленных автоклавов // Вестник МГТУ. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2015. – Т. 18, № 4. – С. 661–666.
10. Применение моделирования режимов тепловой стерилизации для улучшения показателей качества консервной продукции / **А. В. Столянов** [и др.] // Вестник МГТУ. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2015. – Т. 18, № 1. – С. 110–116.

В прочих изданиях:

11. **Столянов А. В.** Прогнозирование значения фактического стерилизующего эффекта готовых консервов из гидробионтов // Наука и образование-2021: материалы всерос. науч.-практ. конференции, Мурманск, 01 декабря 2021 года. – Мурманск: МГТУ, 2022. – С. 80-85.

12. **Столянов, А. В.** Разработка программного обеспечения для оптимизации времени при получении данных о процессе тепловой обработки продуктов // Известия высших учебных заведений. Арктический регион. – 2020. – №1. – С. 38-42.

13. Разработка программного обеспечения расчета фактического летального эффекта процессов тепловой обработки консервов / А. А. Жук, **А. В. Столянов**, А. В. Кайченев, Л. К. Куранова // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса: Сборник научных трудов XXIV Международной научно-практической конференции. В рамках Агропромышленного форума юга России: выставок «Интерагромаш», «Агротехнологии», Ростов-на-Дону, 24–26 февраля 2021 года. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2021. – С. 215–219.

14. **Столянов А. В.**, Кайченев А. В., Власов А. В. Комплекс программных средств для оптимизации этапа предварительного подбора режимов стерилизации консервов из гидробионтов // Наука - производству: материалы междунар. науч.-практ. конф., Мурманск, 18–20 апреля 2018 г. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2018. – С. 86–89.

15. **Столянов, А. В.** Разработка программного обеспечения для оптимизации этапа предварительного подбора режимов стерилизации консервов из гидробионтов / А. В. Столянов, А. В. Кайченев // Наука - производству: материалы междунар. науч.-практ. конф., Мурманск, 14–19 апреля 2017 г. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2017. – С. 77–81.

16. Жук А. А., Кайченев А. В., **Столянов А. В.** Модернизация системы автоматического управления промышленного автоклава ASCAMAT-230 для проведения научных исследований // Наука и образование – 2017: мат. всерос. науч.-практ. конф., Мурманск, 27 марта 2017 г. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2017.

17. **Столянов, А. В.**, Кайченев А. В., Куранова Л. К. Совершенствование этапа предварительного подбора режимов стерилизации консервов из гидробионтов с использованием программного обеспечения // Наука - производству : мат. всерос. науч.-практ. конф., Мурманск, 22–25 марта 2016 г. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2016. – С. 93-98.

18. **Столянов А. В.**, Жук А. А., Ерещенко В. В. Компьютерное моделирование как перспективное направление оптимизации процесса тепловой стерилизации консервной продукции. Обзор существующих решений // Наука - производству: материалы междунар. науч.-практ. конф., Мурманск, 24-27 марта 2015 г. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2015. – С. 59–63.

19. Обзор методов многоцелевой оптимизации термической обработки продуктов / **А. В. Столянов**, А. В. Кайченев, А. А. Маслов [и др.] // Перспективы развития науки и образования : сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф., Москва, 28 ноября 2014 г. : в 5 частях. – М. : АР-Консалт, 2014. – Ч. III. – С. 17–22.

Патенты, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

20. Патент 2789344 С1 Российская Федерация, МПК А23L 3/00. – Способ управления процессом тепловой обработки консервов из гидробионтов / А. А. Жук, А. В. Кайченев, **А. В. Столянов**, В. А. Гроховский, Л. К. Куранова; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВО «МГТУ». – № 2022102988; заявл. 07.02.2022; опубл. 01.02.2023, Бюл. № 4. – 12 с.

21. Свидетельство №2021613155. – Расчет летальности процесса тепловой обработки консервов: программа для ЭВМ / А. А. Жук, **А. В. Столянов**, А. В. Кайченев (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «МГТУ». – № 2021612175; заявл. 16.02.2021; опубл. 03.03.2021, Бюл. № 3. – 5,6 Кб.

22. Свидетельство № 2021613099. – ThermoPhysics: программа для ЭВМ / А. А. Жук, **А. В. Столянов** (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «МГТУ». – заявл. 16.02.2021, № 2021611973; опубл. 02.03.2021, Бюл. № 3. – 41 Кб.

23. Свидетельство № 2020665739 – ProcessF: программа для ЭВМ / **А. В. Столянов**, А. А. Жук (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «МГТУ». – № 2020665107; заявл. 17.11.2020; опубл. 30.11.2020, Бюл. № 12. – 13,5 Кб.

24. Свидетельство № 2017612613 – Modeller: программа для ЭВМ / **А. В. Столянов**, А. В. Кайченев, А. В. Власов, А. А. Маслов, А. А. Жук, В. В. Ерещенко (RU); правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ». – № 2016661749; заявл. 02.11.2016; опубл. 01.03.2017. – 28 Кб.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АиВТ – автоматика и вычислительная техника

АС – автоматизированная система

АСНИ – автоматизированная система научных исследований

БД – база данных

ВС – водная стерилизация

КМ – компьютерное моделирование

МАУ – Мурманский арктический университет

НИР – научно-исследовательская работа

ПО – программное обеспечение

ПУ – программа управления

СПК – сенсорный панельный контроллер

ТПП – технологии пищевых производств

ЦДА – цифровой двойник автоклава

ЦДИ – цифровой двойник изделия

F-эффект – фактический стерилизующий эффект

Modbus – коммуникационный протокол архитектуры ведущий-ведомый

PRSC – ПО «Подбор режима стерилизации консервов»

RS-485 – Recommended Standard 485

RTU – Remote Terminal Unit (устройство связи с объектом)

TPM – ПО «Thermal Processing Modeller»