

*На правах рукописи*



**Оспанов Кайрат Кельденович**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПАРОВОЙ ЗАВЕСЫ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ  
ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА**

Специальность – 2.3.3. Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

Научный руководитель: заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор  
**Федоров Андрей Владимирович**

Официальные оппоненты: **Кочегаров Алексей Викторович**  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет, кафедра техносферной и пожарной безопасности, профессор

**Исаева Мадина Ризвановна**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств», заведующая кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (федеральный центр науки и высоких технологий)

Защита диссертации состоится «24» сентября 2025 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.01, созданного на базе Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4, зал Диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/da0/tv0yjlxq1gk9z1ntl1b70iuutj1775qm/Диссертация%20Оспанова%20К.К..pdf>

Автореферат разослан «30» мая 2025 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Р.Ш. Хабибулин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Обеспечение пожаро- и взрывобезопасности технологических процессов на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях (ННП) является приоритетной задачей. Одним из ключевых элементов обеспечения безопасности служит система паровой завесы трубчатой печи (ПЗТП), входящая в состав системы противоаварийной автоматической защиты (СПАЗ). Особую актуальность данный вопрос приобретает применительно к процессам с высоким риском разгерметизации оборудования, например, гидроочистки дизельного топлива. При таких процессах, характеризующихся высокими температурами (350–420 °С) и давлением (60 атм), эффективность и надежность функционирования ПЗТП становится критическим фактором для предотвращения аварийных ситуаций.

В случае возникновения аварийных ситуациях на ННП, связанных с разгерметизацией оборудования и образованием пожаровзрывоопасного облака топливовоздушной смеси (ТВС), практикуется одновременный запуск ПЗТП всех технологических установок, входящих в состав комплекса. Однако, такой подход существенно повышает расход пара из паропроводной сети предприятия. В результате давление пара снижается ниже допустимых норм, что негативно сказывается на эффективности работы ПЗТП, особенно на технологических установках гидроочистки дизельного топлива.

Существующая система ПЗТП имеет ряд недостатков. Отсутствие автоматических средств измерения давления пара в паровой завесе, а также ручное управление этим параметром не позволяют точно определить необходимое воздействие на исполнительные устройства для поддержания стабильного давления пара. Причинами такой ситуации являются отсутствие нормативных требований к автоматизации ПЗТП, а также отсутствие моделей и алгоритмов для реализации функций контроля и управления давлением пара. В связи с этим, разработка подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП технологической установки гидроочистки дизельного топлива (ТУ ГДТ) является актуальной задачей.

**Степень разработанности.** Разработке научных основ автоматизации управления технологическим процессом, противоаварийной защиты нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий посвящены работы следующих ученых: Скворцова М.С., Садыкова Х.А., Уваровой Н.А., Коронатова Н.Н., Кадырова Р.Р., Каяшева А.И., Гумерова И.Ф., Бизюковой Е.Е., Пегушина С.Л., Воронина В.В., Вахова Д.Н. Исследования в области противопожарной защиты рассматриваемых объектов проводили: Топольский Н.Г., Фомин В.И., Федоров А.В., Членов А.Н., Демехин Ф.В., Алешков А.М., Лебедева М.И., Iftekharul M. Разработке методов структурного анализа и повышения надежности систем приборной безопасности посвящены работы Нозик А.А. и Можяева А.С. Исследованиям методов обеспечения противопожарной защиты трубчатых печей, а также изучению параметров их эффективного функционирования посвящены работы: Абдрахимова Ю.Р.,

Катина В.Д., Рахматуллина А.Р., Венитиади Н.А., Добротворского А.М., Насибуллина Р.Р., Аскарлова И.В., Sato K., Marsegan C., Hartwig S., Lopez P., Diaz-Ovalle C.

Анализ существующих исследований показал, что основное внимание ученых было уделено вопросам оптимального построения и интеграции систем противоаварийной и противопожарной защиты в состав автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Также были детально изучены параметры и методы оценки эффективности функционирования ПЗТП на технологических установках нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий. Однако, несмотря на значительный объем проведенных исследований, вопросы автоматизации функций контроля и управления давлением пара с целью обеспечения стабильной, эффективной и надежной работы ПЗТП остаются недостаточно изученными.

**Объектом исследования** является процесс управления системой паровой завесы трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива.

**Предметом исследования** являются модели, алгоритмы функционирования системы паровой завесы трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с функциями контроля и управления давлением пара.

**Целью исследования** является повышение надежности функционирования систем паровой завесы трубчатой печи технологических установок гидроочистки дизельного топлива нефтеперерабатывающих, нефтехимических предприятий Республики Казахстан на основе формализованной модели автоматизации контроля и управления давлением пара.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие логически взаимосвязанные **задачи**:

1. Провести аналитический обзор автоматизации системы управления технологическим процессом гидроочистки дизельного топлива и анализ методов проектирования паровых завес трубчатых печей.

2. Создать математическую модель процесса управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с фильтрацией текущей ошибки регулирования методом двойного скользящего среднего.

3. Разработать функциональное, техническое, алгоритмическое и программное обеспечение подсистемы контроля и управления давлением пара.

4. Сформировать логико-аналитические и логико-вероятностные модели контуров контроля и управления давлением пара, а также провести расчет показателей надежности и безопасности.

**Научная новизна** работы заключается в следующих результатах:

1. Построена математическая модель процесса управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с фильтрацией текущей ошибки регулирования двойным скользящим средним.

2. Разработан алгоритм функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с фильтрацией текущей ошибки регулирования двойным скользящим средним.

3. Получены логико-аналитические и логико-вероятностные модели контуров подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива.

**Теоретическая значимость работы** обусловлена предложенными математической моделью и алгоритмом, которые могут быть использованы для развития подходов к управлению и исследования параметрических характеристик системы паровой защиты трубчатых печей на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

**Практическая значимость работы** заключается в использовании программного обеспечения и рекомендаций по построению контуров контроля и управления давлением пара. Эти инструменты применяются при обосновании проектных решений в разработке систем паровой защиты трубчатых печей технологических установок, что особенно актуально для предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

**Методология и методы исследования.** В диссертации использованы методы регулирования с обратной связью, метод скользящих средних, общий логико-вероятностный метод анализа структурно-сложных систем, метод Гретенера, метод анализа иерархий.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель процесса управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с фильтрацией текущей ошибки регулирования методом двойного скользящего среднего.

2. Алгоритм функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с фильтрацией текущей ошибки регулирования методом двойного скользящего среднего.

3. Логико-аналитические и логико-вероятностные модели контуров подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива.

**Степень достоверности** основных результатов и выводов диссертации обосновывается корректным применением математического аппарата и сертифицированных программ моделирования, хорошей сходимостью расчетных данных с результатами исследований других авторов, опубликованными в печатных изданиях.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 6 международных научно-практических конференциях: «Полимерные материалы пониженной горючести» (Кокшетау, 2021); «Научные исследования стран ШОС: синергия и интеграция» (Пекин, 2021); «Пожарная безопасность в условиях современности» (Кокшетау, 2022); «Системы

безопасности» (Москва, 2022); «Проблемы техносферной безопасности» (Москва, 2023); «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (Кокшетау, 2023).

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы используются:

– в Товариществе с ограниченной ответственностью (ТОО) «Kyzylorda Refinery» при разработке и внедрении новых методов автоматизации контроля и устойчивого функционирования паровых завес трубчатых печей (применение моделей, алгоритма и программы для ЭВМ);

– в Акционерном обществе (АО) «Страховая компания «Freedom Finance Insurance» при создании внутриорганизационной методики и технологии определения величин страховых взносов для производственных предприятий;

– в научной деятельности АГЗ им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан в ходе выполнения научно-исследовательской работы на тему: «Автоматизация системы пожаровзрывозащиты технологического процесса гидроочистки дизельного топлива нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий» (п. 7 Плана научных исследований и опытно-конструкторских работ АГЗ им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан на 2023 г.);

– в учебном процессе АГЗ им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан по направлению 6В12302 «Пожарная безопасность».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 работ, из которых – 5 в изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки России и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Личное участие соискателя в получении результатов заключается в разработке математической модели процесса управления и алгоритма функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с фильтрацией текущей ошибки регулирования двойным скользящим средним, а также в построении логико-аналитических и логико-вероятностных моделей контуров управления разработанной подсистемы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и трех приложений. Общий объем работы составляет 151 страницу. Работа включает в себя 38 рисунков и 38 таблиц, список литературы составляет 123 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту. Отражены сведения о внедрении и апробации результатов работы.

**В первой главе «Анализ функционирования системы паровой завесы трубчатой печи в составе технологической установки гидроочистки**

**дизельного топлива»** проведен анализ статистических данных аварий на НПП Республики Казахстан за период 2014–2024 гг. Анализ показал, что наиболее частыми видами аварий являются пожары (80 % от общего числа). Наибольший материальный ущерб был зафиксирован в 2017 году. На рис. 1 представлена диаграмма распределения аварий по типам за период 2014–2024 гг.

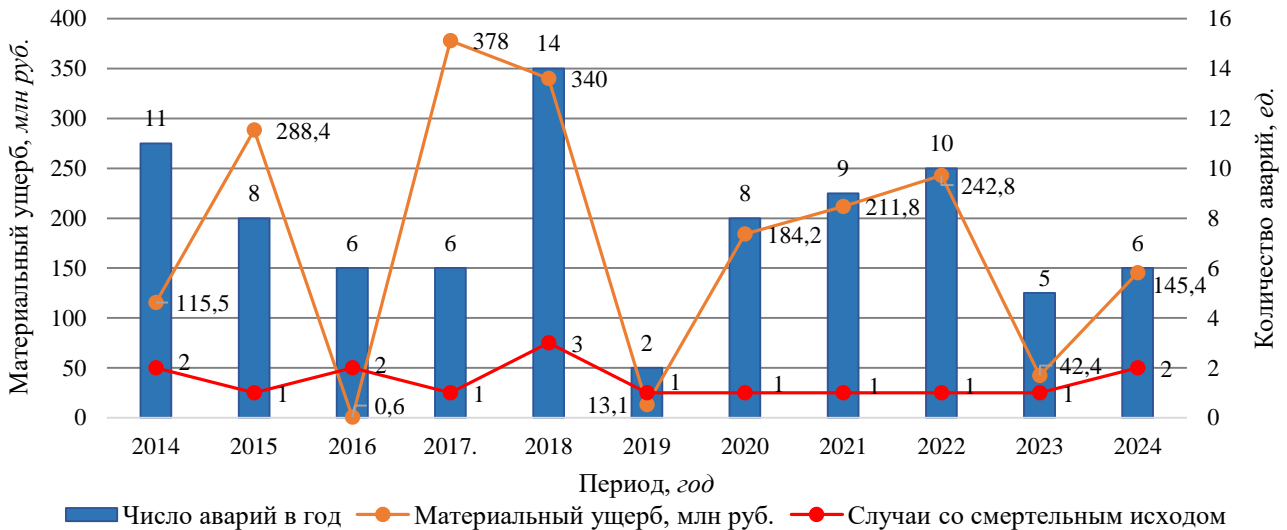


Рисунок 1 – Статистические данные аварий на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях Республики Казахстан за период 2014–2024 гг.

Результаты анализа свидетельствуют о необходимости повышения эффективности систем противоаварийной защиты, в частности, систем паровой завесы трубчатых печей. Целью данного исследования является разработка модели и алгоритма оптимизации работы системы паровой завесы трубчатой печи с целью снижения рисков развития аварийных ситуаций на НПП.



Рисунок 2 – Распределение источников зажигания облака ТВС при авариях на НПП

Данные, представленные на рис. 2, показывают значительную роль участия технологических трубчатых печей в качестве источников зажигания. Именно поэтому надежное и эффективное функционирование системы ПЗТП, предназначенной для изоляции источников зажигания, является ключевым фактором в предотвращении аварий. Наиболее катастрофическим примером последствий неэффективной работы ПЗТП стал взрыв облака ТВС, сопровождавшийся пожаром, который произошел 16 июня 2014 года на Ачинском нефтеперерабатывающем заводе. Анализ причин аварии показал, что одной из основных стала недостаточная величина давления пара в системе ПЗТП, что привело к невозможности надежной изоляции источника зажигания.

Несмотря на значимость системы ПЗТП, действующие нормативные документы и накопленный практический опыт проектирования не обеспечивают достаточного уровня автоматизации процессов контроля и управления давлением пара в данной системе. Это подтверждается анализом структурной схемы автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) установки гидроочистки дизельного топлива типового комплекса нефтепереработки (рис. 3), на которой отсутствуют элементы, предназначенные для автоматического контроля и регулирования давления пара в системе ПЗТП. Например, согласно Инструкции по проектированию паровой защиты технологических печей и ГОСТ 12.3.047–2012 основное внимание уделяется расчету параметров паровой завесы, однако требования к автоматизации управления данной системой в этих документах не предусмотрены.

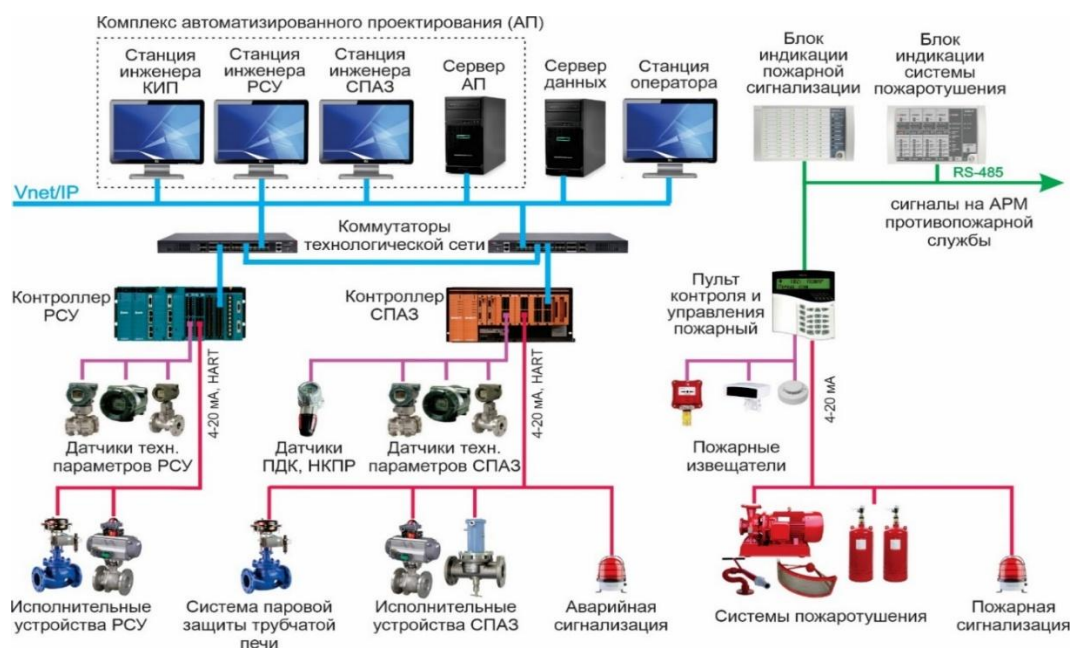


Рисунок 3 – Структурная схема АСУ ТП ТУ ГДТ комплекса нефтепереработки: КИП – контрольно-измерительные приборы; РСУ – распределительная система управления; СПАЗ – система противоаварийной автоматической защиты; АП – автоматизированное проектирование; АРМ – автоматизированное рабочее место; ПДК – предельно допустимая концентрация; НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени

Анализ барьеров безопасности с наиболее опасным событием «полное разрушение реактора гидроочистки Р-301/1» показал, что повышение надежности срабатывания ПЗТП с 0,6 до 0,95, достигнутое, в частности, за счет внедрения дистанционного контроля давления пара, позволяет уменьшить частоту события «взрыв» облака ТВС в 8 раз.

Проведенный аналитический расчет гидродинамических параметров паропровода при одновременном запуске систем ПЗТП на пяти технологических установках, входящих в комплекс нефтепереработки, выявил потенциальную проблему. Согласно расчетам по методике, изложенной в Инструкции, при одновременном увеличении потребления пара для работы ПЗТП давление в паропроводной сети на участке ТУ ГДТ может снизиться до 7,95 атм в течение 45 секунд, тогда как минимально необходимое значение для эффективного функционирования ПЗТП составляет 9 атм. Такое снижение давления приведет к неэффективной работе одной или нескольких систем ПЗТП, что повлечет за собой снижение уровня безопасности.

Результаты проведенного расчета представлены на рисунке 4–а, где графически отображена зависимость давления пара в паропроводе от времени, при одновременном запуске всех систем ПЗТП.

Таким образом, несмотря на положительное влияние повышения надежности срабатывания ПЗТП, существует риск снижения их эффективности из-за недостаточного обеспечения паром при одновременной активации нескольких систем. Это подчеркивает необходимость дальнейшей оптимизации системы пароснабжения и разработки более эффективных алгоритмов управления ПЗТП.

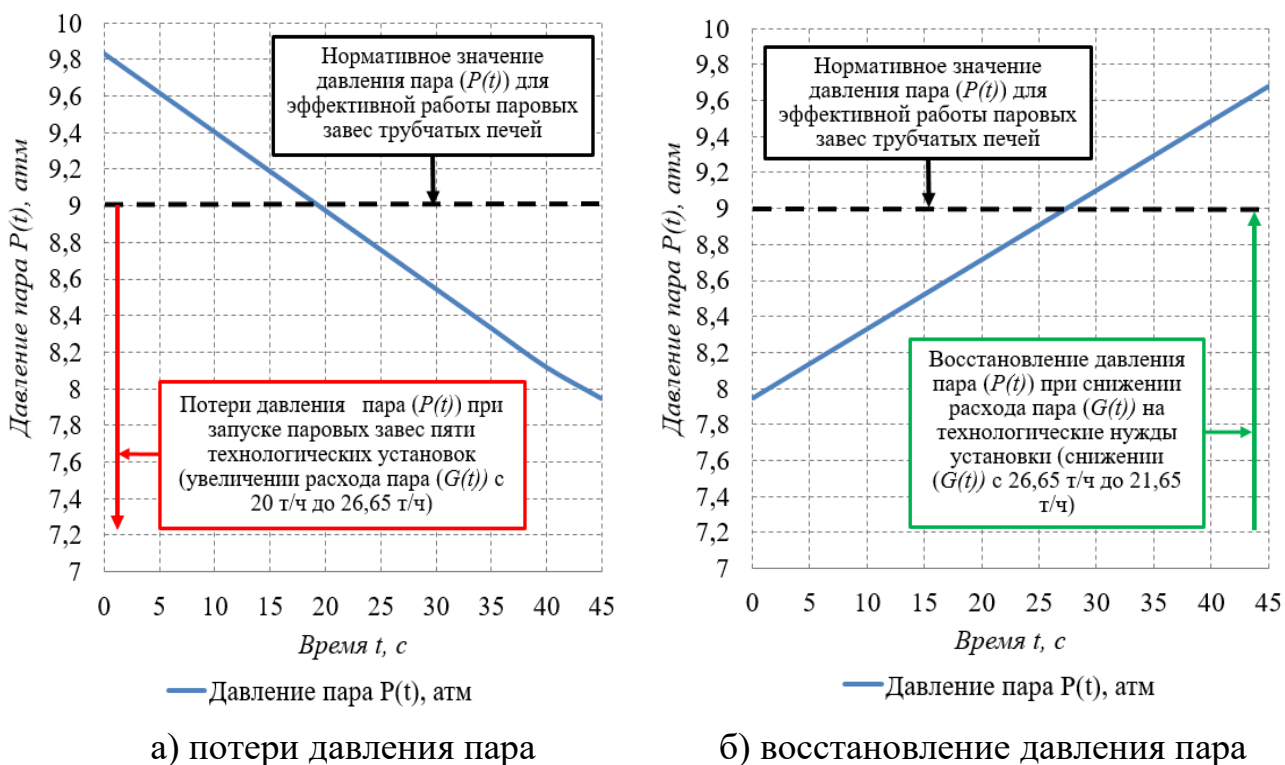


Рисунок 4 – Изменение давления пара в ПЗТП ТУ ГДТ в зависимости от расхода пара из паропроводной сети комплекса нефтепереработки

При недостаточном давлении пара в паропроводной сети, необходимом для эффективной работы ПЗТП, технологический регламент предусматривает ручное регулирование расхода пара для технологических нужд установки. В таких случаях оператор обязан снизить расход пара, чтобы восстановить давление в системе до нормативного уровня.

Как показал анализ (рис. 4–б), уменьшение потребления пара на 5 т/ч позволяет восстановить необходимое давление в системе в течение 28 секунд. Однако ручное управление имеет существенные недостатки: оператор может ошибиться при выборе корректного значения расхода или не успеть своевременно отреагировать на изменение ситуации.

Для достижения более точного и оперативного регулирования давления пара следует внедрить функцию автоматизированного управления. Такая система будет контролировать давление в ПЗТП после активации и регулировать расход пара, обеспечивая оптимальные условия для стабильной и эффективной работы ПЗТП.

**Вторая глава «Разработка подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива»** посвящена созданию модели и алгоритма подсистемы, обеспечивающей поддержание оптимального давления пара в системе ПЗТП ТУ ГДТ, что способствует повышению ее эффективности и надежности.

Подсистема реализует следующие функции: *F-1* – выдача информации о давлении в трубопроводе линии ПЗТП на АРМ оператора; *F-2* – выдача управляющих сигналов на блок управления регулирующими клапанами подачи пара на технологические нужды установок.

Создаваемая подсистема является частью системы паровой завесы трубчатой печи. Для ее реализации устанавливается дополнительный датчик давления на коллекторе паровой завесы, подключенный к контроллеру СПАЗ. Контроллер соединяется с блоком управления клапанами, обеспечивая автоматизированный сбор данных о давлении и формирование управляющих сигналов для поддержания установленных параметров, что отражено в блок-схеме на рис. 5.

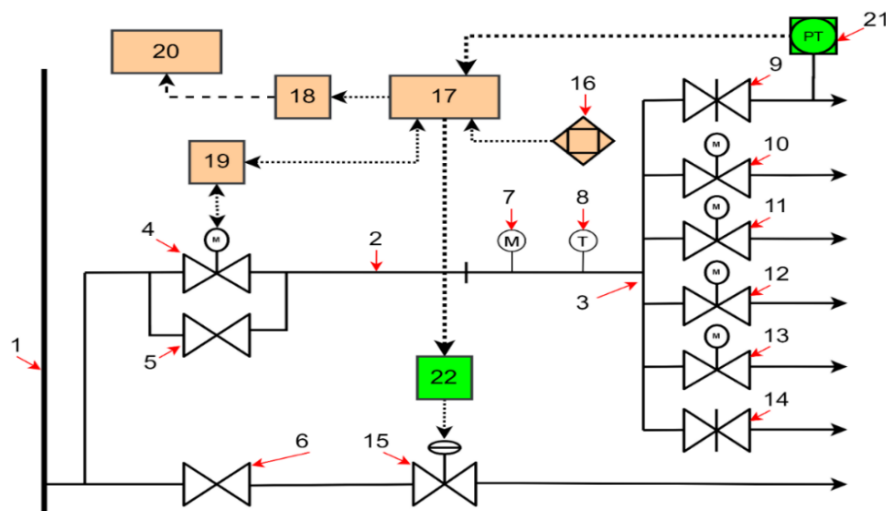


Рисунок 5 – Блок-схема трубопроводной развязки паровой защиты трубчатой печи с элементами автоматизации контроля и управления давлением пара в ПЗТП

На рис. 5 представлены следующие элементы: 1 – паропроводная сеть предприятия; 2 – подводящий трубопровод; 3 – распределительный коллектор; 4 – главная электрозадвижка системы паровой защиты; 5 – резервная ручная задвижка; 6 – проходной кран ввода пара на установку; 7 – манометр; 8 – термометр; 9 – ручная задвижка на линии паровой завесы; 10–14 – запорная арматура других систем паровой защиты; 15 – регулирующий клапан ввода пара на технологическую установку; элементы подсистемы: 16 – газоанализатор; 17 – котроллер СПАЗ; 18 – коммутатор сети; 19, 22 – блок управления и контроля положения электрозадвижки (клапана); 20 – АРМ оператора технологической установки; 21 – датчик давления пара.

Для построения математической модели процесса управления давлением пара в системе ПЗТП ТУ ГДТ были использованы уравнения материального баланса. Модель учитывает расход пара, потери на трение в трубопроводах, а также зависимость расхода пара от положения регулирующих клапанов. Для синтеза регулятора давления был выбран ПИД-регулятор с фильтром двойной скользящей средней (ДСС). Фильтр ДСС впервые используется в СПАЗ для повышения точности регулирования за счет фильтрации сигнала ошибки.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_i(t) = P_{\text{зад}} - P_i(t); \\ E_{ci}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t E_i(t); \\ E_{2ci}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t E_{ci}(t); \\ Y_i(t) = \frac{1}{P_{\text{зад}}} \cdot \left( E_i(t) + T_d \frac{dE_i(t)}{dt} + \frac{1}{T_{II}} \sum_{i=0}^n E_i(t) dt \right) \cdot 100\%; \\ Y_i(t) > 0; \\ G_{\text{вых}}(t) = A_{\text{кл}} \cdot v_{\text{кл}} \cdot \rho \cdot \left( (x_{\text{элов}}(t) + Y_i(t)) + (x_{\text{гн}}(t) + Y_i(t)) + \right. \\ \left. + (x_{\text{гк}}(t) + Y_i(t)) + (x_{\text{гдт}}(t) + Y_i(t)) \right) + G_{\text{пз}}; \\ P_i(t) = P_{i-1}(t) + \frac{R_{\text{пар}} T}{V} \cdot (G_{\text{вх}}(t) - G_{\text{вых}}(t)) - \frac{0,8125 \cdot l \cdot \lambda \cdot G_{\text{вых}}^2(t)}{d^5 \cdot \rho}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $E_i(t)$  – ошибка регулирования на момент времени  $t$ , атм;  $P_{\text{зад}}$  – заданное значение давления пара в ПЗТП, атм;  $P_i(t)$  –  $i$ -ое значение текущего давления пара на момент времени  $t$ , атм;  $E_{ci}(t)$  –  $i$ -ое значение скользящей средней текущей ошибки регулирования в момент времени  $t$ , атм;  $E_{2ci}(t)$  –  $i$ -ое значение двойной скользящей средней текущей ошибки регулирования в момент времени  $t$ , атм;  $N$  – количество точек или ширина по которым рассчитывается скользящее среднее и ДСС текущей ошибки регулирования;  $Y_i(t)$  – управляющий сигнал регулятора, %;  $T_d$  – постоянная времени дифференцирования, с;  $dE_{2ci}(t)$  –  $i$ -ое значение разности фильтра ДСС текущей ошибки регулирования в момент времени  $t$ , атм;  $dt$  – разность между

периодами измерений датчиком давления пара, с;  $T_H$  – постоянная времени интегрирования, с;  $\sum_{i=0}^n E_{2ci}(t)dt$  – накопленное  $i$ -ое значение суммы рассогласований фильтра ДСС в момент времени  $t$ , атм;  $G_{\text{вых}}(t)$  – выходящий массовый расход пара на момент времени  $t$ , кг/с;  $A_{\text{кл}}$  – максимальная площадь проходного сечения клапана, м<sup>2</sup>;  $v_{\text{кл}}$  – скорость потока при максимальном расходе через клапан, м/с;  $\rho$  – плотность насыщенного пара, кг/м<sup>3</sup>;  $x_{\text{элов}}(t)$  – текущее положение регулирующего клапана подачи пара на технологические нужды электрообессоливающей установки;  $x_{\text{ГН}}(t)$  – текущее положение регулирующего клапана подачи пара на технологические нужды установки гидроочистки нефти;  $x_{\text{ГК}}(t)$  – текущее положение регулирующего клапана подачи пара на технологические нужды установки гидроочистки керосина;  $x_{\text{ГДТ}}(t)$  – текущее положение регулирующего клапана подачи пара на технологические нужды установки гидроочистки дизельного топлива;  $G_{\text{ПЗ}}$  – массовый расход пара для паровых завес трубчатых печей комплекса нефтепереработки, кг/с;  $P_{i-1}(t)$  – начальное значение давления пара в начале участка паропровода на момент времени  $t$ , атм;  $R_{\text{пар}}$  – универсальная газовая постоянная для водяного пара при рабочем давлении, Дж/кгК;  $T$  – температура пара, К;  $V$  – объем паропровода, м<sup>3</sup>;  $G_{\text{вх}}(t)$  – входящий массовый расход пара на момент времени  $t$ , кг/с;  $l$  – длина участка паропровода, м;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $d$  – условный диаметр паропровода, м.

На основе модели (1) создана программа для ЭВМ «Программный модуль автоматической системы контроля и поддержки давления пара противопожарной ПЗТП» (программный модуль), интерфейс которой представлен на рис. 6.

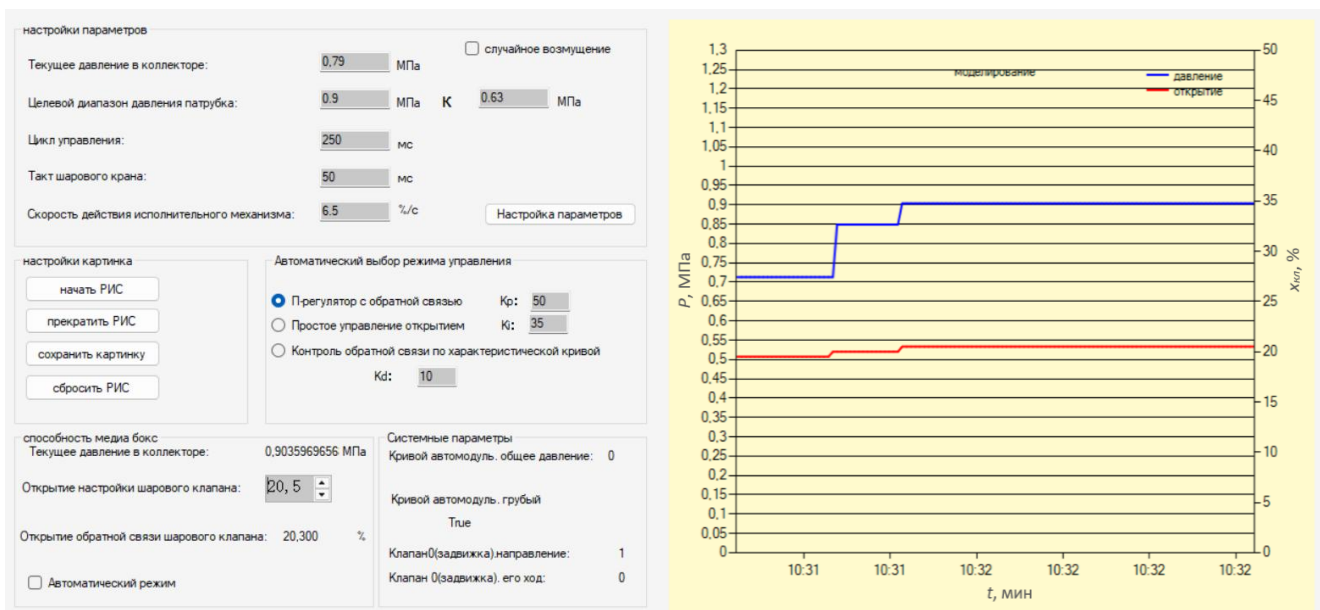


Рисунок 6 – Интерфейс программного модуля

Программный модуль функционирует в двух режимах: реальном времени (на основе данных датчиков давления) и моделирования. В режиме моделирования программный модуль, используя математическую модель, определяет ошибку регулирования давления, обрабатывает ее с помощью фильтра ДСС и рассчитывает необходимое положение регулирующих клапанов. Далее на основе модели выполняются расчеты изменения массы и давления пара в паропроводе с учетом потерь на трение. Алгоритм работы программного модуля в режиме моделирования представлен на рис. 7.

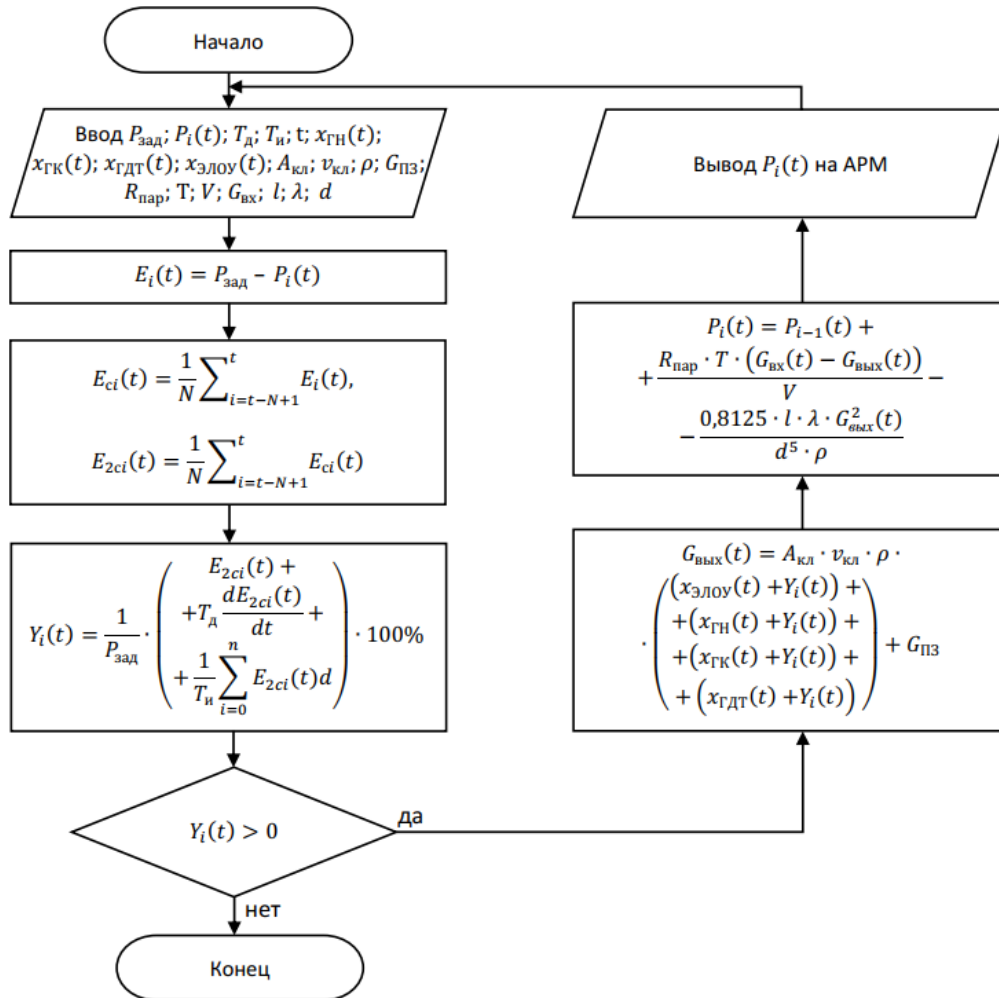


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма функционирования программного модуля в режиме моделирования

Ввиду непрерывной эксплуатации трубчатых печей и невозможности проведения реальных экспериментов на действующем оборудовании, процесс управления давлением пара в системе паровой завесы трубчатой печи был изучен с помощью компьютерного моделирования. Моделирование осуществлялось с частотой дискретизации 1 Гц (период измерения датчика давления 1 секунда). Для настройки ПИД-регулятора были выбраны следующие наиболее оптимальные параметры: постоянная времени интегрирования 5 секунд и постоянная времени дифференцирования в диапазоне от 8 до 10 секунд.

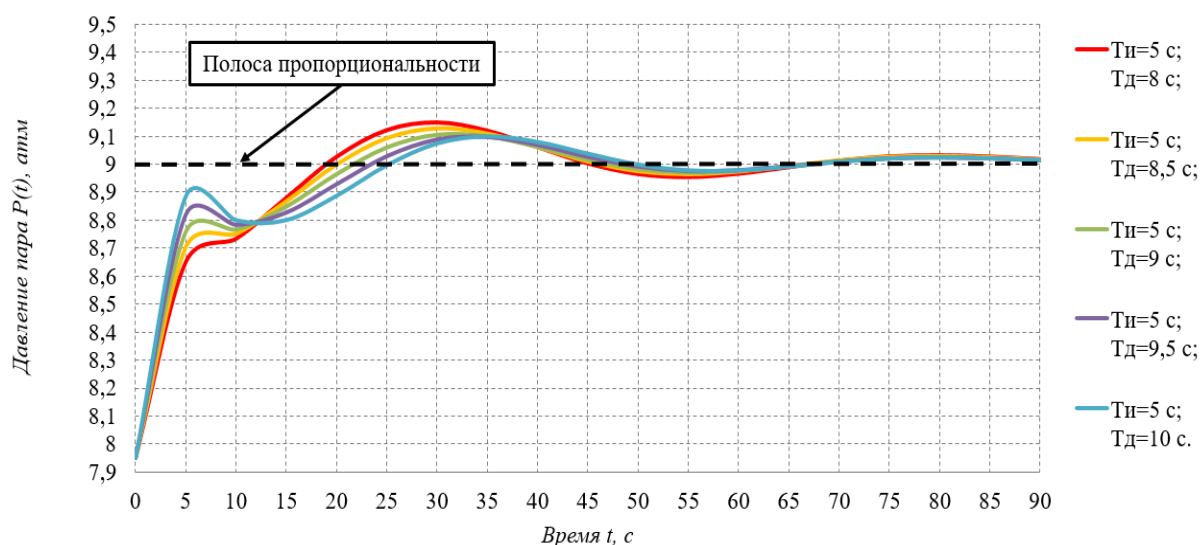


Рисунок 8 – Результаты моделирования управления ПИД-регулятором

Результаты моделирования (рис. 8) показали, что время регулирования (время достижения установившегося значения) составляет от 18 до 25 секунд. На графиках наблюдаются колебания, связанные с процессами интегрирования и пропорционального регулирования.

При использовании выбранных значений параметров ПИД-регулятора было проведено исследование влияния размера ширины фильтрации сигнала ошибки на качество регулирования. Результаты показали, что наилучшие результаты достигаются при минимальном размере окна фильтрации. На рис. 9 представлены графики изменения ошибки регулирования для различных значений размера ширины фильтрации от 2 до 15 порядков.

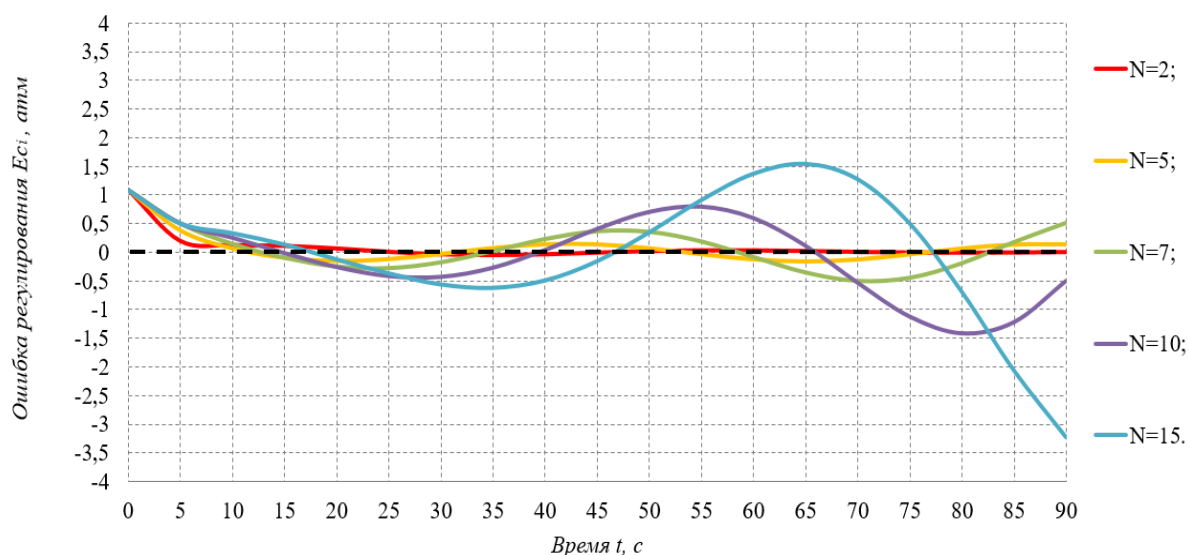


Рисунок 9 – Результаты измерения текущей ошибки регулирования при разных значениях ширины фильтрации скользящей средней

Результаты моделирования управления ПИД-регулятором с существующим методом фильтрации скользящей средней текущей ошибки регулирования второго порядка представлены на рис. 10.

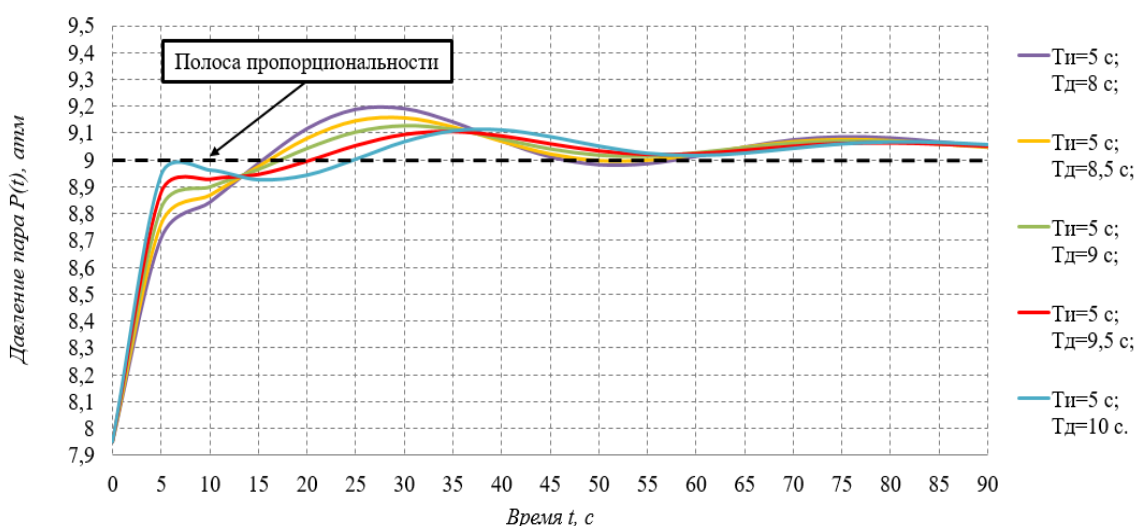


Рисунок 10 – Результаты моделирования управления ПИД-регулятором с фильтрацией скользящей средней

Результаты моделирования динамики системы регулирования давления пара, представленные на рис. 10, показали, что время регулирования составляет от 15 до 25 секунд. Для улучшения качества регулирования был применен фильтр двойной скользящей средней (ДСС). Результаты моделирования с использованием фильтра представлены на рис. 11. Анализ полученных данных позволил оценить эффективность разработанного алгоритма управления, представленного на рис. 7.

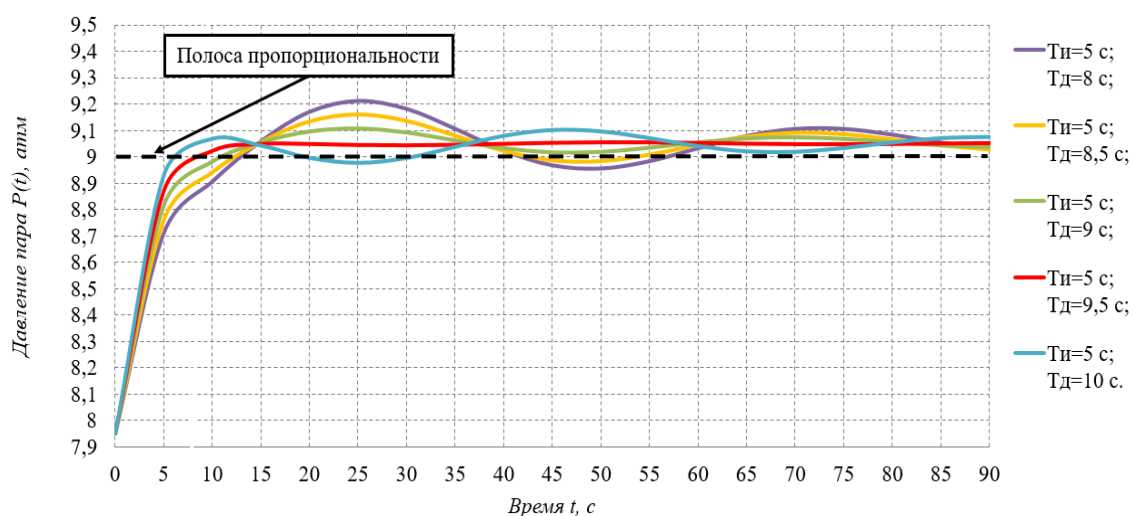


Рисунок 11 – Результаты моделирования управления ПИД-регулятором с фильтрацией ДСС

Результаты моделирования, представленные на рис. 11, показали, что время установления регулируемой величины при использовании предложенного алгоритма управления составляет от 6 до 13 секунд. Для сравнения на рис. 12 представлены результаты моделирования с использованием базового ПИД-регулятора, ПИД-регулятора с фильтром скользящей средней (СС) и ПИД-регулятора с фильтром двойной скользящей средней (ДСС). Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что предложенный алгоритм с фильтром двойной скользящей средней обеспечивает более быстрое и точное регулирование.

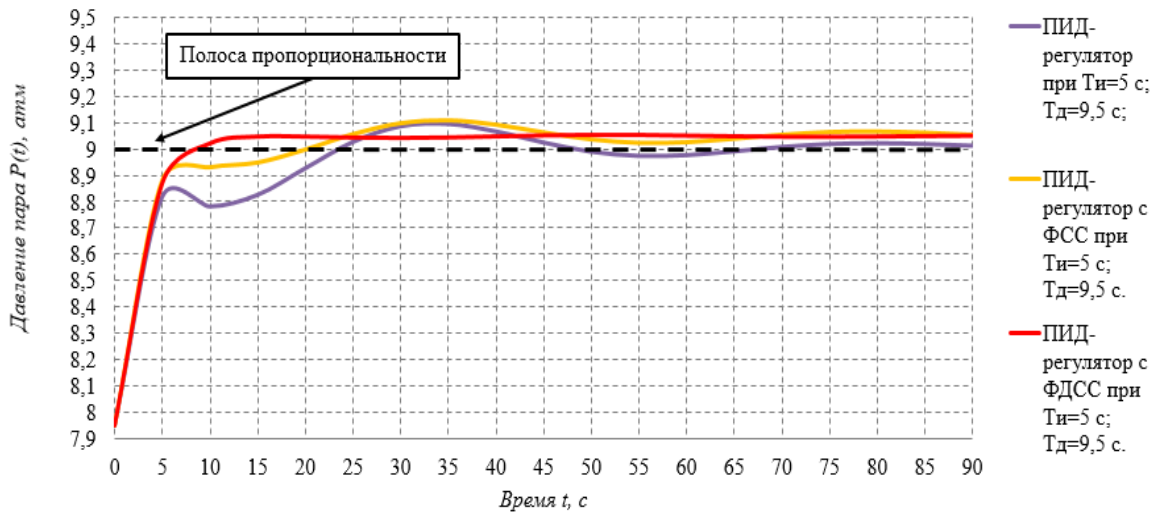
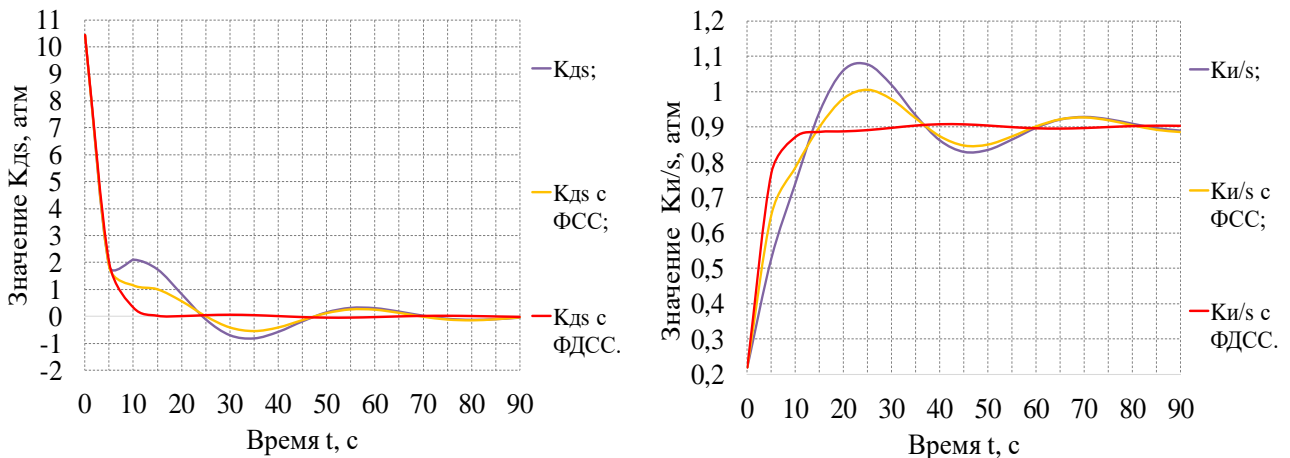


Рисунок 12 – Сравнительные результаты моделирования управления ПИД-регулятором без фильтрации, с фильтрацией СС и ДСС

Результаты сравнительного анализа, представленные на рис. 12, демонстрируют, что применение фильтра двойной скользящей средней (ДСС) позволило сократить время регулирования на 61% по сравнению с фильтром скользящего среднего (СС), снизив его с 18 до 7 секунд. Такое существенное ускорение переходных процессов объясняется более эффективным подавлением высокочастотных помех фильтром ДСС, что приводит к уменьшению влияния производной составляющей в выходном сигнале ПИД-регулятора. Динамика изменения составляющих выходного сигнала регулятора при использовании различных фильтров представлена на рис. 13.



а) Дифференциальная функция  $K_{дs}$

б) Интегральная функция  $K_{и/s}$

Рисунок 13 – Динамика изменения дифференциальной и интегральной функций ПИД-регулятора в процессе моделирования процесса управления давлением пара

Для подтверждения адекватности модели, основанной на ПИД-регуляторе с фильтром двойной скользящей средней, был проведён регрессионный анализ. Результаты сравнивались с данными моделирования по традиционным схемам управления (ПИД-регулятор, ПИД-регулятор с фильтром скользящего среднего) и

с экспериментальными результатами других исследователей, опубликованных в научных изданиях. Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,86$  подтвердил высокое соответствие модели и ее пригодность для описания процесса регулирования давления пара в ПЗТП ТУ ГДТ.

В третьей главе «Расчет показателей надежности и оценка эффективности» для оценки показателей надежности и безопасности подсистемы, учитывая ее структурную сложность, был применен метод автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ). Моделирование проводилось с использованием программного комплекса АРБИТР. В качестве исходных данных для моделирования были использованы значения средней наработки на отказ ( $T_{Oi}$ ) и среднего времени восстановления ( $T_{Bi}$ ) элементов, входящих в структуру подсистемы (рис. 14). Значения  $T_{Oi}$  и  $T_{Bi}$  были определены на основе паспортных данных аналогичных элементов, учитывая условия эксплуатации подсистемы.

Логическими критериями функционирования подсистемы определены:

$$Y_{F-1} = y_{20} - \text{условие реализации функции F-1}; \quad (2)$$

$$Y_{F-2} = y_{24} - \text{условие реализации функции F-2}. \quad (3)$$

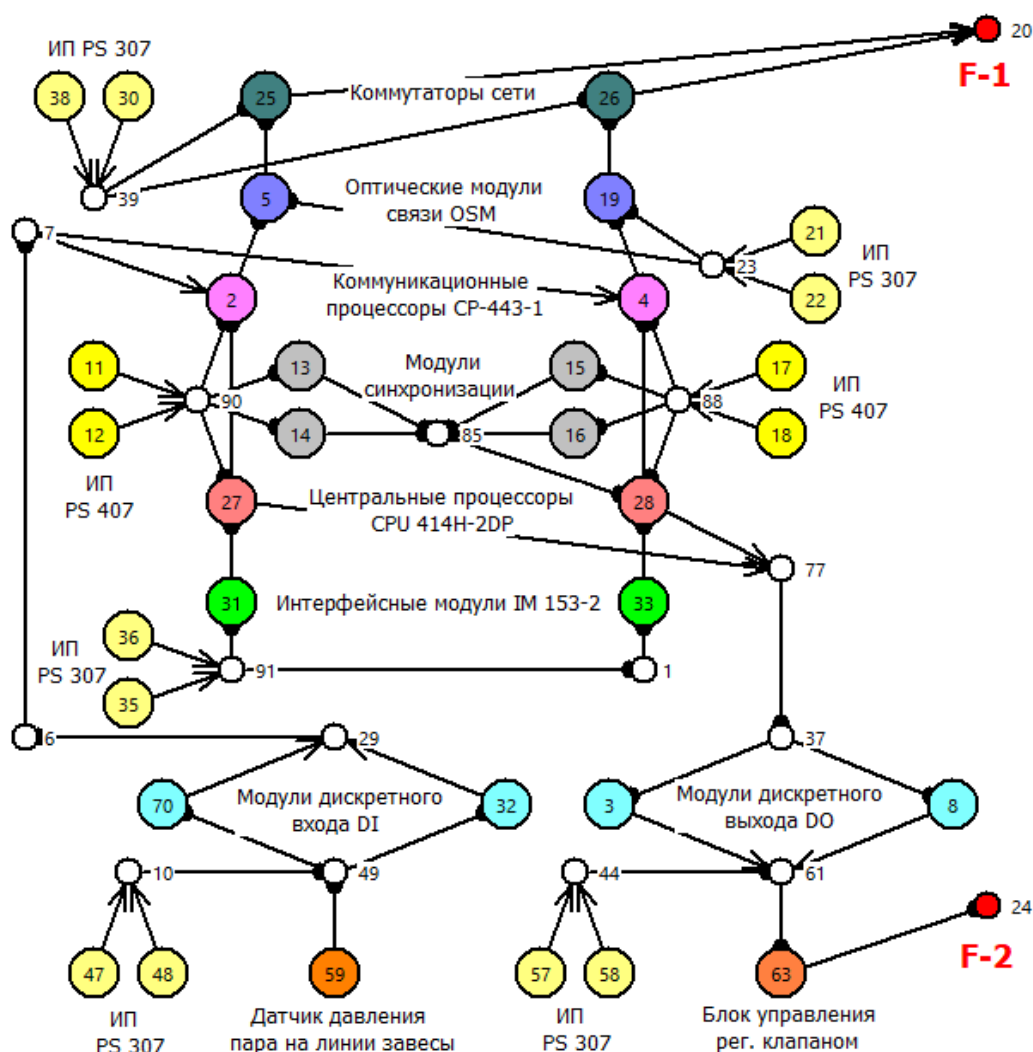


Рисунок 14 – Схема функциональной целостности подсистемы

Для оценки надежности и безопасности подсистемы построены логико-аналитические и логико-вероятностные модели контуров функционирования. Логико-аналитическая модель, представленная функцией работоспособности системы (ФРС), позволила определить все возможные сценарии отказа системы. Логико-вероятностная модель, основанная на анализе кратчайших путей успешного функционирования (КПУФ), позволила оценить вероятность безотказной работы подсистемы. Для каждого из двух рассматриваемых критериев надежности (2 и 3) были определены соответствующие наборы КПУФ. Например, для критерия (2) было определено 192 КПУФ, а для критерия (3) – 48 КПУФ. Ниже представлен фрагмент из первых 10 наиболее значимых КПУФ для критерия (2):

$$y_{20} = \begin{aligned} & x_{11} x_{27} x_{31} x_{35} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{21} x_{32} x_{25} x_{38} \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{36} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \\ & \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{36} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{30} \vee x_{12} x_{27} x_{31} x_{35} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \\ & \vee x_{12} x_{27} x_{31} x_{35} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{30} \vee x_{12} x_{27} x_{31} x_{36} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \\ & \vee x_{12} x_{27} x_{31} x_{36} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{30} \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{35} x_{47} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \\ & \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{35} x_{47} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{30} \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{36} x_{47} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $x_i$  – представление реализации своей функции  $i$ -ым элементом в подсистеме на рис. 14;

$x_i x_j$  – комбинация реализации своей функции  $i$ -ым и  $j$ -ым элементами в подсистеме на рис. 14 с логической операцией «И»;

$\vee$  – логическая операция «ИЛИ».

Многочлен вероятностной функции (ВФ) безотказной работы подсистемы по функции  $F-1$  ( $P_{F-1}(t)$ ) состоит из 320 и для  $F-2$  состоит из 80 одночленов и ниже представлен фрагмент из первых 10 наиболее значимых для критерия (2):

$$P_{F-1} = \begin{aligned} & p_{11} q_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} p_{32} p_{26} q_{30} p_{38} + \\ & + p_{11} q_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} p_{26} q_{30} p_{38} + \\ & + p_{11} q_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{16} p_{17} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} p_{32} p_{26} q_{30} p_{38} + \\ & + p_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} p_{32} p_{26} q_{30} p_{38} + \\ & + p_{11} q_{12} p_{27} p_{31} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_2 p_5 q_{21} p_{22} p_{32} p_{25} q_{30} p_{38} + \\ & + p_{11} q_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} p_{21} p_{32} p_{26} q_{30} p_{38} + \\ & + p_{11} q_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} q_{70} p_{47} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} p_{32} p_{26} q_{30} p_{38} + \\ & + p_{11} q_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} p_{32} p_{26} q_{30} p_{38} + \\ & + p_{11} q_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} p_{32} p_{26} q_{30} p_{38} + \\ & + p_{11} q_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{16} p_{17} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} p_{26} q_{30} p_{38} \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $p_i$  – числовое значение вероятности безотказной работы  $i$ -го элемента;

$q_i$  – числовое значение вероятности отказа  $i$ -го элемента.

Результаты расчета вероятностей безотказной работы ( $P_{BF}$ ) и отказа ( $P_{AC}$ ) подсистемы представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчета надежности и безопасности

Определяемый параметр	По функции $F-1$	По функции $F-2$
ФРС/ВФ	192/320	48/80
$KГ_F$	0,99999	0,99997
$T_{OF}$ , год	56,93	11,4

Продолжение таблицы 1

$T_{BF}$ , ч.	1,99964	1,99997
$P_{BF}(t)$	0,98260	0,41594
$P_{AC}(t)$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$5,84 \cdot 10^{-1}$

где ФРС – функция работоспособности системы;

ВФ – вероятностная функция;

$K\Gamma_F$  – коэффициент готовности подсистемы по заданной функции  $F$ ;

$T_{OF}$  – средняя наработка на отказ подсистемы по заданной функции  $F$ ;

$T_{BF}$  – среднее время восстановления подсистемы по заданной функции  $F$ ;

$P_{BF}$  – вероятность безотказной работы подсистемы по заданной функции  $F$ ;

$P_{AC}$  – вероятность отказа подсистемы по заданной функции  $F$ .

Анализ результатов моделирования, представленных в табл. 1, показал, что значения вероятности отказа для рассматриваемых функций безопасности не соответствуют требованиям ГОСТ Р МЭК 61508-2–2012 для технологических блоков I категории взрывоопасности. Требования стандарта предусматривают уровень полноты безопасности 3, что соответствует вероятности отказа  $P_{AC}(t)$  в диапазоне от  $>10^{-4} - 10^{-3}$ . Полученные значения вероятности отказа выходят за пределы указанного диапазона, что свидетельствует о недостаточной безопасности рассматриваемых функций.

Проведен анализ отказоустойчивости подсистемы по критериям:

$$y''_{20} - \text{отказ функции } F-1; \quad (6)$$

$$y''_{24} - \text{отказ функции } F-2. \quad (7)$$

Полученная с помощью АСМ логико-аналитическая модель для критерия (6) содержит 57 конъюнкций, для критерия (7) содержит 19 конъюнкций. Ниже представлена логико-аналитическая модель для критерия (7):

$$y''_{24} = \underline{x''_{63}} \vee x''_{27} x''_{28} \vee x''_{28} x''_{31} \vee x''_{27} x''_{33} \vee x''_{14} x''_{27} \vee x''_{13} x''_{27} \vee x''_{16} x''_{27} \vee x''_{15} x''_{27} \vee x''_{31} x''_{33} \vee x''_{13} x''_{31} \vee x''_{14} x''_{31} \vee x''_{15} x''_{31} \vee x''_{16} x''_{31} \vee x''_3 x''_8 \vee x''_{11} x''_{12} \vee x''_{57} x''_{58} \vee x''_{35} x''_{36} \vee x''_{17} x''_{18} x''_{27} \vee x''_{17} x''_{18} x''_{31}. \quad (8)$$

где  $x''_i$  – условие невыполнения  $i$ -ым элементом своей функции;

$x''_i x''_j$  – условие невыполнения в комбинации  $i$ -ым  $j$ -ым элементами своих функций с логической операцией «И»;

$\vee$  – логическая операция «ИЛИ».

Анализ логико-аналитических моделей показал, что отказ функций  $F-1$  и  $F-2$  может быть вызван различными комбинациями отказов элементов. При этом, для отказа функции  $F-1$  существует 57, а для функции  $F-2$  – 19 минимальных наборов отказов элементов, т.е. таких наборов, при которых функция перестает выполняться. Анализ этих наборов выявил, что элементы 59 (датчик давления пара) и 63 (блок управления клапанами) являются наиболее критичными для обеих функций. Отказ любого из этих элементов приводит к нарушению работоспособности подсистемы по соответствующим критериям.

Для повышения надежности и отказоустойчивости подсистемы было выполнено резервирование элементов 59 и 63. Результаты моделирования,

представленные в табл. 2, демонстрируют значительное улучшение показателей надежности после внедрения резервирования.

Таблица 2 – Результаты расчета надежности и безопасности резервированной подсистемы

Определяемый параметр	По функции $F-1$	По функции $F-2$
ФРС/ВФ	384/640	96/160
$KГ_F$	0,99999	0,99999
$T_{OF}$ , год	$4,4 \cdot 10^4$	$9,3 \cdot 10^4$
$T_{BF}$ , ч.	1,7	1,4
$P_{BF}(t)$	0,99996	0,99964
$P_{AC}(t)$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$

Результаты сравнительного анализа, представленные в таблицах 1 и 2, показали, что резервирование датчика давления пара и блока управления регулирующими клапанами позволило существенно повысить надежность подсистемы. Вероятность безотказной работы подсистемы за время  $t$  ( $P_{BF}(t)$ ) по функции  $F-1$  увеличилась в среднем на 2%, а по функции  $F-2$  – в 2,4 раза. Вероятность отказа подсистемы за время  $t$  ( $P_{AC}(t)$ ) по обеим функциям снизилась до значений, удовлетворяющих требованиям ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 для уровня полноты безопасности 3.

Для оценки эффективности предложенных технических решений была использована методика, основанная на сочетании метода Гретенера и метода анализа иерархий. Этот подход позволяет сравнивать различные варианты технических решений по комплексу критериев. Для оценки эффективности разработанных технических решений была построена иерархическая модель, представленная на рис. 15. Данная модель расширена за счет включения параметра наличия паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара ( $s_8$ ), что позволит более точно оценить вклад предлагаемых решений в общую эффективность системы противопожарной защиты.

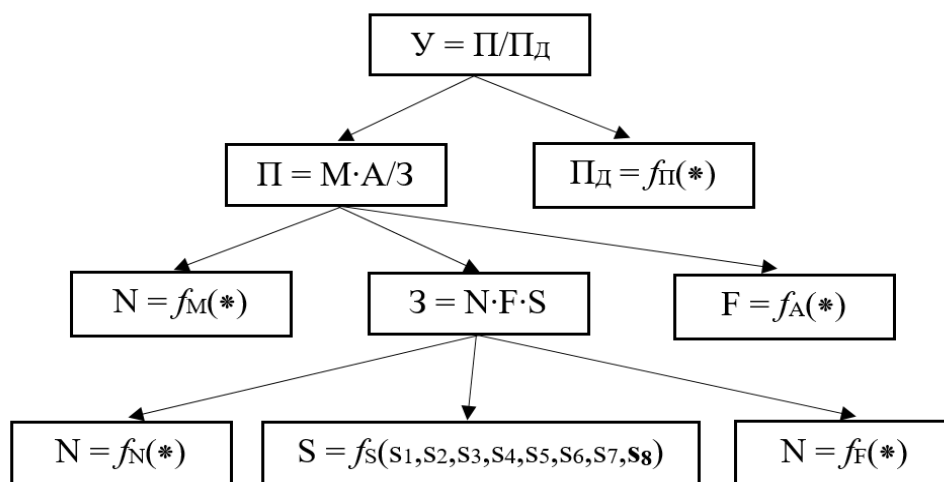


Рисунок 15 – Иерархия показателей эффективности системы противопожарной защиты

Основным показателем пожароопасности объекта в методе Гретенера является уровень пожароопасности  $У$ . Если рассчитанное значение показателя пожароопасности  $П$  не превышает допустимого значения пожароопасности  $П_d$  и, соответственно,  $У < 1$ , объект считается достаточно защищенным. В противном случае, при  $У > 1$ , объект имеет повышенную пожароопасность. Ниже по иерархии на рис. 15 представлены:  $M$  – потенциальная опасность;  $A$  – параметр активации;  $З$  – параметр противопожарной защиты;  $N$  – выполнение нормативных требований по обеспечению противопожарной защиты объекта;  $F$  – влияние огнестойкости строительных конструкций объекта;  $S$  – специальные мероприятия и технические средства по предотвращению, обнаружению, оповещению и тушению пожара на объекте;  $s_1$  – автоматизированные системы пожарной сигнализации и пожаротушения;  $s_2$  – вид средств передачи сигнала в пожарной пункт сигнала пожарной тревоги;  $s_3$  – готовность и уровень обеспеченности техническими средствами пожаротушения подразделений противопожарной службы, обслуживающих объект;  $s_4$  – тип установок автоматического пожаротушения;  $s_5$  – вид системы оповещения и эвакуации людей;  $s_6$  – вид системы водяного орошения при пожаре;  $s_7$  – системы цифрового телевидения, интегрированного в автоматизированную систему противопожарной защиты объекта;  $s_8$  – паровые завесы трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара (дополнительно внедряемый). Запись вида  $П_d = f_{п}(* )$  означает, что дальнейшее уточнение данной формулы не представляет важности для оценки эффективности.

Для оценки влияния параметра  $s_8$  на показатель  $S$  требуется вычислить величину данного показателя в случае применения и без него. По разности  $\Delta S$  можно судить о вкладе в численное значение показателя  $S$ , то есть о технической эффективности. Определено отношение внедряемого параметра на вероятностно-временные показатели эффективности системы противопожарной защиты ННП.

Оценка эффективности системы противопожарной защиты проводилась в три этапа:

1. Анализ взаимосвязей: была построена модель взаимосвязей между различными параметрами системы, такими как вероятность возникновения пожара, время обнаружения, время прибытия пожарных и др. Для оценки относительной важности этих параметров были построены матрицы парных сравнений. Экспертам предлагалось сравнивать пары параметров и оценивать, насколько один параметр важнее другого по шкале от 1 до 9.

2. Сбор и обработка экспертных оценок: мнения экспертов по относительной важности параметров были формализованы с использованием метода аналитических иерархий. Было проведено как индивидуальное, так и групповое экспертное оценивание. Согласованность групповых оценок проверялась с помощью критерия Стьюдента. В результате были получены весовые коэффициенты для каждого параметра, отражающие его относительную важность.

3. Расчет интегрального показателя эффективности: на основе полученных весовых коэффициентов и вероятностно-временных характеристик системы был рассчитан интегральный показатель эффективности. Этот показатель представляет

собой взвешенную сумму частных показателей эффективности, соответствующих различным аспектам функционирования системы. Результаты расчетов представлены в табл. 3, где для каждого варианта системы приводится значение интегрального показателя эффективности. Чем выше значение этого показателя, тем эффективнее система.

Таблица 3 – Вес элементов частных параметров S

S	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>
Z	0,459	0,02	0,013	0,018	0,027	0	0,354	0,12

Исходя из иерархии показателей эффективности ПЗТП с функциями контроля и управления давлением пара, представленной на рис. 15, для определения относительной эффективности по показателю  $s_i$  транспонированы формулы следующим образом:

$$\Delta Z = N \cdot F \cdot S, \quad (9)$$

$$\Delta \Pi = \frac{M \cdot A}{3} = \frac{M \cdot A}{3 \cdot (1 - \Delta S)} = \frac{M \cdot A}{3} \cdot \frac{1}{(1 - \Delta S)}, \quad (10)$$

$$\Delta Y = -\left(1 - \frac{1}{(1 - \Delta S)}\right) \cdot \frac{\Delta \Pi}{\Pi_d}, \quad (11)$$

$$\Xi = \frac{1}{(1 - \Delta S)} - 1 = \frac{\Delta S}{1 - \Delta S}. \quad (12)$$

Зная осредненное значение, по семи экспертам приращение параметра  $S$  за счет применения ПЗТП с функциями контроля и управления давлением пара  $\Delta S = 0,12$ , определенное по формуле (12) приращение уровня пожарной безопасности составит 13,6 %.

**В приложениях** представлены свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023618750 «Программный модуль автоматической системы контроля и поддержки давления пара противопожарной паровой завесы трубчатой печи», результаты расчетов экспертной оценки и акты внедрения в практическую деятельность ТОО «Kyzylorda Refinery» и АО «Страховая компания «Freedom Finance Insurance», научную деятельность и учебный процесс Академии гражданской защиты им. М.Габдуллина МЧС Республики Казахстан.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель процесса управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с фильтрацией текущей ошибки регулирования методом двойного скользящего среднего.

2. Разработан алгоритм функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической

установки гидроочистки дизельного топлива с фильтрацией текущей ошибки регулирования методом двойного скользящего среднего. Этот алгоритм позволил улучшить качество и сократить время переходных процессов на 61 % по сравнению с существующим методом фильтрации скользящей средней.

3. Получены логико-аналитические и логико-вероятностные модели контуров подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива. На основании анализа данных моделей выполнено резервирование наиболее уязвимых элементов системы, что привело к увеличению вероятности безотказной работы подсистемы по функции  $F-1$  в среднем на 2 % и по функции  $F-2$  в 2,4 раза. Значительно снижена вероятность отказа по функциям  $F-1$  и  $F-2$ , а также получены значения, соответствующие требованиям к функциональной безопасности.

4. На основе методики определения уровня пожароопасности объектов нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности получен параметр наличия паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара. С использованием данного параметра достигнуто увеличение показателя, отражающего наличие специальных мероприятий и технических средств по предотвращению, обнаружению, оповещению и тушению пожара, что позволило снизить уровень пожароопасности объекта на 13,6 %.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Оспанов, К. К. Анализ статистики и причинно-следственных связей аварий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности России и Казахстана [Электронный ресурс] / А. В. Федоров, К. К. Оспанов, Е. Н. Ломаев [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – № 2(92). – doi.org/10.25257/TTS.2021.2.92.156-168. – Режим доступа: [elibrary.ru/download/elibrary\\_46411321\\_31799294.pdf](http://elibrary.ru/download/elibrary_46411321_31799294.pdf).

2. Оспанов, К. К. Анализ риска аварий на примере установки гидроочистки дизельного топлива [Электронный ресурс] / К. К. Оспанов // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 12. – doi: 10.25728/avtprom.2021.12.07. – Режим доступа: [avtprom.ru/article/analiz-riska-avarii-na-primere-u](http://avtprom.ru/article/analiz-riska-avarii-na-primere-u).

3. Оспанов, К. К. Контроль и поддержание параметров эффективного функционирования паровой завесы трубчатой печи / А. В. Федоров, Д. Н. Рубцов, К. К. Оспанов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. – 2023. – № 2. – С. 73–80. – doi:10.25257/FE.2023.2.73-80.

4. Оспанов, К. К. Модель и алгоритм управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива [Электронный ресурс] / К. К. Оспанов // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 6 (2024). – Режим доступа: [IVD\\_12N6y24\\_ospanov.pdf\\_aae44e530e.pdf](http://IVD_12N6y24_ospanov.pdf_aae44e530e.pdf).

5. Оспанов, К. К. Повышение надежности подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива [Электронный ресурс] /

К. К. Оспанов // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 3 (2025). – Режим доступа: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_5N4y25\\_ospanov.pdf\\_0b5de97a3c.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_5N4y25_ospanov.pdf_0b5de97a3c.pdf).

**Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ:**

6. Оспанов, К. К. Программный модуль автоматической системы контроля и поддержки давления пара противопожарной паровой завесы трубчатой печи [Текст] : заявка 2023617369 Рос. Федерация / К. К. Оспанов, Х. А. М. Н. Малфи ; свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ. – № 2023618750 ; заявл. 14.04.2023 ; опублик. 28.04.2023, Бюл. № 5. – 1 с.

**В других научных изданиях:**

7. Оспанов, К. К. Статистическая обработка данных аварийных событий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности Российской Федерации за период 2010–2019 годы [Текст] / К. К. Оспанов, А. В. Федоров // Сборник тезисов и докладов X-ой Международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести», Кокшетау, 14–18 сентября 2021 г. – Кокшетау : АГЗ им. М. Габдуллина МЧС РК, 2021. – С. 210–213.

8. Оспанов, К. К. Функциональная структура автоматизированной системы управления взрывопожарной защитой технологической установки гидроочистки дизельного топлива [Текст] / К. К. Оспанов, А. В. Федоров // Сборник материалов X-ой Международного научного семинар-конференции «Пожарная безопасность в условиях современности», Кокшетау, 8–10 июня 2022 г. – Кокшетау : АГЗ им. М. Габдуллина МЧС РК. – 2022. – С. 59–64.

9. Оспанов, К. К. Интеграция систем противопожарной и противоаварийной защиты на нефтеперерабатывающем объекте [Текст] / К. К. Оспанов, А. В. Федоров // Материалы Международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2022. – № 31. – С. 406–411.

10. Оспанов, К. К. Автоматизация дистанционного контроля давления пара в системе паровой завесы технологической печи [Текст] / К. К. Оспанов, А. В. Федоров, Д. В. Кулькин // Проблемы техносферной безопасности : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – 2023. – № 12. – С. 190–195.

11. Оспанов, К. К. Оценка эффективности применения паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара [Текст] / К. К. Оспанов // Сборник тезисов и докладов XIV-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций», Кокшетау, 5 октября 2023 г. – Кокшетау: АГЗ им. М. Габдуллина МЧС РК, 2023. – С. 109–114.

12. Ospanov, K. K. Analytical review of emergency protection process for diesel fuel hydraulic treatment [Text] / A. V. Fedorov, K. K. Ospanov, V. G. Nehamkin // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration : Proceedings of the International Conference : Participants' reports in English, Beijing, 30 декабря 2021 года. – Beijing: Scientific publishing house Infinity, 2021. – P. 219–223.

Подписано в печать 21.05.2025 г. Формат 60x84/16.

Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № 117

Академия ГПС МЧС России. 129366, ул. Бориса Галушкина, 4