

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ
ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ
ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

Академия Государственной противопожарной службы

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)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Федоров Андрей Владимирович

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПАРОВОЙ ЗАВЕСЫ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ В СОСТАВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА.....	10
1.1. Анализ произошедших аварий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности Республики Казахстан.....	10
1.2. Анализ пожаровзрывоопасности технологической установки гидроочистки дизельного топлива на примере типового комплекса нефтепереработки.....	17
1.3. Аналитический обзор автоматизации системы управления технологическим процессом установки гидроочистки дизельного топлива.....	19
1.4. Анализ нормативных требований и методов проектирования паровых завес трубчатых печей.....	23
1.5. Анализ барьеров безопасности.....	28
1.6. Аналитический расчет гидродинамических параметров паропровода при работе систем паровых завес трубчатых печей.....	35
1.7. Анализ степени разработанности темы исследования.....	42
1.8. Постановка задач исследования.....	47
Выводы по главе 1.....	48
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ ПАРА В ПАРОВОЙ ЗАВЕСЕ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА.....	50
2.1. Функциональное обеспечение.....	50
2.2. Алгоритмическое обеспечение.....	53
2.3. Программное обеспечение.....	67
2.4. Моделирование процесса функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической	

установки гидроочистки дизельного топлива	69
2.5. Техническое обеспечение.....	80
Выводы по главе 2.....	83
ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	84
3.1. Моделирование и расчет показателей надежности.....	84
3.1.1. Выбор метода, технологии моделирования и расчета показателей надежности.....	84
3.1.2. Постановка задачи и проведение автоматизированного структурно-логического моделирования.....	89
3.1.3. Моделирование показателей надежности и безопасности.....	93
3.2. Оценка эффективности применения паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара.....	99
3.2.1. Выбор метода оценки эффективности.....	99
3.2.2. Оценка влияния частных параметров на вероятностно-временные показатели системы.....	105
3.2.3. Определение значимости показателей эффективности.....	109
Выводы по главе 3.....	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	117
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное). Свидетельство о государственной регистрации «Программный модуль автоматической системы контроля и поддержки давления пара противопожарной паровой завесы трубчатой печи».....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное). Результаты расчетов экспертной оценки.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное). Акты внедрения.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Эффективность и надежность функционирования систем паровой завесы трубчатых печей (ПЗТП), являющихся частью системы противоаварийной автоматической защиты (СПАЗ) технологических установок, критически важны для обеспечения безопасности на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях (ННП). Надежная работа ПЗТП является одним из ключевых аспектов обеспечения пожаровзрывобезопасности потенциально опасных производственных процессов при разгерметизации технологического оборудования под избыточным давлением. К таким процессам относится гидроочистка дизельного топлива. Этот процесс является наиболее массовым и протекает при высоких температурах (350–420 °С) и давлении (60 атм).

На сегодняшний день практика ликвидации аварий при разгерметизации технологического оборудования под избыточным давлением показывает одновременный запуск ПЗТП технологических установок в комплексе нефтепереработки. При таких авариях происходит образование и распространение по промышленной площадке пожаровзрывоопасного облака топливовоздушной смеси (ТВС). Одновременный запуск ПЗТП обуславливает значительное увеличение потребления пара из паропроводной сети предприятия. Этот фактор приводит к снижению давления пара ниже нормативно установленных показателей, необходимых для эффективного образования паровых струй ПЗТП. Особенно это проявляется на участке технологических установок гидроочистки дизельного топлива (ТУ ГДТ).

В ПЗТП, используемых на технологических установках ННП, в настоящее время отсутствуют технические средства автоматизации дистанционного измерения давления. Оперативный персонал вручную регулирует давление в паропроводной сети, снижая подачу пара на технологические нужды установок до увеличения объемов его производства. Такой подход не позволяет точно и

безошибочно определить необходимое управляющее воздействие на исполнительные устройства для стабилизации требуемых показателей.

Этот фактор связан с отсутствием нормативных требований к данному типу автоматизации, а также с отсутствием моделей и алгоритмов реализации функций контроля и управления давлением пара в ПЗТП. В связи с этим, исследования по построению подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ (подсистема) являются востребованными и актуальными.

Степень разработанности. Разработке научных основ автоматизации управления технологическим процессом, противоаварийной защиты на ННП посвящены работы: Бизюковой Е.Е. [3], Вахова Д.Н. [4], Воронина В.В. [8], Гумерова И.Ф. [18], Кадырова Р.Р. [23-25, 48], Коронатова Н.Н. [26, 37, 38], Каяшева А.И. [30, 31, 85], Пегушина С.Л. [79], Садыкова Х.А. [85, 112], Скворцова М.С. [89], Уваровой Н.А. [95]. Разработке противопожарной защиты рассматриваемых объектов посвящены работы: Топольского Н.Г. [76, 91–94], Фомина В.И. [108], Федорова А.В. [40, 41, 46, 64, 66, 68, 69, 73–75, 98–108,], Членова А.Н. [106, 110], Демехина Ф.В. [19, 40, 91, 110], Алешкова А.М. [101, 102, 105, 107], Лебедевой М.И. [40–43, 98, 102, 106], Iftekharul M. [118]. Разработке методов структурного анализа и повышения надежности систем приборной безопасности посвящены работы Можяева А.С. [52–54, 59, 60], Нозик А.А. [59, 60]. Разработке методов обеспечения противопожарной защиты трубчатых печей и исследованию параметров их эффективного функционирования посвящены работы: Абдрахимова Ю.Р. [1], Аскарлова И.В. [2], Венитиади Н.А. [6], Добротворского А.М. [20, 21], Катина В.Д. [28, 29], Насибуллина Р.Р. [55–58], Рахматуллиной А.Р. [84], Diaz-Ovalle C. [114, 115], Hartwig S. [117], Lopez P. [119], Marsegan C. [120], Sato K. [123].

Анализ и обобщение исследований в данной области показали, что в основном были изучены вопросы оптимального построения и интеграции систем противоаварийной и противопожарной защиты в составе автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП), а также параметры и методы оценки эффективного функционирования ПЗТП технологических

установок ННП. Однако, в настоящее время вопросы автоматизации контроля и управления давлением пара для обеспечения непрерывной и эффективной работы ПЗТП технологических установок ННП 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 математическими моделями и алгоритмами, которые могут быть использованы для развития подходов к управлению и исследованию параметрических характеристик систем паровой завесы 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 завесы 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 Академии гражданской защиты 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 Академии гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан на 2023 г.);

– в учебном процессе Академии гражданской защиты 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПАРОВОЙ ЗАВЕСЫ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ В СОСТАВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

1.1. Анализ произошедших аварий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности Республики Казахстан

Высокий уровень содержания опасных веществ и сложная структура технологических процессов нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов (НПЗ), согласно [61], относит данные предприятия к опасным производственным объектам I класса опасности. Аварии на производстве рассматриваемых объектов могут иметь крайне тяжелые последствия для персонала и проживающих вблизи жителей, окружающей природной среды и оборудования. В работе А. В. Федорова и др. авторов отмечается, что «для снижения количества аварий на объектах НПЗ прежде всего необходимо оценить частоту возникновения аварийных событий, причинно-следственные связи их возникновения путем аналитического обзора статистических сведений произошедших аварий» [68].

Анализ аварийных ситуаций, а также причинно-следственных связей их возникновения на НПЗ Республики Казахстан в период с 2014 по 2024 годы, представленный в исследованиях [68, 74], продемонстрировал, что ключевыми сценариями аварий, представляющими наибольшую опасность, являются следующие: аварийная загазованность; взрывы топливовоздушных смесей; пожары проливов. В рассматриваемый период было зафиксировано 85 аварий различных типов. Из общего числа случаев 68 аварий (что составляет 80 %) были связаны с пожарами, 7 аварий (8 %) произошли в результате взрывов, а выбросы опасных веществ наблюдались в 11 ситуациях (12 %). Отдельно стоит отметить, что наиболее значительный материальный ущерб в рамках рассматриваемого периода был зафиксирован в 2017 году (378 млн руб.), что связано с масштабностью и серьезностью аварий, произошедших в этом году.

Анализ, представленный в работах [68, 74], свидетельствует о том, что на исследуемых объектах наблюдается отсутствие устойчивой тенденции к снижению числа аварий, пострадавших лиц и материальных ущербов. Это указывает на сохраняющиеся риски и необходимость дальнейшего совершенствования мер безопасности.

На рассматриваемых объектах основными факторами, приводившими к смертельным исходам, выступали ожоги и травмы, полученные при падении с высоты. Согласно статистическим данным [68], ожоги стали причиной 69 % всех летальных случаев, что указывает на их доминирующую роль среди поражающих факторов. Вторым по значимости фактором, способствовавшим смертельным исходам, было падение с высоты, которое составило 19 % от общего числа трагических инцидентов.

Таблица 1.1 и рисунок 1.1 представляют детализированные статистические данные об изменениях в количестве аварий, ежегодных материальных ущербах, классификации аварий по типам, а также о несчастных случаях, включая происшествия со смертельным исходом, на ННП Республики Казахстан за период с 2014 по 2024 годы.

Таблица 1.1 – Статистические данные произошедших аварий на ННП Республики Казахстан за период с 2014 по 2024 годы

Год	Вид аварии			Число аварий в год	Материальный ущерб, млн руб.	Случаи со смертельным исходом		
	Взрыв	Пожар	Выброс опасных веществ			Термическое воздействие	Падение с высоты	Разрушение технического устройства
2014	1	7	3	11	115,5	2	–	–
2015	–	7	1	8	288,4	–	–	1
2016	1	5	–	6	0,6	2	–	–
2017	–	6	–	6	378	1	–	–
2018	1	11	2	14	340	2	1	–

Продолжение таблицы 1.1

2019	1	1	–	2	13,1	1	–	–
2020	2	5	1	8	184,2	–	–	1
2021	–	8	1	9	211,8	–	1	–
2022	1	7	2	10	242,8	1	–	–
2023	–	4	1	5	42,4	–	1	–
2024	–	6	–	6	145,4	2	–	–
2014–2024	7	67	11	85	1962,2	11	3	2

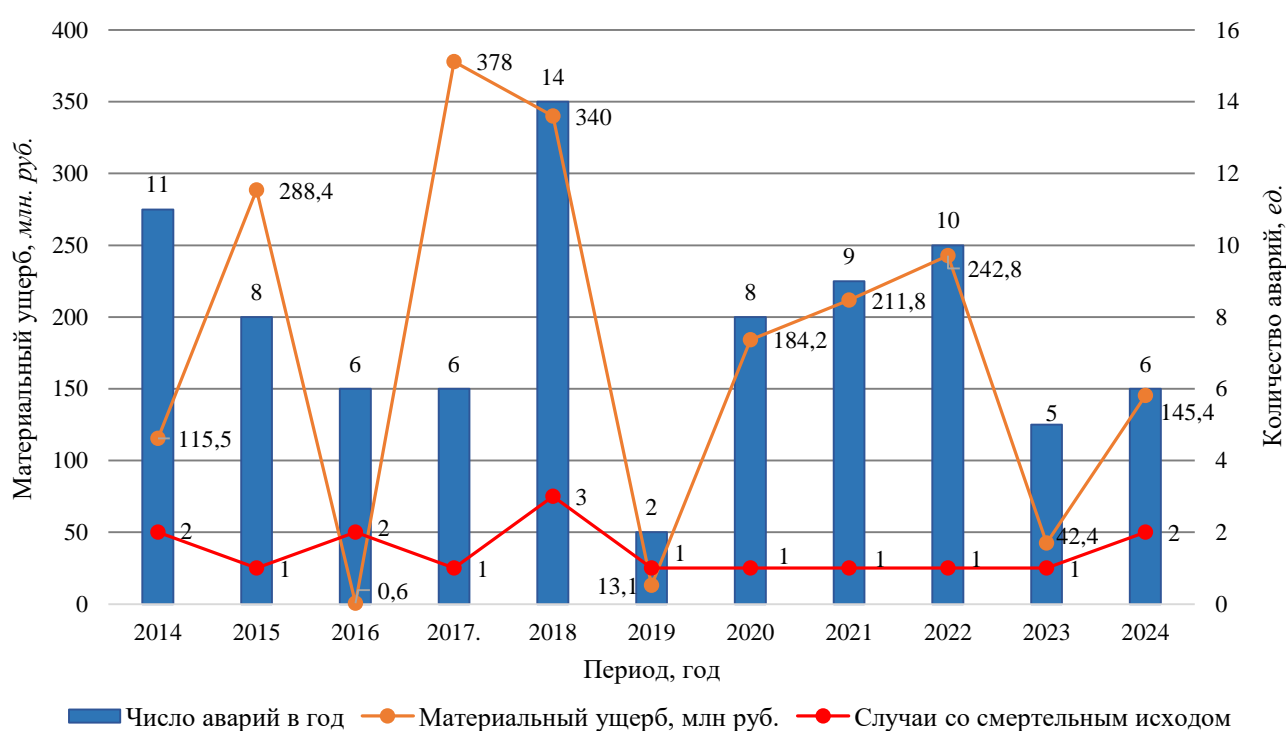


Рисунок 1.1 – Статистические данные аварий на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях Республики Казахстан за период 2014–2024 гг.

Анализ, проведенный в рамках исследования [68], выявил, что причины аварий на ННП обусловлены как техническими, так и организационными факторами. Ключевые технические причины возникновения аварий включают в себя несколько аспектов. Одной из основных проблем является значительный износ оборудования, зданий и сооружений, а также их конструктивные недостатки, которые существенно увеличивают вероятность возникновения аварийных ситуаций. Дополнительным фактором риска выступает недостаточное оснащение

производственных процессов автоматизированными системами дистанционного контроля, управления и противоаварийной защиты, что приводит к снижению эффективности мониторинга и оперативного реагирования на возникающие угрозы.

Активное развитие коррозионных процессов на технологическом оборудовании также играет значимую роль в формировании условий для возникновения аварий. Более того, несовершенство существующих технологий, используемых в производственных процессах и недостаточный уровень внедрения современных технических решений значительно повышают вероятность технических сбоев.

Согласно данным, представленным в исследовании [121], аварии на ННП нередко вызваны организационными причинами, которые варьируются по своей природе и степени влияния. Среди ключевых факторов выделяются ошибки, допущенные на этапе проектирования, которые составляют 22 % от общего числа причин. Отступление от установленных регламентов, параметров технологического процесса также является значительным источником риска и отмечается в 17 % случаев аварий [68].

Дополнительным фактором опасности выступают ошибки, совершаемые во время выполнения опасных видов работ, которые зафиксированы в 14 % аварий. Недостаточная подготовка, либо полное отсутствие обучения инженерно-технического персонала негативно сказываются на безопасности производства и приводили к 11 % аварий [68]. Столько же аварий связано с человеческим фактором, а именно с ошибками операторов [121].

Проблемы в организации управления технологическими процессами выявляются в 9 % случаев и также оказывают серьезное влияние на общую надежность работы систем. Ненадлежащее техническое обслуживание оборудования зафиксировано в 4 % аварий, а недостатки при проведении технического осмотра составляют 3 %. Низкий уровень производственного контроля встречается в 2 % случаев, а нарушение правил при проведении ремонтных и монтажных работ стало причиной 1 % аварий. Прочими факторами

обусловлены 6 % аварий, которые в совокупности указывают на необходимость комплексного подхода к организации безопасности на производстве [68].

Согласно данным [121], отказ оборудования является одной из ключевых причин возникновения крупных аварий в нефтеперерабатывающем и нефтехимическом секторах, составляя 44 % всех аварий. Значительное влияние на аварийность оказывают и природные явления, такие как наводнения, грозы и экстремальные погодные условия, включая низкие температуры и высокую влажность. Эти факторы в совокупности ответственны за 7 % всех зарегистрированных аварий, при этом 3 % аварий были вызваны исключительно природными явлениями, а 4 % произошли в результате их сочетания с отказом оборудования. Кроме того, в 9 % случаев причиной аварий стали редкие и случайные события, природу которых сложно предсказать или предотвратить [68].

Анализ причин аварий на ННП показывает, что преобладание организационных или технических факторов напрямую связано с возрастом производственных объектов [68]. Согласно мировой статистике крупных аварий на ННП за период с 1974 по 2019 годы, изложенной в работе [113], в первые 10 лет эксплуатации объекта большинство аварий связано с организационными причинами. Эти случаи преимущественно обусловлены недостатками в эксплуатации и отсутствием достаточного опыта управления сложными технологическими процессами. Однако по мере накопления опыта и совершенствования эксплуатационной практики количество таких аварийных ситуаций постепенно снижается.

Тем не менее, с увеличением возраста объекта возрастает риск технических неисправностей. Со временем старение оборудования становится ключевым фактором, вызывающим резкий рост числа аварий, связанных с нарушением технической целостности. Особенно это становится заметным на ННП, которые эксплуатируются более 30 лет. Согласно данным исследования [113], такие аварии составляют 65 % от общего числа аварий и зачастую сопровождаются значительными масштабами разрушений. Причины этого кроются в износе

оборудования, устаревших технологиях и недостаточном обновлении производственных мощностей.

Исторические сведения, приведенные в работе [27], указывают, что основные и крупнейшие ННП Казахстана были построены и введены в эксплуатацию в первые два десятилетия после окончания Великой Отечественной войны. Это означает, что большая часть объектов уже давно перешагнула порог 30-летнего возраста, что увеличивает вероятность аварий по техническим причинам.

Согласно статистическим данным, представленным в исследовании [121], подавляющее большинство крупных аварий на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслей происходит в процессе нормальной работы объектов. Такие случаи составляют 70 % от общего числа аварий, что подчеркивает высокую степень риска даже при стандартных условиях эксплуатации.

Оставшиеся 30 % аварий распределяются между различными этапами и операциями, связанными с техническим обслуживанием и управлением технологическими процессами. Например, во время проведения технического обслуживания оборудования фиксируется 13 % аварий. Еще 4 % аварий происходят в процессе испытаний, которые, несмотря на свою важность для обеспечения надежности систем, также связаны с определенными рисками.

Дополнительную опасность представляют ключевые фазы технологических операций, такие как остановка технологических процессов, на долю которой приходится 3 % аварий, и запуск оборудования, который сопровождается в 6 % аварийных случаев. Перезапуск после неполадок или плановых остановок также несет определенные риски и составляет 1 % от общего числа аварий.

Возникновение пожаров, взрывов и выбросов опасных веществ на ННП в большинстве случаев связано с процессами разгерметизации и повреждения технологического оборудования или аппаратов. Такие ситуации, как правило, приводят к утечке флюидов, что в зависимости от условий эксплуатации может вызвать образование топливоздушнoй смеси (ТВС). В дальнейшем ТВС может стать причиной мгновенного возгорания или взрыва, создавая серьезные угрозы

для безопасности людей, производства и окружающей среды.

Согласно исследованиям А.В. Федорова и др. авторов, «источниками воспламенения облака топливовоздушной смеси на наружных технологических установках нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий являются следующие: накопление и образование статической электроэнергии (15,1 %); искры образуемые при механическом трении и ударе металлических частей оборудования (14,5 %); высоконагретые до значительных температур поверхности, участки и составляющие оборудования (12,8 %); образование и активность пирофорных соединений (12,8 %); образование искр электрической энергии (10,8 %); раскаленные частички сплава (искры) выделяемые при проведении сварочных работ (9,9 %); термические проявления при нестабильном или неисправном режиме работы электрического оборудования (8,5 %); открытое пламя (8,1 %); термическое самовоспламенение (3,5 %); иные источники (4 %)» [68].

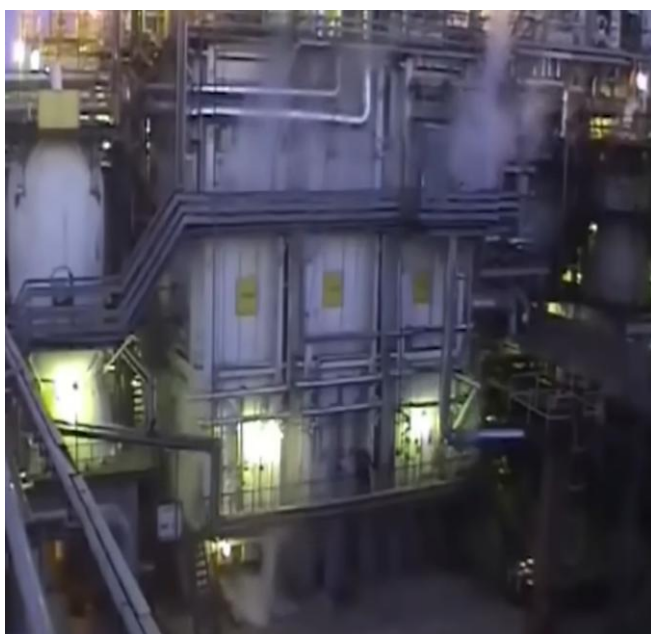
Эти данные отражают процентное соотношение каждого источника в общей статистике случаев воспламенения.

Исходя из вышеуказанного одним из основных источников зажигания необходимо отметить открытый огонь форсунок трубчатых печей (8,1 %) и нагретые элементы конструкции трубчатых печей (12,8 %).

В настоящее время основным техническим средством для изоляции источников зажигания в трубчатых печах является система паровой завесы трубчатой печи (ПЗТП). От эффективного функционирования ПЗТП зависит дальнейшее развитие аварийной ситуации.

Некачественная или неэффективная работа ПЗТП ведет к катастрофическим последствиям. Ярким примером неэффективной работы ПЗТП, согласно [99], является взрыв с последующим пожаром, произошедший 16 июня 2014 года на Ачинском НПЗ, в результате которого погибли восемь человек, материальный ущерб составил более 6 млрд рублей. Причиной аварии послужил отказ приборов контроля давления с последующей разгерметизацией трубопровода в шлемовой части колонны К-401 секции С-400 установки газофракционирования комплекса

первичной переработки нефти (КППН) ЛК–6У. Оперативным персоналом был осуществлен аварийный останов и одновременный запуск паровых завес трубчатых печей технологических установок, входящих в КППН ЛК–6У. На рисунке 1.2–а представлен процесс функционирования ПЗТП П–201 секции С–200 при аварии на Ачинском НПЗ в 2014 г. В результате дрейфа парогазовой смеси и некачественной работы ПЗТП П–201 секции С–200 установки каталитического крекинга произошел объемный взрыв (рисунок 1.2–б) [7, 99].



а) Процесс функционирования ПЗТП

б) Процесс распространения фронта
пламени при возгорании облака ТВС

Рисунок 1.2 – Процесс функционирования ПЗТП П–201 секции С–200 при аварии на Ачинском НПЗ в 2014 г. по материалам из видео [7]

1.2. Анализ пожаровзрывоопасности технологической установки гидроочистки дизельного топлива на примере типового комплекса нефтепереработки

Рассмотрим пожаровзрывоопасность технологической установки гидроочистки дизельного топлива (ТУ ГДТ) на примере установки, входящей в состав типового КППН ЛК-6У, эксплуатируемого Товариществом с ограниченной

ответственностью «Павлодарский нефтехимический завод» (ПНХЗ), расположенного в Республике Казахстан, город Павлодар. Работает КППН ЛК-6У по топливному варианту переработки нефти с проектной производственной мощностью 6 млн т/год. Производственная мощность входящей в комплекс ТУ ГДТ секции С-300/1 составляет 2,3 млн т/год.

Входящая в КППН ЛК-6У ТУ ГДТ секции С-300/1 предназначена для получения гидроочищенной, депарафинизированной фракции дизельного топлива 180–350 °С. Гидроочистка дизельного топлива представляет собой процесс, направленный на снижение содержания серы, кислорода и азота в топливе с использованием реакций умеренной гидрогенизации. Этот процесс осуществляется при определенных условиях давления и температуры в присутствии водорода и специализированных катализаторов. Данный процесс играет ключевую роль в производстве дизельного топлива, соответствующего современным экологическим стандартам.

Пожаровзрывоопасность технологического процесса ГДТ определяется горючими свойствами продуктов переработки, в числе которых фракция дизельного топлива и водородсодержащий газ (ВСГ). Данные продукты переработки с кислородом воздуха образуют смеси, взрывающиеся при наличии источника зажигания. Технологические параметры процесса крайне высокие и ведутся при температуре 330–420 °С и давлении 3–6,4 МПа. Исходя из технологических параметров можно заключить, что ТУ ГДТ включает оборудование, функционирующее при высоком избыточном давлении и повышенных температурах. Эти аппараты содержат значительные объемы продуктов в жидкой, газообразной и паровой фазах, что при возможных утечках может привести к загазованности прилегающей территории.

Класс взрывоопасности наружной ТУ ГДТ – В-1г, при аварии возможен выброс ВСГ, сероводорода в атмосферу и образование токсичной, взрывоопасной концентрации. В состав ТУ ГДТ входят следующие технологические блоки (приведенная масса паров и жидкостей, т): блок № 1 – сырьевой блок (0,705); блок № 2 – реакторно-печной блок (15,53); блок № 3 – блок стабилизации дизельного

топлива (1,217); блок № 4 – блок стабилизации бензина (9,109); блок № 5 – блок очистки углеводородных газов (0,5); блок № 6 – блок сбора кислых стоков (0,084); блок № 7 – блок промывочной воды (0,705); блок № 8 – блок сепаратора кислых факельных газов (0,705); блок № 9 – блок подачи сульфидирующего агента (0,705).

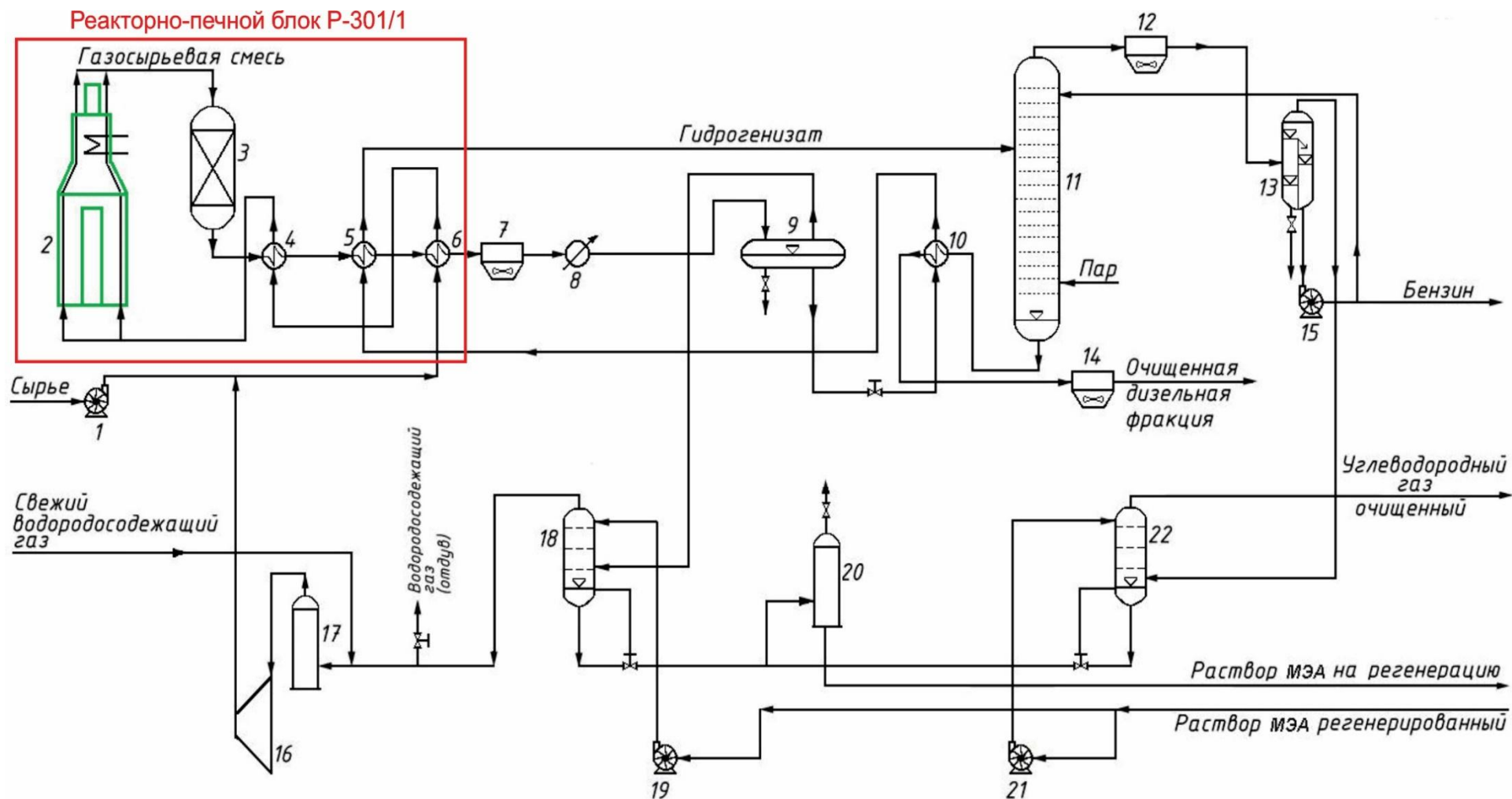
Оборудование технологической установки гидроочистки дизельного топлива (ТУ ГДТ) является сложным и разветвленным. Основная часть оборудования работает при повышенном давлении и при температурах, превышающих температуру самовоспламенения обрабатываемых веществ. Кроме того, согласно [63], по пожаровзрывоопасности ТУ ГДТ относится к категории АН (повышенная взрывопожароопасность).

Согласно характеристикам пожаровзрывоопасности технологических блоков ТУ ГДТ, наиболее энергонасыщенным и пожаровзрывоопасным является блок № 2 – реакторно-печной блок, что также отражено в работах [67, 122].

Технологическая установка включает в себя последовательно включенные технологические аппараты и оборудование, среди которых: сырьевые насосы; трубчатая печь; реакторы гидроочистки; теплообменники; аппараты воздушного и водяного охлаждения; сепараторы; колонны стабилизации; центробежный и поршневые компрессоры; абсорберы. Принципиальная схема ТУ ГДТ согласно [39] с выделением реакторно-печного блока Р-301/1 представлена на рисунке 1.3.

Наиболее опасными аварийными ситуациями реакторно-печного блока Р-301/1 являются разгерметизация аппаратуры, прогар змеевика печи П-301 и выброс продукта на нагнетании центробежных (ЦК) и поршневых (ПК) компрессоров: ЦК-301, ПК-301, ПК-302, ПК-303, ПК-304. Эти ситуации являются предпосылками возникновения аварийного выброса, взрыва и пожара.

Основные способы ликвидации аварийных ситуаций на ТУ ГДТ обеспечиваются автоматическим или автоматизированным запуском систем противоаварийной защиты и пожаротушения, позволяющим своевременно отключить аварийное оборудование или аварийный участок, прекратить подачу продуктов переработки, обеспечить ингибирование взрывопожароопасной среды, изоляцию источников зажигания, тушение и охлаждение аварийного участка.



Оборудование: 1,15,19,21 – насосы; 2 – трубчатая печь; 3 – реактор; 4-6,10 – теплообменники; 7,12,14 – аппараты воздушного охлаждения; 8 – водяной холодильник; 9,13,17,20 – сепараторы; 11 – стабилизационная колонна; 16 – центробежный компрессор; 18, 22 – абсорберы.

Рисунок 1.3 – Принципиальная схема технологического процесса ТУ ГДТ [39]

1.3. Аналитический обзор автоматизации системы управления технологическим процессом установки гидроочистки дизельного топлива

Автоматизированный контроль и управление технологическими процессами ТУ ГДТ на ПНХЗ осуществляются централизованно из помещения операторной КППН ЛК–6У. Для этого используется распределенная система управления (PCY) технологическим процессом «CENTUM», разработанная компанией Yokogawa Electric Corporation Ltd (Япония). Система построена на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК). Для дистанционного наблюдения за технологическим процессом оборудованы рабочие места с мониторами, клавиатурами и манипуляторами типа «мышь». Комплекс технических средств автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) секции С–300/1 построен из PCY интегрированной с системой противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ) [99].

На рисунке 1.4 представлена структурная схема АСУ ТП (PCY/ПАЗ) и автоматизированной системы управления противопожарной защитой (АСУ ПЗ) ТУ ГДТ на примере ПНХЗ.

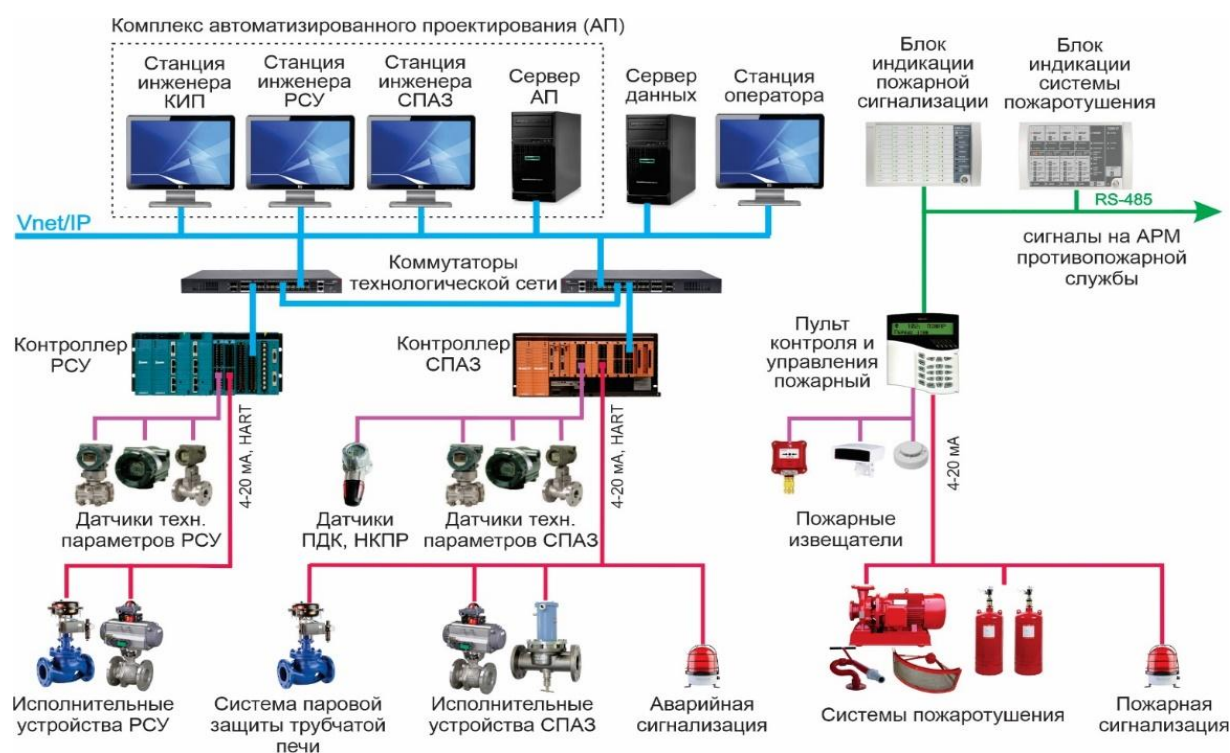


Рисунок 1.4 – Структурная схема АСУ ТП (PCY/ПАЗ) и АСУ ПЗ ТУ ГДТ

Оборудована ТУ ГДТ КППН ЛК–6У комплексом систем и устройств, обеспечивающих мониторинг, а также противоаварийную и противопожарную защиту:

– система газового контроля (СГК) промышленной площадки. Она включает 4 электрохимических датчика газов Dräger Polytron 8200 для определения содержания токсичных газов (сероводород) и кислорода в воздушной среде. Также система оснащена 8 оптическими инфракрасными датчиками углеводородных газов Dräger PIR 7000 для определения предельно допустимой концентрации взрывоопасных газов (водород, метан). Сигналы передаются в РСУ и ПАЗ;

– система противоаварийной автоматической защиты (СПАЗ), выполненная на базе ПЛК «ProSafe–RS» (Yokogawa, Япония). Она реализует логику аварийных блокировок. Источники информации – собственные резервированные датчики контроля температуры, давления, вибрации и других параметров. Исполнительные устройства включают защитные клапаны, клапан-отсекатели, систему паровой защиты трубчатой печи и систему азотной эвакуации продукта из змеевика печи;

– автоматизированная система управления противопожарной защитой (АСУ ПЗ). Она включает систему противопожарного водоснабжения, автоматическую систему водопенного тушения пожаров, автоматическую систему газового пожаротушения аппаратной и контроллерной, систему пожарной сигнализации и систему колец орошения. Контроль и управление АСУ ПЗ реализуются с использованием пульта контроля и управления охранно-пожарными системами модели «С–2000М». Для обеспечения полной функциональности и визуального отображения информации данный пульт интегрирован с блоком индикации состояния пожарной сигнализации «С–2000БИ», а также с блоком индикации и управления, предназначенным для систем пожаротушения, модели «С–2000ПТ».

Аналитический обзор [69] показал, что ТУ ГДТ КППН ЛК–6У ПНХЗ оснащена современными системами аварийного мониторинга, а также средствами противоаварийной защиты. На рассматриваемых объектах зачастую обеспечивается взаимодействие в единой среде передачи информации только среди РСУ и СПАЗ, что представлено на рисунке 1.4. Данное построение структуры

связей связано с использованием аналогичных датчиков контроля технологических параметров, повышением надежности определения превышений технологических параметров и автоматической активации исполнительных устройств СПАЗ.

Анализ контуров блокировок СПАЗ ТУ ГДТ секции С–301/1 показал наличие аварийной сигнализации при превышении предельно допустимой концентрации (ПДК) токсичных паров и газов, нижнего концентрационного предела (НКПР) углеводородных паров и газов на промышленной площадке, а также автоматического запуска ПЗТП П–301/1, входящей в состав СПАЗ, по сигналу от СГК. Техническая документация на объекте определяет, что на сегодняшний день паровая завеса трубчатой печи П–301/1 не обеспечена дистанционным контролем основного параметра – давления пара в коллекторе ПЗТП. На сегодняшний день для проверки давления пара в коллекторе ПЗТП используется манометр, установленный в распределительном паровом коллекторе системы паровой защиты трубчатой печи, что не позволяет обеспечить оперативного и дистанционного контроля давления пара в период функционирования ПЗТП. Следует отметить, что ТУ ГДТ расположена от помещения операторной на расстоянии более 100 м.

1.4. Анализ нормативных требований и методов проектирования паровых завес трубчатых печей

Проектируются системы паровой защиты технологических трубчатых печей согласно Инструкции [22] и предполагают применение четырех систем, представленных на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Структура системы паровой защиты технологической трубчатой печи

В исследовании А. В. Федорова и др. авторов говорится, что системы «ПЗТП предназначены для предупреждения контакта пожаровзрывоопасных парогазовых смесей, образующихся при разгерметизации технологических аппаратов, оборудования работающих под избыточным давлением с существующими источниками зажигания трубчатых печей» [99, с. 73]. Согласно инструкции [22], на трубчатых печах выделяются следующие источники зажигания: «неизолированные наружные конструкции и места повреждения футеровки, нагретые выше 250 °С; внутренние поверхности футеровки при подсосе горючих парогазовых смесей через отверстия диаметром более 30 мм; открытое пламя горелок при работе печей» [66, с. 191].

В ТУ ГДТ С–300/1 КППН ЛК–6У применяются печи большой мощности типа ВС (трубчатая печь с верхним отводом дымовых газов и вертикальными радиантными трубами) и ГС (горизонтальными радиантными трубами). Печи большой мощности типа ВС и ГС используются в технологических комплексах нефтеперерабатывающих заводов Болгарии, Венгрии, Индии, Кореи, Кубы, Македонии, Турции, Эфиопии, стран СНГ и Балтии [45]. В данных типах печей применяются комбинированные горелки типов ГГМ (горелка газомазутная) и ГП (горелка парового распыливания) установленные в поду печи. На рисунке 1.6 представлена структурная схема устройства ПЗТП.

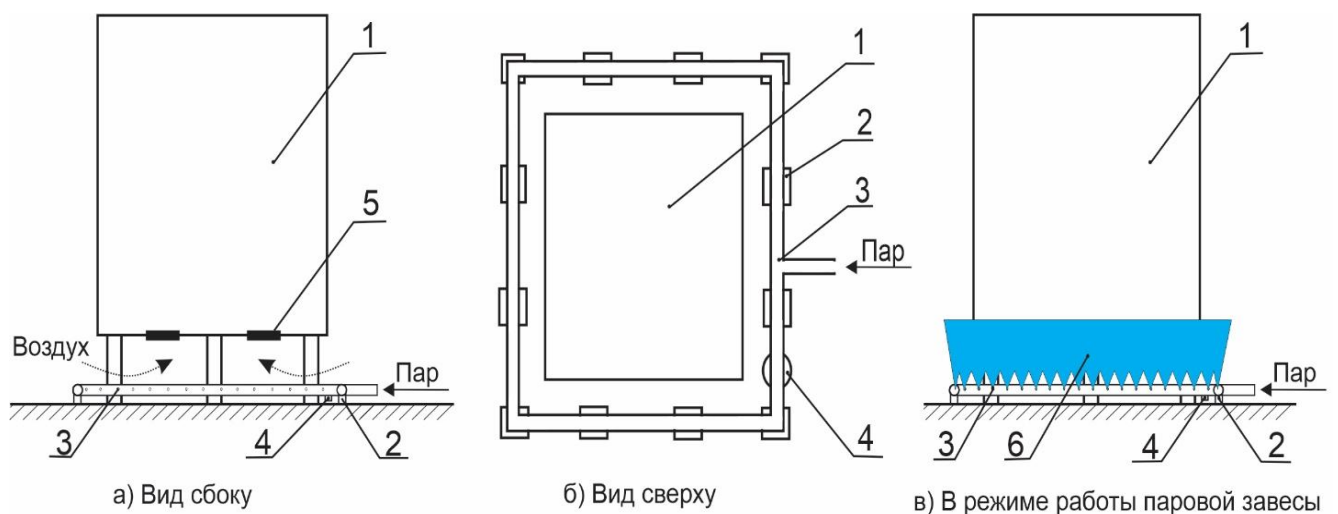


Рисунок 1.6 – Структурная схема устройства ПЗТП

Представленная на рисунке 1.6 структурная схема устройства ПЗТП состоит из следующих элементов: 1 – трубчатая печь, 2 – опора коллектора, 3 – коллектор, 4 – дренажный вентиль, 5 – огневая форсунка, 6 – паровая завеса.

На рисунках 1.7 [99], 1.8 представлен общий вид трубчатой печи П–301/1 секции С–300/1 и ПЗТП.



Рисунок 1.7 – Общий вид трубчатой печи П–301/1 С–300/1 [Привод. по: 99]



а) нижний ярус ПЗТП

б) верхний ярус ПЗТП

Рисунок 1.8 – Общий вид ПЗТП П–301/1 секции С–300/1

Основанием для применения паровых завес в трубчатых печах согласно данным представленным в работе [66] являются: п. 94 [97], п. 6.53 [5], п. 3.2.24 [83], п. 6.10.5.32 [88], п. 3.1 [12], п. 8.1.1.13 [62].

В Инструкции [22] представлено, что трубчатые печи также должны быть оборудованы паровой завесой, если они расположены «... ближе 100 м от опасного к выбросу технологического оборудования, находящегося под избыточным давлением, с продуктами ниже температуры самовоспламенения и выше нормальной температуры кипения» [66, с. 5].

Пункт 8.39 [5] определяет, что система паровой защиты трубчатых печей должна выполняться в соответствии с Инструкцией [22], в которой изложены основные технические требования к проектированию четырёх систем, указанных на рисунке 1.5, включая ПЗТП. Кроме того, в пункте 8.1.1.13 [62] указано, что расчёт ПЗТП необходимо выполнять с учётом требований [13].

В Инструкции [22] и Приложении Л «Метод расчета противопожарных паровых завес» к [13] представлены требования к конструкции и методы расчета проектируемых ПЗТП. В данных нормативных документах, а также в работе [29] паровая завеса представлена как кольцевой трубчатый паровый коллектор, установленный на опоры в нижней горизонтальной плоскости по периметру технологической трубчатой печи, вдоль оси которого просверлены отверстия на равном расстоянии с одинаковым диаметром.

Необходимо отметить существующие различия в требованиях к конструкции и методам расчёта паровых завес. Так, в Приложении Л к [13] конструкция ПЗТП предполагает обеспечение периметра трубчатой печи жестким газонепроницаемым ограждением, устанавливаемым на расчетном расстоянии от парового коллектора с высотой выше 0,4–0,6 м, для исключения прохода горючей смеси среди паровых струй в начальном участке завесы. Изучив практический опыт проектирования и эксплуатации паровых завес [77], было определено, что данное ограждение в большей степени не используется в практической деятельности в связи с противоречием с п. 342 [97] о недопустимости наличия прямков, в которых возможно скопление пожаровзрывоопасных паров и газов. Выпускные отверстия

парового коллектора, согласно Инструкции [22], должны располагаться так, чтобы направление паровой струи располагалось 45° к горизонтальной плоскости, тогда как в Приложении Л к [13] предполагается вертикальное направление. В расчетной части имеется разница в методах определения высоты ПЗТП, диаметра и расстояния между отверстиями, расхода пара.

Специалисты форума [77] отмечают совместное использование методов, представленных в [22, 13] при проектировании ПЗТП. Необходимо отметить, что в [22, 13] вопросы автоматизации ПЗТП не рассматриваются, а упоминается только автоматический и дистанционный запуск системы по сигналам от СГК, а также ручной запуск на месте или с пульта оператора технологического процесса. Следовательно, требования к автоматизации и построению структуры функционирования паровых завес трубчатых печей (ПЗТП) соответствуют требованиям, предъявляемым к системам противоаварийной автоматической защиты (СПАЗ) и изложены в [97]. В стандарте [13] также указано, что «для эффективного функционирования паровая завеса должна обладать достаточными плотностью и дальностью, исключающими проскок горючей смеси в защищаемую зону объекта. Данные свойства достигаются выполнением требований к конструкции и соблюдением расчетных параметров завесы. Основным параметром качественной работы завесы является расчетная интенсивность подачи пара исходя из диаметра отверстий парового коллектора и высоты создаваемой завесы, которая, в свою очередь, обеспечивается соответствующим давлением пара в коллекторе» [99, с. 76]. Показатели требуемых значений давления пара в коллекторе ПЗТП в зависимости от высоты защищаемой зоны и скорости ветра представлены в таблице Л.1 к [13].

На рисунке 1.9, представленном в работе [22], схематически изображена трубопроводная развязка системы паровой защиты технологической печи. В данной схеме отмечены основные элементы СПАЗ, в состав которой входит ПЗТП. Как видно из рисунка 1.9, система ПЗТП не предусматривает возможности контроля и регулирования давления пара, что существенно ограничивает ее функциональные возможности. Этот недостаток также подробно рассмотрен и

проанализирован в работе [20], где подчеркивается необходимость модернизации системы для повышения ее надежности и эффективности.

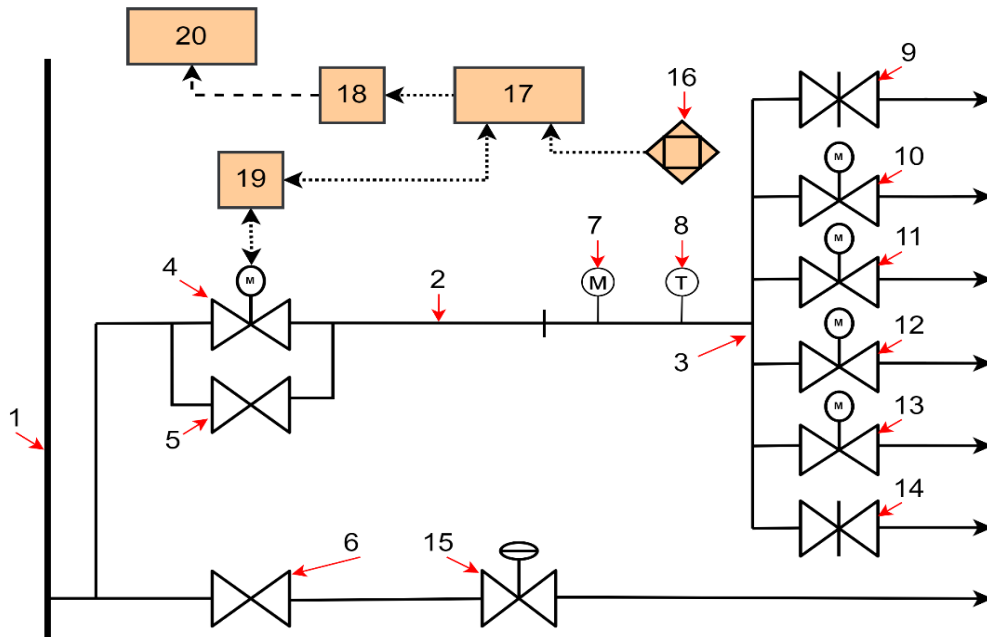


Рисунок 1.9 – Схема подключения систем паровой защиты трубчатой печи к паропроводной сети предприятия с элементами автоматизации

На рисунке 1.9 представлены: «1 – паропроводная сеть предприятия; 2 – подводящий паропровод; 3 – распределительный коллектор; 4 – главная электрозадвижка 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;» [99, с. 78] 15 – регулирующий клапан ввода пара на технологическую установку; элементы автоматизации ПЗТП: 16 – газоанализатор; 17 – контроллер СПАЗ; 18 – коммутатор сети; 19 – блок управления и контроля положения задвижки (клапана); 20 – АРМ оператора технологической установки.

1.5. Анализ барьеров безопасности

При проектировании технических систем приборной безопасности технологических процессов, согласно [61, 97], выбор средств контроля, управления, противоаварийной и противопожарной защиты обосновывается на

основе анализа опасностей и риска аварий на опасном производственном объекте. При проектировании СПАЗ выполняются требования с учетом стандартов по функциональной безопасности [17, 15]. Автором [89] использована концепция жизненного цикла безопасности [17], а также интегрирована в процесс проектирования СПАЗ и представлена на рисунке 1.10.

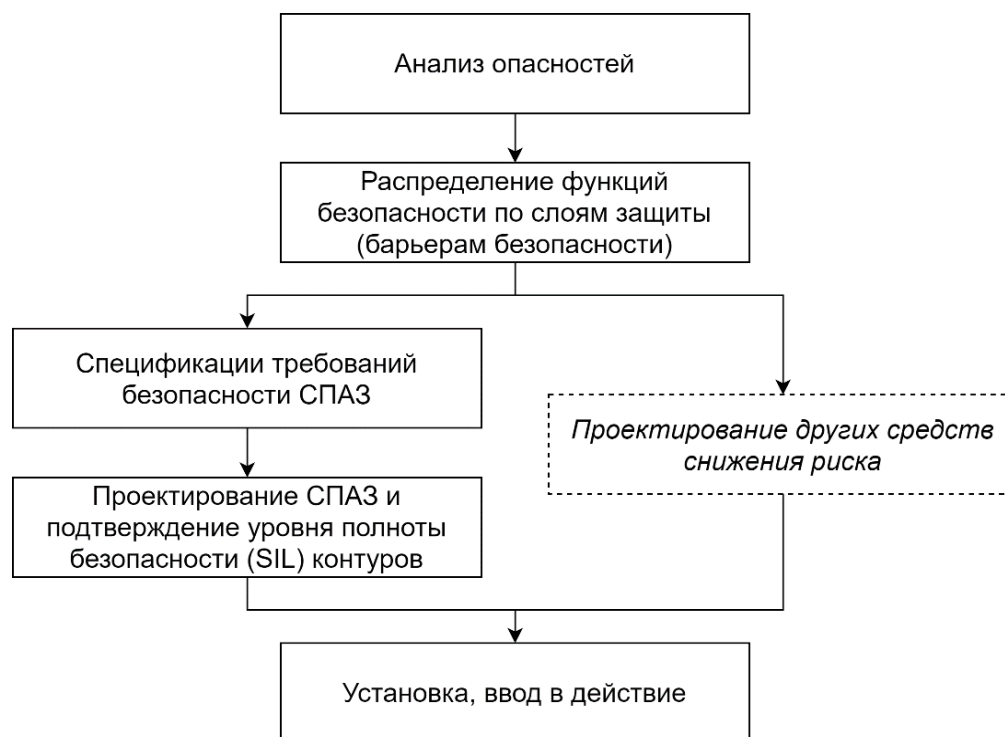


Рисунок 1.10 – Жизненный цикл безопасности систем противоаварийной защиты [Привод. по: 88, с. 61]

Процесс анализа опасностей и оценки рисков изложен в методиках [50, 51]. В ходе анализа необходимо идентифицировать возможные опасности, так как невыявленные на этом этапе угрозы не будут учтены в дальнейшем исследовании. Кроме того, данный этап предусматривает выработку предварительных рекомендаций по снижению опасностей. Далее определяется частота реализации инициирующих опасных событий, проводится оценка их последствий и обобщаются результаты анализа риска. На завершающем этапе разрабатываются рекомендации по внедрению барьеров безопасности, направленных на эффективное снижение уровня риска.

При выборе барьеров учитываются степень возможного минимизирования риска и величина затрат на их реализацию. Как отмечено в работе [89], эти показатели играют решающую роль при принятии решений о внедрении защитных мер. Таким образом, разработка барьеров безопасности основывается на балансе между эффективностью снижения риска и экономической целесообразностью.

В исследовании [60] проведен детальный обзор подходов, применяемых для анализа рисков на опасных производственных объектах. Среди множества методов особое внимание уделено методу анализа барьеров безопасности (АББ), который выделяется своей оптимальностью и наглядностью. Авторы подчеркивают, что этот метод позволяет эффективно идентифицировать слабые места в системе защиты, выявлять потенциальные угрозы и разрабатывать меры по их минимизации, что делает его особенно полезным для оценки рисков на предприятиях с высоким уровнем опасности.

В п. 17 методики [50] "в качестве приоритетных указаны методы количественной оценки риска аварий, а для оценки вероятностей инициирующих событий и возможных последствий приоритетными являются такие методы, как «анализ деревьев отказов» и «анализ деревьев событий»" [89, с. 62]. Метод АББ применяется в целях качественного или количественного обоснования и оценки эффективности мер безопасности [51]. Барьеры безопасности – это средства, обеспечивающие предотвращение, контроль или снижение влияния реализации опасных событий для уменьшения риска последствий за счет снижения вероятности их возникновения.

На сегодняшний день выполнение АББ становится весьма сложной задачей, особенно если не используются специализированные программные комплексы (ПК), даже при наличии разработанных методик [89]. Для проведения АББ был применен специализированный ПК под названием АРБИТР [82, 89]. В своей работе А. С. Можаяев отмечает, что «теоретической основой технологии автоматизированного структурно-логического моделирования является общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) системного анализа» [54], подробно описанный в работе [53]. В ПК АРБИТР для графического представления

используется схема функциональной целостности (СФЦ). На рисунке 1.11, согласно [52], представлены изобразительные средства СФЦ для набора логических операций: «И» (конъюнктивная дуга); «ИЛИ» (дизъюнктивная дуга); «НЕ» (инверсный выход конъюнктивной или дизъюнктивной дуги).



Рисунок 1.11 – Изобразительные средства схем функциональной целостности [Привод. по: 59]

Согласно работ [89, 52] все вершины СФЦ подразделяются на функциональные и фиктивные. С помощью функциональных вершин представляются случайные события, характеризующие вероятность элементов системы. Каждой функциональной вершине СФЦ соответствует:

– порядковый номер $i = 1, N$ и системная логическая переменная $\tilde{i} = \{i, \bar{i}\}$, характеризующая вероятность реализации события i или не реализацию i -го события, N – число элементов СФЦ;

– вероятностный параметр $P_i(t) = P_i = 1 - Q_i$, характеризующий вероятность реализации (или не реализации) i -го события СФЦ;

– суммарная вероятность взаимоисключающих альтернативных вариантов развития событий равна 1.

Для АББ и распределения барьеров безопасности согласно работе М.С. Скворцова необходимо построение "диаграммы «галстук-бабочка» (bow-tie), основанной на совместном анализе «деревьев отказов» и «деревьев событий»" [89]. На рисунке 1.12 представлена диаграмма «галстук-бабочка», построенная в ПК АРБИТР [82], и представлена в виде СФЦ, фактически объединяющая вероятность возникновения инициирующего события и его последствия [89].

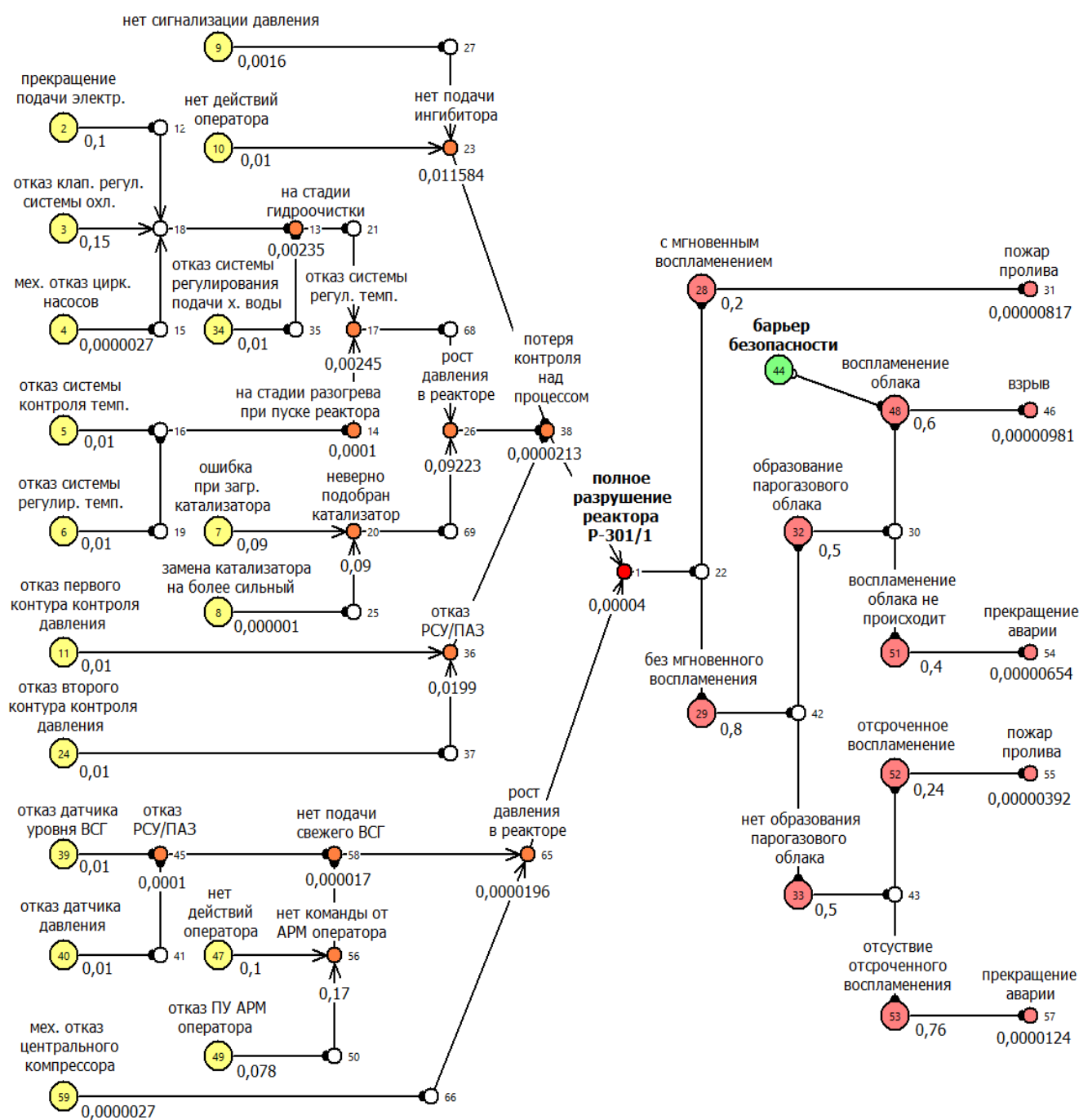


Рисунок 1.12 – Диаграмма «галстук-бабочка» с головным событием – полное разрушение реактора Р-301/1

Построение диаграммы «дерево отказов», представленной в левой части диаграммы «галстук-бабочка» на рисунке 1.12, выполнено на основе статистических данных отказов оборудования реакторно-печного блока секции С-301/1 согласно [20, 51]. Эти отказы приводят к резкому повышению давления в реакторе Р-301/1 и к головному событию – полному разрушению реактора Р-301/1.

Последующие события «дерева отказов» представлены на рисунке 1.12

фиктивными вершинами с указанием расчетных значений. Согласно «дерева отказов» для реактора Р–301/1, частота реализации полного разрушения реактора гидроочистки дизельного топлива составляет $4 \cdot 10^{-5}$. Полученное значение частоты полного разрушения реактора гидроочистки дизельного топлива будет использовано для построения и расчета «дерева событий» (правой части диаграммы «галстук-бабочка»).

Построение диаграммы «дерево событий» основано на предпосылках, изложенных в исследованиях [42, 49–51]. Согласно этим данным, полное разрушение реактора гидроочистки приводит к утечке всего содержимого наружу. Если утечка сопровождается мгновенным воспламенением, возникает пожар. При отсутствии мгновенного воспламенения содержимое растекается, испаряется с поверхности разлива и образует облако ТВС. При контакте облака ТВС с источником зажигания может произойти взрыв [42].

Условные частоты реализации опасных событий принимались согласно данным, представленных в [49, 11] для двухфазной среды, где:

- условная вероятность мгновенного воспламенения $P_{\text{мгн.восп.}} = 0,2$;
- условная вероятность последующего воспламенения при отсутствии мгновенного воспламенения $P_{\text{посл.восп.}} = 0,24$;
- условная вероятность сгорания с образованием избыточного давления при образовании горючего газопаровоздушного облака с его воспламенением $P_{\text{восп. облака}} = 0,6$. Определены вероятности реализации окончательных опасных событий, представленных на диаграмме на рисунке 1.12, и приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Частоты реализации окончательных опасных событий при полном разрушении реактора Р–301/1

Номер вершины СФЦ на рисунке 1.12	Событие	Вероятность реализации i -го события
31	Пожар пролива	$8,17 \cdot 10^{-6}$
46	Взрыв	$9,81 \cdot 10^{-5}$
55	Пожар пролива	$3,92 \cdot 10^{-6}$

Определено событие с наибольшей частотой реализации – «взрыв» и выполнено распределение барьера безопасности – ПЗТП (вершина 44) в диаграмме «галстук-бабочка». Для оценки теоретического предела влияния барьера 44 на снижение вероятности реализации опасного события 46 (взрыв) зададим эффективность барьера 44 равным нулю. По результатам моделирования в ПК АРБИТР [82], характеристики элементов системы в целом свидетельствуют об отрицательном значении барьера безопасности 44. Из этого следует, что увеличение эффективности надежности данного барьера повлияет на снижение вероятности окончного события 46.

На основе рекомендуемых данных по условной вероятности эффективного срабатывания систем противопожарной защиты, представленных в таблице П.3.2 к [11], выполнены расчёты. Они проведены с учётом эффективности срабатывания барьера безопасности при отсутствии контроля за давлением пара ($P_i = 0,6$) и при его наличии ($P_i = 0,95$) в ПЗТП.

Результаты сравнительных расчетов и полученное снижение вероятности реализации опасных событий представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Результаты расчетов вероятности реализации окончного события

Номер вершины	Событие	Вероятность эффективного функционирования $P_i = 0,6$	Вероятность эффективного функционирования $P_i = 0,95$
46	Взрыв	$3,92 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$

Данные, приведенные в таблице 1.3, показывают, что вероятность наступления конечного события «взрыв» может быть снижена в 8 раз при условии надежного и эффективного срабатывания барьера безопасности 44. Такой результат достигается благодаря внедрению контроля за параметрами давления пара и повышению надежности его поддержания на безопасном уровне. Улучшение работы барьера безопасности играет ключевую роль в минимизации риска аварийных ситуаций, обеспечивая более высокий уровень стабильности и безопасности технологической системы.

1.6. Аналитический расчет гидродинамических параметров паропровода при работе систем паровых завес трубчатых печей

Исходя из примеров аварий на наружных технологических установках ННП и физических свойств предельных углеводородов, при утечках образующее облако ТВС распространяется в различные направления, независимо от направления ветра. В этой связи при обнаружении газоанализаторами превышений НКПР или ПДК осуществляется одновременный запуск паровых завес всех трубчатых печей, входящих в комплекс нефтепереработки. Запуск системы паровой завесы одной трубчатой печи не оказывает значительного влияния на расход и давление в паропроводной сети предприятия. Однако, при одновременном запуске паровых завес нескольких трубчатых печей технологических установок комплекса нефтепереработки значительно возрастает потребление пара. Это приводит к снижению давления в паропроводной сети предприятия. В результате возможно снижение давления в подводящих паропроводах ПЗТП, что уменьшает их эффективность. В КППН ЛК–6У непрерывно функционируют пять трубчатых печей, таких секций как «ЭЛОУ–АТ, гидроочистка нефти, каталитический риформинг, гидроочистка дизельного топлива, гидроочистка керосина» [70]. В этой связи необходимо провести гидродинамические расчеты паропровода и определить влияние увеличения массового расхода пара на показатели давления пара в ПЗТП ТУ ГДТ.

Обеспечение паропроводной сети КППН ЛК–6У осуществляется от установки замедленного коксования и производства пара с использованием котла-утилизатора типа БМ–35РФ, предназначенного для получения насыщенного водяного пара с давлением 1,3 МПа (13 атм), температурой 300 °С и максимальной производительностью 50 т/ч.

Согласно экспертной оценке, представленной в [20], «для трубчатых печей нефтеперерабатывающих предприятий целесообразно использовать водяной пар среднего давления порядка 0,9 МПа (9 атм) и температурой, близкой к температуре насыщения, порядка 179 °С» [99, с. 76]. Это обеспечивает наибольшую

эффективность. Данные параметры соответствуют паровой завесе для защиты на высоту 5 метров с диаметром отверстий 5 мм при среднегодовой скорости ветра 3 м/с, согласно таблицы Л.1 к [13].

Для расчета изменений давления пара в паропроводе КППН ЛК–6У при запуске пяти ПЗТП необходимо определить расход пара для одной ПЗТП. Затем использовать полученные значения для расхода паровых завес трубчатых печей смежных технологических установок, входящих в комплекс нефтепереработки.

Расчет массового расхода пара для одной ПЗТП выполнен с использованием формул (2.07–2.11) и (4.03), представленных в [22]. Полученное значение составило 1,33 т/ч.

Технологические аппараты, использующие пар в производстве (реакторы, колонны стабилизации), потребляют водяной пар в среднем 1,5–2,5 т/ч [36]. В технологических установках комплекса одновременно функционируют от 2 до 6 таких аппаратов.

В исследовании [99] А.В. Федорова и др. авторов указывается, что пар потребляют следующие производственные установки:

- «атмосферные трубчатки С–100 ЭЛОУ–АТ;
- колонны стабилизации технологических установок гидроочистки нефти С–200/1;
- колонны стабилизации технологических установок гидроочистки дизельного топлива С–300/1;
- колонны стабилизации технологических установок гидроочистки керосина С–300/2» [99, с. 76].

В соответствии с данными исследования [99], для определения потребления пара технологическими установками принято использовать средний показатель расхода, составляющий 5 т/ч на одну установку.

Как указано в исследовании автора диссертации «для определения изменения давления пара в паропроводной сети комплекса при запуске ПЗТП необходимо построение уравнений, учитывающих динамику входящего потока пара и отбора из него, а также специфические потери, создаваемые при движении через

трубопровод. Следовательно, при изменении расхода из паропроводной сети уравнение для расчета текущего значения давления пара $P_i(t)$, атм, примет следующий вид:

$$P_i(t) = P_{i-1}(t) + \frac{dP(t)}{dt} - P_{уд}(t), \quad (1.1)$$

где $P_{i-1}(t)$ – начальное значение давления пара в начале участка паропровода на момент времени t , атм;

$\frac{dP(t)}{dt}$ – приращение давления пара при изменении массы, атм;

$P_{уд}(t)$ – удельные потери давления пара при перемещении по паропроводу на момент времени t , атм» [70].

В исследовании автора диссертации указывается, что «при постоянной температуре ($T = const$) процесс является изотермическим и в данном случае давление в трубопроводе определяется изменениями массы пара» [70]. Уравнения для расчета изменения массы пара в трубопроводе, учитывающие как входящий, так и выходящий потоки массы пара, необходимо строить на основе закона сохранения массы. Как представлено в работах [9, 32] уравнением, описывающим состояние идеального газа, «является уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$PV = nRT = \frac{m}{M} RT = mR_{пар}T, \quad (1.2)$$

где P – давление газа, Па;

V – объем паропровода, м³;

n – количество вещества газа, моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/мольК;

m – масса пара, кг;

$R_{пар}$ – универсальная газовая постоянная для водяного пара при рабочем давлении, Дж/кгК;

T – абсолютная температура газа, К;

M – молекулярная масса вещества, кг/моль» [70].

С учетом использования массового расхода из уравнения (1.2) получим уравнение давления пара P , атм [70]:

$$P = \frac{mR_{\text{пар}}T}{V}. \quad (1.3)$$

Универсальная газовая постоянная R , равная 8,314 Дж/мольК, относится к молям газа. При использовании в расчетах массы газа вместо количества молей, используется специфическая газовая постоянная $R_{\text{пар}}$, Дж/кгК, которая вычисляется как отношение универсальной газовой постоянной к молярной массе пара [70]:

$$R_{\text{пар}} = \frac{R}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{8,314 \text{ Дж/мольК}}{0,018 \text{ кг/моль}} = 461,5 \text{ Дж/кгК}, \quad (1.4)$$

где $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – молярная масса воды, кг/моль.

Для рассматриваемого изотермического процесса изменение давления пара в паропроводе за единицу времени $\frac{dP(t)}{dt}$, Па/с, будет определяться изменением массы пара [70]:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{R_{\text{пар}}T}{V} \cdot \frac{dm(t)}{dt}, \quad (1.5)$$

где $R_{\text{пар}}$ – универсальная газовая постоянная для водяного пара при рабочем давлении, Дж/кгК;

T – абсолютная температура газа, К;

V – объем паропровода, м³;

$\frac{dm(t)}{dt}$ – изменение массы пара за единицу времени, кг/с.

Изменение массы пара в паропроводе за единицу времени $\frac{dm(t)}{dt}$, кг/с, выражается следующим уравнением [70]:

$$\frac{dm(t)}{dt} = \frac{m_{\text{вх}}(t) - m_{\text{вых}}(t)}{dt}, \quad (1.6)$$

где $m_{\text{вх}}(t)$ – масса пара поступающего в паропровод на момент времени t , кг;

$m_{\text{вых}}(t)$ – масса пара отбираемого из паропровод на момент времени t , кг;

dt – период времени, с.

С использованием массового расхода пара формула массы пара в паропроводе на момент времени $\frac{dm(t)}{dt}$, кг/с, примет следующий вид [70]:

$$\frac{dm(t)}{dt} = G_{\text{вх}}(t) - G_{\text{вых}}(t), \quad (1.7)$$

где $G_{\text{вх}}(t)$ – входящий массовый расход пара на момент времени t , кг/с;

$G_{\text{вых}}(t)$ – выходящий массовый расход пара на момент времени t , кг/с.

Удельные потери насыщенного водяного пара $P_{\text{уд}}(t)$, Па, при движении по трубопроводу определяются по уравнению представленным в «методике [87]:

$$P_{\text{уд}}(t) = \frac{0,8125 \cdot l \cdot \lambda \cdot G_{\text{вых}}^2(t)}{d^5 \cdot \rho}, \quad (1.8)$$

где l – длина участка паропровода, м;

λ – коэффициент гидравлического трения;

$G_{\text{вых}}(t)$ – массовый расход пара из паропровода на момент времени t , кг/с;

d – условный диаметр паропровода, м;

ρ – плотность насыщенного пара, кг/м³» [70].

Для расчета изменения показателей давления пара при увеличении потребления для ПЗТП на основе уравнений (1.1–1.8) использованы следующие исходные значения:

- «входящий массовый расход пара $G_{\text{вх}}$ – 24 т/ч (6,66 кг/с);
- выходящий массовый расход пара для технологических нужд и паровых завес трубчатых печей $G_{\text{вых}}(t)$ – 26,65 т/ч (7,4 кг/с), из которого водяной пар для технологических нужд потребляют: атмосферная трубчатка С–100 ЭЛОУ–АТ, колонны стабилизации технологических установок гидроочистки нефти С–200/1, дизельного топлива С–300/1, керосина С–300/2;
- принято, что все четыре технологические установки потребляют по 5 т/ч (1,38 кг/с) водяного пара, на вторичное обратное вскипание поступает 4 т/ч;
- рабочее давление пара в начале участка паропровода P_0 или P_{i-1} – 10 атм;

– длина участка паропровода $l = 500$ м, расстояние участков не обозначено;
 – сумма коэффициентов местных сопротивлений на участке паропровода $\lambda = 15$;

– условный диаметр паропровода $d = 300$ мм» [70].

Результаты расчета показывают, что при нормальном течении технологического процесса и равномерном потреблении пара для технологических нужд текущее давление в паропроводе $P(t)$ составит 10 атм. Данные параметры обеспечат нормативное функционирование ПЗТП ТУ ГДТ. Однако при одновременном запуске паровых завес пяти трубчатых печей смежных технологических установок комплекса значительно возрастает потребление пара. Дополнительное потребление пара составит 6,65 т/ч. В течение 45 секунд текущее давление в паропроводной сети снизится до 7,95 атм. Это значение не соответствует нормативному давлению для данного типа печей, которое составляет 9 атм. С учетом данного фактора проведены расчеты с условием снижения потребления пара $G_{\text{вых}}(t)$ на 5 т/ч, которое обеспечит нормативное давление 9 атм в ПЗТП ТУ ГДТ в течении 28 с.

На рисунке 1.13 представлены результаты расчета изменения давления пара в паропроводной сети на участке ТУ ГДТ при комплексном запуске паровых завес трубчатых печей.

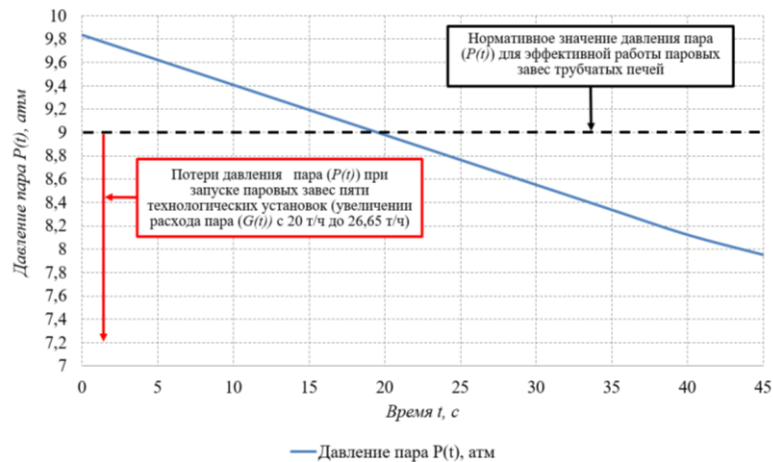


Рисунок 1.13 – Процесс изменения давления пара в паропроводной сети на участке ТУ ГДТ при запуске паровых завес трубчатых печей

На рисунке 1.14 представлены результаты расчета процесса изменения давления пара при снижении расхода пара для технологических нужд установок нефтеперерабатывающего комплекса.

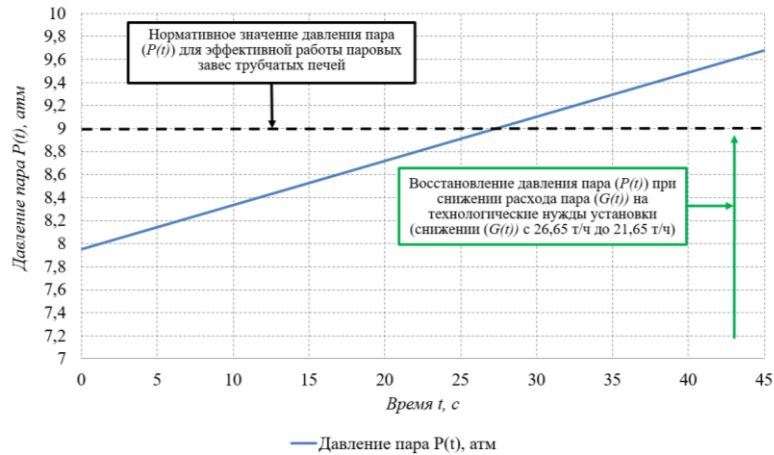


Рисунок 1.14 – Процесс изменения давления пара в паропроводной сети на участке ТУ ГДТ при снижении расхода пара для технологических нужд

По результатам гидродинамического расчета показатели потерь давления пара в ПЗТП ТУ ГДТ, с учетом потребления пара на технологические нужды и ПЗТП смежных технологических установок, показали, что давление пара в паропроводной сети снизится ниже нормативно установленных значений. Это приведет к неэффективной работе паровой завесы одной или нескольких трубчатых печей. «Для решения задачи стабилизации давления пара в ПЗТП ТУ ГДТ при одновременном запуске ПЗТП, входящих в комплекс нефтепереработки, необходимо оповещение оперативного персонала установки производства пара для наращивания мощности в котлоагрегате» [99]. Это занимает некий период времени, снижая оперативность процесса управления и увеличивая вероятность ошибки оперативного персонала при принятии решения.

В этой связи для повышения оперативности и надежности необходимо создание подсистемы контроля и управления давлением пара для существующей системы ПЗТП. Эта подсистема обеспечит дистанционный контроль давления пара в коллекторе. На основании полученных данных она будет автоматически, или

автоматизированно управлять давлением пара путем снижения подачи пара на технологические нужды установок комплекса нефтепереработки.

1.7. Анализ степени разработанности темы исследования

Автоматизация управления технологическим процессом, противоаварийной и противопожарной защиты опасных производственных объектов является одной из важнейших задач для обеспечения безаварийного и безопасного ведения технологического процесса производства. Решению данной задачи посвящено немалое количество научных работ [1–3, 4, 6, 8, 18, 20–26, 28, 29–31, 37, 38, 40, 41, 43, 44, 46, 48, 50–58, 76, 79, 84–86, 89, 90, 92–95, 98, 100–108, 114–120, 123], выполненных учеными из России, Казахстана и других зарубежных стран.

Автоматизации технологических процессов производств и противоаварийной защиты НПП посвящены работы: Бизюковой Е. Е. [3], Вахова Д. Н. [4], Воронина В. В. [8], Гумерова И. Ф. [18], Кадырова Р. Р. [23–25, 48], Коронатова Н. Н. [26, 37, 38], Каяшева А.И. [30, 31, 84], Пегушина С. Л. [79], Садыкова Х. А. [86, 112], Скворцова М. С. [89], Уваровой Н. А. [95].

В работах [76, 92–94, 101] авторы определили концептуальные и научные основы создания АСУ ПЗ для НПП. Они также разработали методические рекомендации по созданию интегрированных АСУ ПЗ и определили основные системные требования. Были установлены требования к функциональному, техническому, информационному и алгоритмическому обеспечению. В связи с наличием в технологическом процессе НПП различных установок и аппаратов для первичной и вторичной переработки нефти, в работах [102, 104, 105] исследованы возможности применения АСУ ПЗ на технологических установках электрообессоливания и атмосферно-вакуумной трубчатки, висбрекинга, полимеризации. Следует отметить, что в рассматриваемых работах основной опасностью в технологических процессах НПП отмечено образование взрывопожароопасной концентрации газов, паров жидкости, образуемых при утечках из технологической аппаратуры в процессе производства. Данные факторы

характерны как для производственных помещений, так и наружных технологических установок. Несвоевременная локализация взрывопожароопасной концентрации горючей смеси опасна возникновением взрывов, пожаров и цепочкой быстрого развития аварии по принципу «домино».

В работах [46, 100, 103, 108] авторами разработаны технические решения для определения взрывопожароопасной концентрации на промышленной площадке наружных технологических установок и в производственных помещениях. Также разработаны рекомендации по рациональному размещению газоанализаторов на ННП и модели прогнозирования пожаровзрывоопасных ситуаций.

В работах [100, 101, 105, 116, 118] были рассмотрены наиболее оптимальные промышленные сети и структуры построения технических систем передачи данных для обеспечения безотказного функционирования АСУ ПЗ. Работы [40, 41, 44, 98] были посвящены разработке моделей и алгоритмов функционирования информационно-управляющей системы АСУ ПЗ для управления верхним и нижним уровнями управления с применением современных средств микропроцессорной и вычислительной техники. Авторами [43, 106, 107] разработаны функциональные и организационные структуры АСУ ПЗ применительно к объектам ННП.

В вышеперечисленных работах при создании АСУ ПЗ для технологических установок ННП отмечалась система противоаварийной автоматической защиты (СПАЗ) в составе АСУ ПЗ. Однако, не были рассмотрены условия функционирования элементов СПАЗ в составе разрабатываемых АСУ ПЗ.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день СПАЗ являются частью интегрированных АСУ ТП, и общая структура выполняется в виде РСУ/ПАЗ. Система ПЗТП функционирует в составе ПАЗ трубчатых печей технологических установок. Она управляется независимым ПЛК, запускается от включенных в систему газоанализаторов, а также возможен дистанционный запуск с панели оператора технологической установки.

В работах [1, 6, 21, 28, 29, 84, 90] были рассмотрены основные мероприятия по обеспечению противопожарной защиты трубчатых печей. В частности, ПЗТП

отмечена как одна из основных систем, обеспечивающих безопасность и изоляцию аварийных проливов и парогазовоздушных смесей от источников зажигания трубчатых печей.

Авторы работы [20] представили историческую справку о начале применения систем ПЗТП для крупнотоннажных технологических печей. Согласно этой справке, в 70-е годы прошлого столетия активно внедрялись комбинированные установки типа ЛК–6У. Эти установки обеспечили значительное сокращение площади для размещения оборудования и снижение капиталовложений.

В это время проводилась разработка мер, направленных на защиту крупнотоннажных трубчатых печей и была разработана «Инструкция по проектированию паровой защиты технологических печей на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности» [22].

Авторами работ [2, 55–58,] была разработана математическая модель, описывающая процессы работы системы паровой завесы, перемещение парогазового облака в пространстве и его рассеивание завесой. Также были проведены численные и натурные эксперименты с давлением пара в паропроводе 3 и 5 кгс/см², используя углекислый газ (СО₂) в качестве опасного тяжелого газа.

Результаты показали, что концентрация углекислого газа за паровой завесой с большим давлением значительно снижает воздействие парогазового облака. Концентрация в верхней вертикальной части составляет менее 0,5 %. Это подтвердило рациональность использования более высоких параметров давления пара для обеспечения эффективности функционирования системы.

Автором [123] была проведена серия натурных экспериментов по определению параметров эффективности функционирования паровых завес. Также в работе была отмечена эффективность применения более высоких параметров давления пара для обеспечения эффективности функционирования. На основе проведенных экспериментальных исследований автором [123] предложена фундаментальная методика по оценке эффективности паровых завес.

В работе [120] автором представлены результаты гидродинамического исследования влияния паровых завес на рассеивание плотных газов, в частности

сжиженного природного газа. Согласно этим результатам, для моделирования целесообразно применять интегральные модели, которые имеют высокую скорость разрешения, но не могут учитывать поведение облака при наличии препятствий. Также используются трехмерные модели (CFD – computational fluid dynamics, с англ. вычислительная гидродинамика), которые имеют более низкую скорость разрешения по сравнению с интегральными моделями.

В работе [120] также отмечено, что паровые завесы целесообразно применять для образования защитных экранов до 6 м в высоту с наклоном не менее 45°.

В работе [117] авторы описывают результаты экспериментальных исследований взаимодействия промышленной паровой завесы и углекислого газа в виде тяжелого газа, с выпуском нескольких тонн газа. Одним из способов количественной оценки эффективности системы паровой завесы являлось прямое сравнение концентрации облака тяжелого газа. Результаты эксперимента определили, что эффективность паровой завесы зависит от условий окружающей среды, в частности скорости ветра и интенсивности подачи пара форсунками паровой завесы.

В работе [114] была исследована возможность включения систем паровых завес в макетные модели прогнозирования аварий и расчета риска. Представленная в работе модель основана на оценке концентраций опасных тяжелых газов вокруг каждого опасного объекта производства, окруженного паровой завесой, и предполагается экспоненциальное снижение концентраций до и после установки завесы. Численные результаты моделирования риска в компьютерной системе GAMS (general algebraic modeling system, с англ. «общая алгебраическая система моделирования») показали, что паровые завесы способны снизить общую стоимость компоновки за счет снижения затрат на возможные риски.

В работе [119] представлена модель эффективной взаимосвязи, интегрированная между гидродинамическими и физико-химическими процессами, которая включает результаты экспериментальных исследований и дополнительные термодинамические и кинетические данные. Согласно разработанной модели, авторы [119] определили, что скорость растворения тяжелых газов зависит от

гидродинамических характеристик распылителя. Установлено, что она изменяется в зависимости от плотности паровой струи и начального угла распыления, и определено, что на высоте 4 м струя перегретого пара захватывает гораздо меньше газа, чем струя насыщенного пара.

В работе [115] паровая завеса рассматривается как физический барьер для снижения концентрации газа и снижения последствий аварий с утечками. Авторами [115] разработана математическая модель для оценки концентрации во время диспергирования пара для анализа чувствительности каждой модели, чтобы определить, какие переменные оказывают большее влияние без учета вихревого эффекта. Результаты включили в себя влияние состава, скорости, температуры и высоты точки высвобождения, а также сравнение с моделированием CFD. Результаты показали, что как CFD, так и разработанная модель неизменно схожи и может быть использована при проектировании ПЗТП.

Анализ и обобщение работ в исследуемой области показали, что авторы отмечают положительное влияние и эффективность применения системы паровой завесы для предотвращения возгораний и возникновения пожара на наружных технологических установках ННП. В этих работах были исследованы вопросы интеграции систем противоаварийной и противопожарной защиты в составе автоматизированных систем управления технологическим процессом, а также параметры эффективного функционирования паровых завес трубчатых печей.

Однако на сегодняшний день в достаточной мере не были исследованы вопросы обеспечения функциями дистанционного контроля и управления параметрами функционирования паровых завес трубчатых печей. Разработка подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ необходима для расширения функциональных возможностей существующей системы паровой защиты трубчатой печи. Это обеспечит возможность дистанционного контроля давления пара в коллекторе системы паровой завесы, а также автоматизированное управление им для поддержания стабильной и эффективной работы при снижении давления в паропроводе ниже установленных значений до увеличения объемов его производства.

1.8. Постановка задач исследования

Учитывая вышеизложенное, разработка подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива является актуальной задачей. Для ее реализации необходимо решить следующие задачи исследования:

1. 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.

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

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

После реализации указанных задач необходимо провести оценку эффективности использования паровых завес трубчатых печей, оснащённых функциями контроля и управления давлением пара.

Выводы по главе 1

1. Анализ статистических данных аварийных событий на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях Республики Казахстан за период 2014–2024 гг. показал, что произошло 85 аварий. Из них случаи пожара составляют 68 (80 %), взрыва – 7 (8 %), выброса опасных веществ – 11 (12 %). Статистические данные свидетельствуют об отсутствии снижения количества аварий, числа пострадавших и материального ущерба. Определено, что основными источниками воспламенения облака топливовоздушной смеси (ТВС) при разгерметизации технологического оборудования являются открытое пламя (8,1 %) и высоконагретые поверхности трубчатых печей (12,8 %).

2. Аналитический обзор систем автоматизации контроля и управления технологической установки гидроочистки дизельного топлива КППН ЛК–6У и обзор нормативных требований по проектированию паровых завес трубчатых печей показал отсутствие соответствующих требований к автоматизации контроля и управления давлением пара в паровых завесах трубчатых печей.

3. Анализ барьеров безопасности и сравнительная оценка частоты реализации опасных конечных событий при полном разрушении реактора Р–301/1 секции С–300/1 показали, что эффективное функционирование паровых завес трубчатых печей, оснащенных контролем параметров работы, снижает частоту реализации опасного события «взрыв облака ТВС» в 8 раз.

4. Результаты аналитического расчета гидродинамических параметров паропровода при работе систем паровых завес трубчатых печей, входящих в комплекс нефтеперерабатывающих технологических установок, показывают значительное увеличение потребления пара. Дополнительное потребление составит 6,65 т/ч, что приведет к снижению текущего давления в паропроводной сети до 7,95 атм, не соответствующему нормативному значению 9 атм. Учитывая этот фактор, были проведены расчеты со снижением потребления пара на 5 т/ч, что позволит обеспечить нормативное давление 9 атм в ПЗТП технологической установки гидроочистки дизельного топлива в течение 28 секунд. Это

обуславливает необходимость оснащения ПЗТП функциями контроля и управления давлением пара.

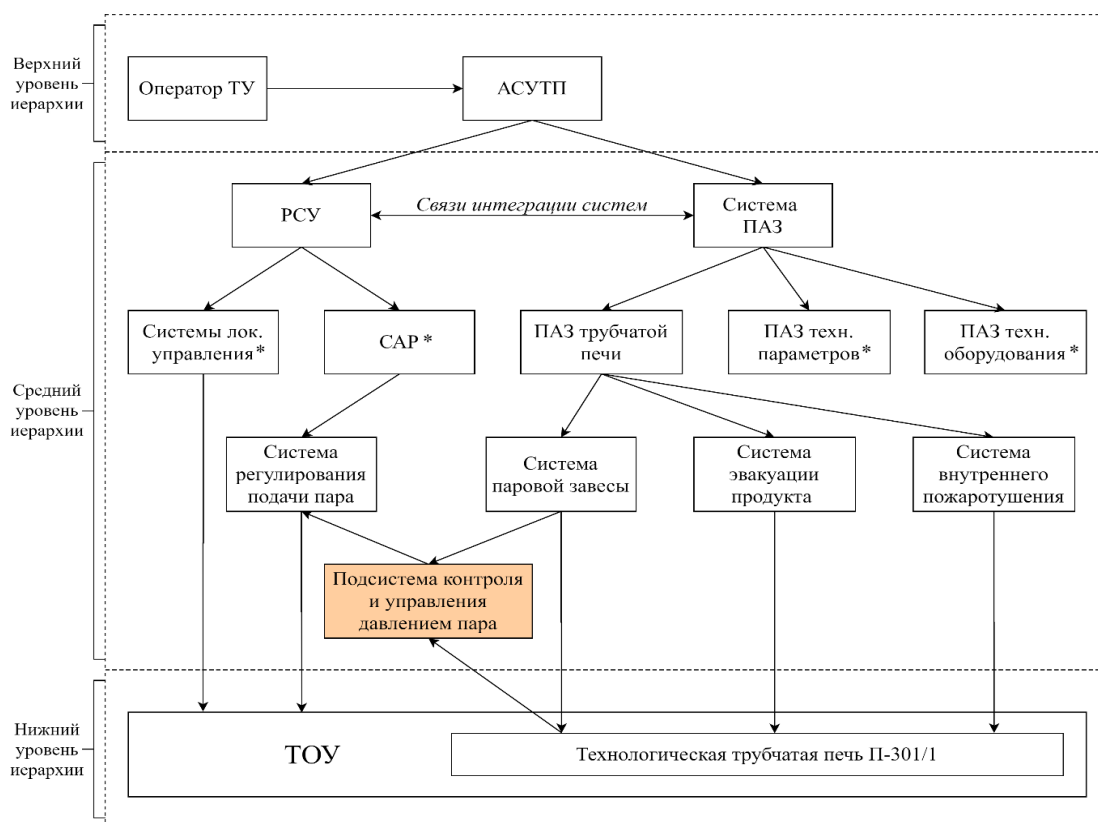
5. Анализ и обобщение работ в исследуемой области показали, что на сегодняшний день в основном были изучены вопросы интеграции систем противоаварийной и противопожарной защиты в составе автоматизированной системы управления технологическом процесса, а также параметры эффективного функционирования ПЗТП. Определено, что на сегодняшний день в достаточной степени не исследованы вопросы обеспечения ПЗТП функциями контроля и управления давлением пара.

На основании проведенного исследования определена необходимость разработки подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП технологической установки гидроочистки дизельного топлива.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ ПАРА В ПАРОВОЙ ЗАВЕСЕ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

2.1. Функциональное обеспечение

Создаваемая подсистема контроля и управления давлением пара в ПЗТП технологической установки гидроочистки дизельного топлива (ТУ ГДТ) строится на основе технических средств действующей системы ПЗТП, входящей в состав систем паровой защиты технологических трубчатых печей и функционирующих в составе СПАЗ. Схема действующей АСУ ТП ТУ ГДТ с включением в структуру создаваемой подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП представлена рисунке 2.1.



* - дальнейшее уточнение структуры системы не представляет важности.

Рисунок 2.1 – Структурная схема АСУ ТП ТУ ГДТ

В структурной схеме АСУ ТП ТУ ГДТ на рисунке 2.1 указаны следующие условные обозначения систем: ТУ – технологическая установка; АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом; РСУ – распределительная система управления; ПАЗ – противоаварийная автоматическая защита; САР – система автоматического регулирования; ТОУ – технологический объект управления.

Согласно рисунку 2.1, системы организованы в соответствии с классической трехуровневой иерархией управления. В верхний уровень иерархии включена АСУ ТП, управляемая оператором технологической установки. В средний уровень иерархии включены системы РСУ и ПАЗ с входящими в их структуру подсистемами, в том числе создаваемая подсистема контроля и управления давлением пара в ПЗТП. Нижний уровень иерархии представлен технологическим объектом управления, в структуру которого входит технологическая трубчатая печь П–301/1 с системой паровой завесы.

Основными функциями создаваемой подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ являются:

1) функция « $F-1$ » – выдача информации о давлении в трубопроводе линии ПЗТП на АРМ оператора;

2) функция « $F-2$ » – выдача управляющих сигналов на блок управления регулирующим клапанами подачи пара на технологические нужды установок.

Для реализации вышепредставленных функций $F-1$ и $F-2$ необходима доработка действующей структуры ПЗТП ТУ ГДТ, которая включает:

1) дообеспечение линии ПЗТП датчиком давления пара с дистанционной передачей показателей давления пара в коллекторе паровой завесы на АРМ оператора технологической установки;

2) подключение блоков управления регулирующим клапаном подачи пара на технологические установки РСУ. Это обеспечит управление давлением пара в ПЗТП при определении значений давления пара ниже установленных путем снижения подачи пара на технологические нужды установок комплекса нефтепереработки.

Дистанционный контроль текущих параметров давления в ПЗТП необходимо реализовать путем передачи данных по проводным каналам связи от датчика давления пара к контроллеру СПАЗ. Затем от контроллера через коммуникационные приборы информация передается к станции оператора.

Управление и поддержание установленных значений давления пара следует осуществлять на основе метода регулирования с обратной связью и оптимального принципа автоматического регулирования. Это достигается путем управления расходом пара на технологические нужды установок, исходя из текущих значений давления пара в ПЗТП ТУ ГДТ.

На рисунке 2.2 представлена трубопроводная развязка систем паровой защиты трубчатой печи с дополнительными элементами автоматизации ПЗТП на примере ТУ ГДТ вышеуказанными техническими решениями.

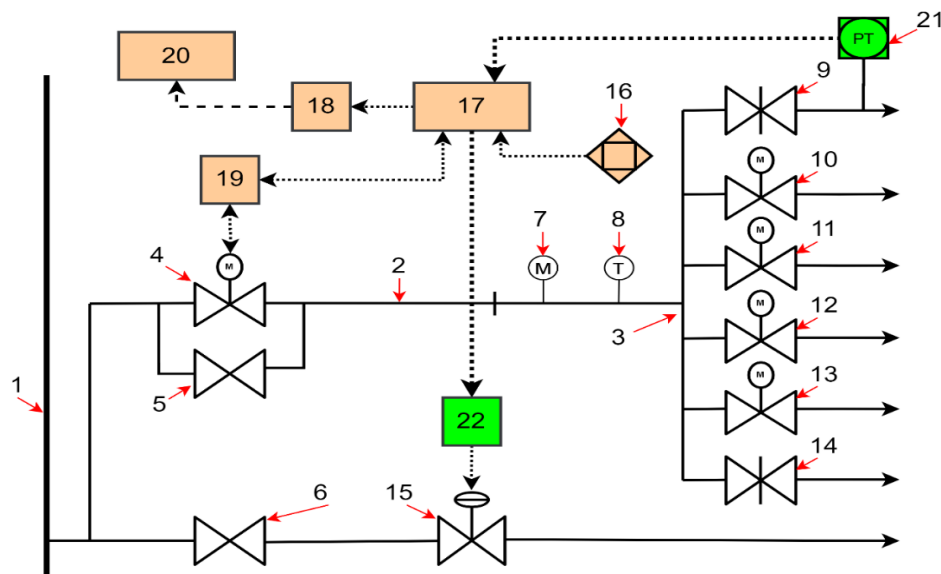


Рисунок 2.2 – Блок-схема трубопроводной развязки систем паровой защиты трубчатой печи с дополнительными элементами автоматизации ПЗТП [Привод. по: 99, с. 76]

Представленная на рисунке 2.2 блок-схема трубопроводной развязки систем паровой защиты трубчатой печи с дополнительными элементами автоматизации ПЗТП состоит из: «паропроводной сети предприятия 1; подводящего трубопровода 2; распределительного коллектора 3; главной электрозадвижки паровой защиты трубчатой печи 4; резервной ручной задвижки паровой защиты

трубчатой печи 5; проходного крана ввода пара на установку для технических нужд 6; манометра 7; термометра 8; ручной задвижки на линии ПЗТП 9; запорной арматуры других систем паровой защиты трубчатой печи 10–14; газоанализатора 16 и элементов автоматизации ПЗТП: датчика давления 21; блока управления и контроля положения регулирующего электрозадвижки (клапана) 19 и 22; контроллера системы противоаварийной автоматической защиты 17; коммутатора сети 18; регулирующего клапана подачи пара на установку для технических нужд 15; АРМ оператора технологической установки 20» [99, с. 76].

2.2. Алгоритмическое обеспечение

Алгоритмическое обеспечение подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ представляет собой сочетание математических методов и алгоритмов, обеспечивающих решение функций и задач автоматизации. Оно обеспечивает высокую эффективность работоспособности каналов передачи данных с заданными характеристиками, что позволяет минимизировать время реакции СПАЗ ТУ ГДТ.

Функции и задачи алгоритмического обеспечения заключаются в следующем:

- 1) сбор информации о параметрах давления в паропроводе на линии ПЗТП;
- 2) выдача и индикация данных на АРМ оператора;
- 3) управление давлением пара в системе на основе метода регулирования с обратной связью;
- 4) при определении значений давления пара ниже установленного, автоматическое снижение подачи пара на технологические нужды установок комплекса нефтепереработки;
- 5) приведение текущих значений давления пара к заданным значениям.

Для технологических установок нефтеперерабатывающих производств ранее авторами работ [42, 43, 73, 98] были представлены алгоритмы функционирования АСУ ПЗ по уровням иерархической структуры, а также технические структуры

взаимодействия источников информации, логических устройств, исполнительных механизмов, специального программного обеспечения оператора, выдающих управляющие воздействия. Однако на сегодняшний день не были рассмотрены и разработаны алгоритмы контроля, управления давлением пара в ПЗТП.

Для разработки алгоритмического обеспечения необходимо создать математическую модель процесса управления подсистемой контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ [99]. Модель должна основываться на пропорциональной зависимости текущего давления пара в линии ПЗТП ТУ ГДТ и расхода пара на технологические нужды установок нефтеперерабатывающего комплекса [70].

Известны применяемые в современных АСУ ТП такие принципы и методы пропорционального регулирования: пропорциональный (П); пропорционально-интегральный (ПИ); пропорционально-дифференциальный (ПД); пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД).

Согласно материалам источника [81], базовая математическая модель выходного управляющего сигнала на момент времени « t » $Y_i(t)$, %, для П-регулятора в цифровом виде выглядит следующим образом:

$$Y_i(t) = \frac{1}{X_p} \cdot E_i(t) \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

для ПИ-регулятора:

$$Y_i(t) = \frac{1}{X_p} \cdot \left(E_i(t) + \frac{1}{T_{II}} \sum_{i=0}^n E_i(t) dt \right) \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

для ПД-регулятора:

$$Y_i(t) = \frac{1}{X_p} \cdot \left(E_i(t) + T_{д} \frac{dE_i(t)}{dt} \right) \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

для «ПИД-регулятора:

$$Y_i(t) = \frac{1}{X_p} \cdot \left(E_i(t) + T_{д} \frac{dE_i(t)}{dt} + \frac{1}{T_{II}} \sum_{i=0}^n E_i(t) dt \right) \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

где X_p – полоса пропорциональности или заданное давление $P_{зад}$, атм;

$E_i(t)$ – разность между заданным давлением $P_{\text{зад}}$ и текущим значением давлением $P(t)$ или рассогласование на момент времени t , атм;

T_d – постоянная времени дифференцирования, с;

$dE_i(t)$ – разность ошибок регулирования между двумя соседними измерениями на момент времени t , атм;

dt – разность между периодами измерений датчиком давления пара, с;

T_{II} – постоянная времени интегрирования, с;

$\sum_{i=0}^n E_i(t)dt$ – накопленная в i -й момент сумма рассогласований на момент времени t , атм» [70].

Полоса пропорциональности X_p , атм, как и отклонение E_i , атм, выражается в единицах контролируемого параметра. Чем шире полоса пропорциональности X_p , тем меньше величина выходного сигнала Y_i при одном и том же отклонении E_i . Вне полосы пропорциональности диапазон выходного сигнала Y_i равен от 0 % до 100 % [81]. Согласно источника [47], параметры T_d и T_{II} определяют расчетом, экспериментально или оптимальным подбором значений при настройке системы.

«Текущая ошибка регулирования E_i определяется разницей между установленным (нормативным) значением давления пара и текущим значением давления пара измеренным датчиком давления:

$$E(t) = P_{\text{зад}} - P(t), \quad (2.5)$$

где $P_{\text{зад}}$ – заданное значение давления пара, атм;

$P(t)$ – текущее значение давления пара на момент времени t , атм» [70].

«Для управления текущим давлением пара P , атм, в ПЗТП ТУ ГДТ предусмотрено регулирование (управление) текущего массового расхода пара на технологические нужды установок нефтеперерабатывающего комплекса ($G_{\text{элоу}}, G_{\text{ГН}}, G_{\text{ГК}}, G_{\text{ГДТ}}$), следовательно исходя из уравнения (1.7) выходящий массовый расход пара из паропроводной сети $G_{\text{вых}}$, кг/с, определяется как сумма расходов на технологические нужды установок и паровых завес трубчатых печей:

$$G_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^n G_{\text{уст.}i} + G_{\text{ПЗ}} = G_{\text{ЭЛОУ}} + G_{\text{ГН}} + G_{\text{ГК}} + G_{\text{ГДТ}} + G_{\text{ПЗ}}, \quad (2.6)$$

где $\sum_{i=1}^n G_{\text{уст.}i}$ – сумма расходов пара на технологические нужды i -го количества установок, кг/с;

$G_{\text{ЭЛОУ}}$ – расход пара на технологические нужды ЭЛОУ-АТ, кг/с;

$G_{\text{ГН}}$ – расход пара на технологические нужды установки гидроочистки нефти, кг/с;

$G_{\text{ГК}}$ – расход пара на технологические нужды установки гидроочистки керосина, кг/с;

$G_{\text{ГДТ}}$ – расход пара на технологические нужды установки гидроочистки дизельного топлива, кг/с;

$G_{\text{ПЗ}}$ – расход пара для паровых завес трубчатых печей входящих в состав комплекса, кг/с» [70].

Стабилизация требуемого значения давления предусматривается за счет управления расходом пара на технологические нужды установок через проходной клапан. «Расход пара через клапан $G_{\text{кл}}$, кг/с, зависит от площади проходного сечения клапана, скорости потока и плотности насыщенного пара и определяется по формуле:

$$G_{\text{кл}} = A_{\text{кл}} \cdot v_{\text{кл}} \cdot \rho, \quad (2.7)$$

где $A_{\text{кл}}$ – площадь проходного сечения клапана, м²;

$v_{\text{кл}}$ – скорость потока пара через клапан, м/с;

ρ – плотность насыщенного пара, кг/м³» [70].

Управление расходом пара для технологических нужд установок нефтеперерабатывающего комплекса используется безинерционный дисковый клапан с диаметром 300 мм. Полная площадь проходного сечения клапана $A_{\text{кл.макс}}$, м², определяется по формуле:

$$A_{\text{кл.макс}} = \frac{\pi d_{\text{кл}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,3 \text{ м})^2}{4} = 0,0707 \text{ м}^2, \quad (2.8)$$

где $d_{\text{кл}}$ – диаметр проходного сечения клапана, м.

Для клапана принят максимальный расход в количестве 2,77 кг/с (10 т/ч) и потребление в стандартных условиях технологического процесса 1,38 кг/с (5 т/ч). Для расчета скорости потока при максимальном расходе через клапан $G_{\text{кл.макс}}$, м³/с, необходимо перевести расход из количественного (кг/с) в объемный (м³/с), а также предварительно определив плотность пара ρ , кг/м³, получим текущий расход пара через регулирующий клапан $G_{\text{кл.тек}}$, м³/с:

$$\rho = \frac{P}{R_{\text{пар}} T} = \frac{1013250 \text{ Па}}{461,5 \text{ Дж/кгК} \cdot 446 \text{ К}} = 4,93 \text{ кг/м}^3, \quad (2.9)$$

$$G_{\text{кл.макс}} = \frac{G_{\text{уст}}}{\rho} = \frac{2,77 \text{ кг/с}}{4,93 \text{ кг/м}^3} = 0,56 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.10)$$

$$G_{\text{кл.тек}} = \frac{G_{\text{уст}}}{\rho} = \frac{1,88 \text{ кг/с}}{4,93 \text{ кг/м}^3} = 0,28 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.11)$$

где P – рабочее давление насыщенного водяного пара, Па;

$R_{\text{пар}}$ – универсальная газовая постоянная для водяного пара, Дж/кгК;

T – абсолютная температура насыщенного водяного пара, К;

$G_{\text{уст}}$ – расход пара для технологических нужд одной из установок нефтеперерабатывающего комплекса, кг/с;

ρ – плотность насыщенного водяного пара, кг/м³.

Скорость потока при максимальном расходе через клапан $v_{\text{кл.макс}}$, м/с, вычисляется по формуле:

$$v_{\text{кл.макс}} = \frac{G_{\text{кл.макс}}}{A_{\text{кл.макс}}} = \frac{0,56 \text{ м}^3/\text{с}}{0,0707 \text{ м}^2} = 7,92 \text{ м/с}, \quad (2.12)$$

где $G_{\text{кл.макс}}$ – максимальный расход пара через регулирующий клапан, м³/с;

$A_{\text{кл.макс}}$ – максимальное значение площади сечения клапана, м².

Для текущего расхода площадь сечения клапана $A_{\text{кл.тек}}$, м², вычисляется по формуле:

$$A_{\text{кл.тек}} = \frac{G_{\text{уст}}}{v_{\text{кл.макс}}} = \frac{0,28 \text{ м}^3/\text{с}}{7,92 \text{ м/с}} = 0,035 \text{ м}^2, \quad (2.13)$$

где $G_{\text{уст}}$ – расход пара для технологических нужд одной из установок нефтеперерабатывающего комплекса, кг/с;

$v_{\text{кл.макс}}$ – скорость движения пара через клапан при максимальном значении площади сечения клапана, м/с.

Примем линейную зависимость между площадью сечения клапана и положения штока, в данном случае текущее положение штока клапана $x_{\text{кл.тек}}$, будет определяться по формуле:

$$x_{\text{кл.тек}} = \frac{A_{\text{кл.тек}} - A_{\text{кл.мин}}}{A_{\text{кл.макс}} - A_{\text{кл.мин}}}, \quad (2.14)$$

где $A_{\text{кл.мин}}$ и $A_{\text{кл.макс}}$ – минимальное и максимальное значения площади сечения клапана, м².

Примем, что при $A_{\text{кл.мин}} = 0$ клапан полностью закрыт и при $A_{\text{кл.макс}} = 1$ полностью открыт, тогда формула текущего положения клапана $x_{\text{кл.тек}}$, примет следующий вид:

$$x_{\text{кл.тек}} = \frac{A_{\text{кл.тек}}}{A_{\text{кл.макс}}} = \frac{0,035 \text{ м}^2}{0,0707 \text{ м}^2} = 0,5, \quad (2.15)$$

где $A_{\text{кл.мин}}$ и $A_{\text{кл.макс}}$ – текущее и максимальное значения площади сечения клапана, м².

Таким образом, для обеспечения расхода пара 5 т/ч при максимальной скорости потока 7,92 м/с, положение штока клапана должно составлять 0,5 (или 50 % от максимально возможного открытия).

Положение штока на момент времени $x_{\text{кл}}(t)$ связано с управляющим воздействием регулятора на момент времени $Y_i(t)$, который управляет положением штока путем приращения текущего положения, следующим образом:

$$x_{\text{кл}}(t) = x_{\text{кл.тек}}(t) + Y_i(t), \quad (2.16)$$

где $x_{\text{кл.тек}}(t)$ – текущее положения клапана подачи пара на технологические нужды установки на момент времени t .

Исследование автора диссертации [70] показывает, что «на основе уравнений (2.7–2.16), а также с учетом обозначения максимальной площади проходного

сечения клапана как $A_{\text{кл}}$, м², максимальной скорости потока пара через клапан как $v_{\text{кл}}$, м/с, плотности насыщенного пара как ρ , кг/м³, текущего положения клапана подачи пара на технологические нужды установки на момент времени как $x_{\text{кл.тек}}(t)$, построим уравнение описывающее расход пара через клапан для технологических нужд одной установки комплекса $G_{\text{уст}}(t)$, кг/с:

$$G_{\text{уст}}(t) = A_{\text{кл}} \cdot v_{\text{кл}} \cdot \rho \cdot (x_{\text{кл}}(t) + Y_i(t)), \quad (2.17)$$

где $Y_i(t)$ – управляющий сигнал регулятора, %» [70].

Также в исследовании автора диссертации [70] указывается, что «в пропорциональных регуляторах управление зависит от вычисляемой ошибки регулирования. Для улучшения качества управления целесообразно использовать фильтры, которые помогают уменьшить влияние шума и других нежелательных колебаний, что улучшает точность и стабильность системы. В настоящее время существуют различные типы фильтров, применяемые в зависимости от цели фильтрации. Среди наиболее распространенных цифровых фильтров можно отметить:

- 1) фильтры нижних частот. Они помогают убрать высокочастотные колебания из сигнала ошибки, тем самым уменьшая влияние шума;
- 2) фильтры скользящего среднего. Используются для сглаживания сигнала путем усреднения значений ошибки за определенный период времени;
- 3) фильтры Калмана. Это сложные алгоритмические фильтры, которые могут использоваться для предсказания состояния системы и фильтрации шума из сигнала» [70].

Необходимо отметить, что «среди вышперечисленных наиболее простым и перспективным фильтром для линейной системы является фильтр скользящего среднего (ФСС). Уравнение ФСС текущей ошибки регулирования $E_{ci}(t)$, атм, имеет следующий вид:

$$E_{ci}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t E_i(t), \quad (2.18)$$

где $E_i(t)$ – текущая ошибка регулирования в момент времени t , атм;

N – количество точек или ширина по которым рассчитывается скользящее среднее текущей ошибки регулирования E_{ci} » [70].

Автором диссертации в работе [70] «для улучшения процесса управления предлагается новый метод – двойная фильтрация скользящего среднего текущей ошибки регулирования. Этот метод заключается в последовательной вторичной фильтрации ранее полученных значений скользящего среднего ошибки. Уравнение фильтра двойной скользящей средней (ФДСС) текущей ошибки регулирования $E_{2ci}(t)$, атм, примет следующий вид:

$$E_{2ci}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t E_{ci}(t), \quad (2.19)$$

где $E_{ci}(t)$ – скользящее среднее текущей ошибки регулирования в момент времени t , атм;

N – количество точек или ширина по которым рассчитывается двойное скользящее среднее текущей ошибки регулирования E_{2ci} » [70].

Исходя из уравнений (1.1–1.8) и (2.4–2.19) «представлена развернутая модель процесса управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ на основе синтеза ПИД регулятора и ФДСС:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_i(t) = P_{\text{зад}} - P_i(t), \\ E_{ci}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t E_i(t), \\ E_{2ci}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t E_{ci}(t), \\ Y_i(t) = \frac{1}{P_{\text{зад}}} \cdot \left(E_i(t) + T_d \frac{dE_i(t)}{dt} + \frac{1}{T_{II}} \sum_{i=0}^n E_i(t) dt \right) \cdot 100\%, \\ Y_i(t) > 0, \\ G_{\text{вых}}(t) = A_{\text{кл}} \cdot v_{\text{кл}} \cdot \rho \cdot \left((x_{\text{элов}}(t) + Y_i(t)) + (x_{\text{гн}}(t) + Y_i(t)) + \right. \\ \left. + (x_{\text{гк}}(t) + Y_i(t)) + (x_{\text{гдт}}(t) + Y_i(t)) \right) + G_{\text{пз}}, \\ P_i(t) = P_{i-1}(t) + \frac{R_{\text{пар}} T}{V} \cdot (G_{\text{вх}}(t) - G_{\text{вых}}(t)) - \frac{0,8125 \cdot l \cdot \lambda \cdot G_{\text{вых}}^2(t)}{d^5 \cdot \rho}, \end{array} \right. \quad (2.20)$$

где $E_i(t)$ – ошибка регулирования на момент времени t , атм;

$P_{\text{зад}}$ – заданное значение давления пара, 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 двойное скользящее среднее текущей ошибки регулирования;

$Y_i(t)$ – управляющий сигнал регулятора, %;

T_D – постоянная времени дифференцирования, с;

$dE_{2ci}(t)$ – i -ое значение разности ФДСС текущей ошибки регулирования в момент времени t , атм;

dt – разность между периодами измерений датчиком давления пара, с;

T_I – постоянная времени интегрирования, с;

$\sum_{i=0}^n E_{2ci}(t)dt$ – накопленное i -ое значение суммы рассогласований ФДСС 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, м²;

$v_{\text{кл}}$ – скорость потока при максимальном расходе через клапан, м/с;

ρ – плотность насыщенного пара, кг/м³;

$x_{\text{элов}}(t)$ – 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;

$G_{пз}$ – массовый расход пара на паровые завесы трубчатых печей комплекса нефтепереработки, кг/с;

$P_{i-1}(t)$ – начальное значение давления пара в начале участка паропровода на момент времени t , атм;

$R_{пар}$ – универсальная газовая постоянная для водяного пара при рабочем давлении, Дж/кгК;

T – температура пара, К;

V – объем паропровода, м³;

$G_{вх}(t)$ – входящий массовый расход пара на момент времени t , кг/с;

l – длина участка паропровода, м;

λ – коэффициент гидравлического трения;

d – условный диаметр паропровода, м» [70].

Исходя из математической модели (2.20) построена структурная блок-схема процесса управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ и представлена на рисунке 2.3.

Представленная на рисунке 2.3 структурная блок-схема математической модели процесса управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ включает шесть блоков, где:

- 1 блок – переводит значения из атм в Па;
- 2 блок – вычисляет управляющий сигнал согласно текущей ошибки регулирования и ФДСС;
- 3 блок – управляет положением клапанов подачи пара на технологические нужды установок;
- 4 блок – определяет изменение массы пара и давления в паропроводе;
- 5 блок – определяет удельные потери на трение при перемещении пара по паропроводу;
- 6 блок – переводит значения из Па в атм.

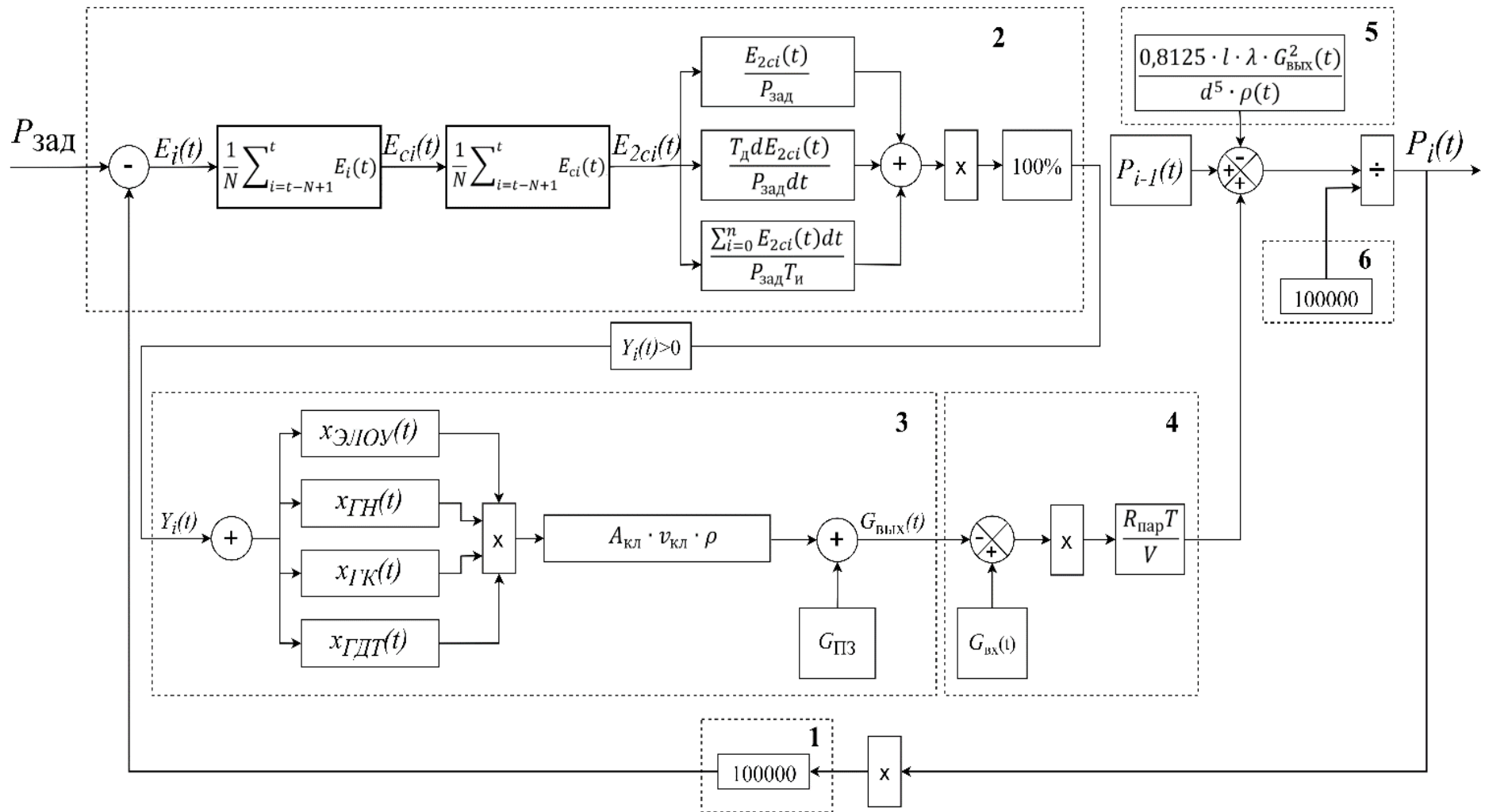


Рисунок 2.3 – Структурная блок-схема математической модели процесса управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с ФДСС

«На основе математической модели (2.20) и метода регулирования с обратной связью разработаны алгоритмы функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ в режиме моделирования» [70] и при работе с физическими датчиками. «Блок-схема алгоритма функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ в режиме моделирования представлена на» [70] рисунке 2.4.

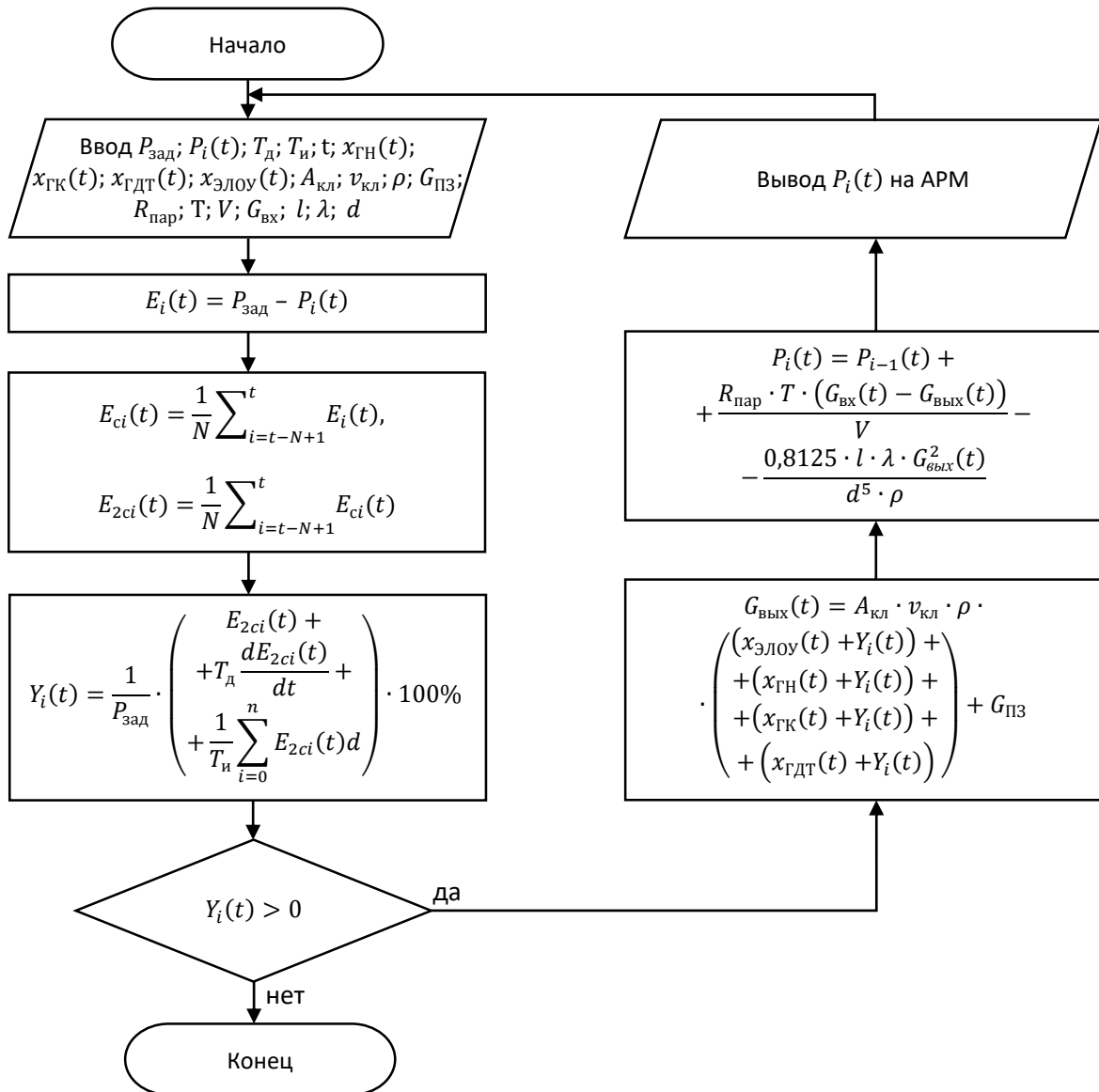


Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритма функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ в режиме моделирования [Привод. по: 70]

Алгоритм в режиме моделирования предусматривает следующую последовательность действий:

- ввод исходных данных;
- расчет текущей ошибки регулирования;
- фильтрация двойной скользящей средней текущей ошибки регулирования;
- расчет значения управляющего воздействия;
- проверка условия управления регулирующими клапанами подачи пара на технологические нужды установок, при положительном значении управляющего воздействия выполняется управление на соответствующее значение;
- определение массового расхода пара из паропровода при работе паровых завес трубчатых печей и расхода пара для технологических нужд (с учетом изменений положений регулирующих клапанов подачи пара для технологических нужд установок на вычисленное ранее значение управляющего воздействия);
- вычисление текущего значения давления пара в ПЗТП ТУ ГДТ;
- вывод значения текущего значения давления пара в ПЗТП ТУ ГДТ $P_i(t)$ на АРМ;
- цикл повторяется до выполнения условия $Y_i(t) < 0$, соответственно при нулевом или отрицательном значении работа алгоритма заканчивается.

Алгоритм при работе с физическими датчиками предусматривает следующую последовательность действий:

- достижение положения штока электродвигателя системы паровой защиты трубчатой печи положения «Открыто»;
- автоматический ввод заданного значения давления пара, постоянных времени интегрирования и дифференцирования;
- определение значения текущего давления пара;
- вывод значения текущего давления пара на АРМ;
- расчет текущей ошибки регулирования;
- фильтрация двойной скользящей средней текущей ошибки регулирования;
- расчет значения управляющего воздействия;
- проверка условия управления регулирующими клапанами подачи пара на технологические нужды установок;

– изменение положений регулирующих клапанов подачи пара для технологических нужд установок на вычисленное ранее значение управляющего воздействия;

– цикл повторяется до выполнения условия $Y_i(t) < 0$ и работа алгоритма заканчивается.

Блок-схема алгоритма функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ в режиме работы с физическими датчиками представлена на рисунке 2.5.

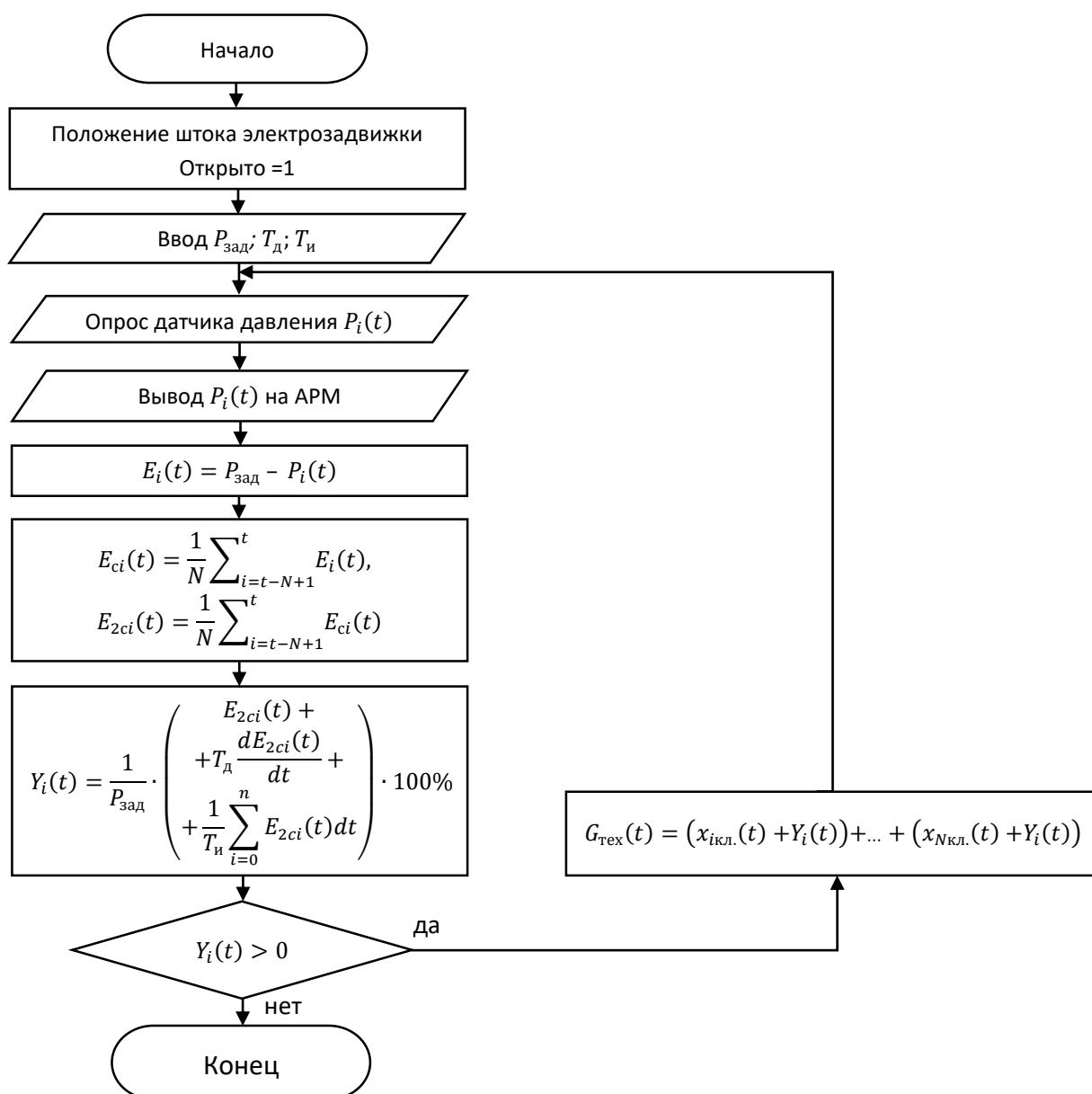


Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритма функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ в режиме работы с физическими датчиками

2.3. Программное обеспечение

«На основе математической модели (2.20) и алгоритмов, представленных на рисунках 2.4 и 2.5, разработана программа для ЭВМ «Программный модуль автоматической системы контроля и поддержки давления пара противопожарной паровой завесы трубчатой печи» (программный модуль) [72]» [70].

Программный модуль [72] функционирует на основе физических данных, полученных от датчика давления пара, установленного в коллекторе ПЗТП, а также в режиме моделирования изменений давления пара в коллекторе согласно алгоритму, представленному на рисунке 2.4.

Программный модуль [72] обеспечивает сбор данных о параметрах давления пара в коллекторе ПЗТП в период функционирования. Он также обеспечивает автоматическую поддержку (управление) установленного значения давления пара путем автоматического снижения подачи пара на технологические нужды установок в составе комплекса нефтепереработки, где используется ПЗТП.

Программный модуль [72] вычисляет величину управляющего воздействия на электропривод штока регулирующего клапана подачи пара на технологические нужды установки, контролируя изменения давления пара после регулировочного воздействия на клапан.

Для разработки программного модуля [72] использован объектно-ориентированный язык программирования общего назначения C#. Программный модуль [72] предназначен для работы в персональном компьютере с операционной системой Microsoft Windows 7 и выше. Объем программы составляет 40,5 Кб. Программный модуль прошел государственную регистрацию в реестре программ для ЭВМ, свидетельство представлено в приложении А. Программный модуль [72] позволит оператору технологического процесса дистанционно оценить качество работы ПЗТП в период ее функционирования, а также позволит обеспечить автоматизированное управление давлением пара.

На рисунке 2.6 представлен интерфейс программного модуля [72].

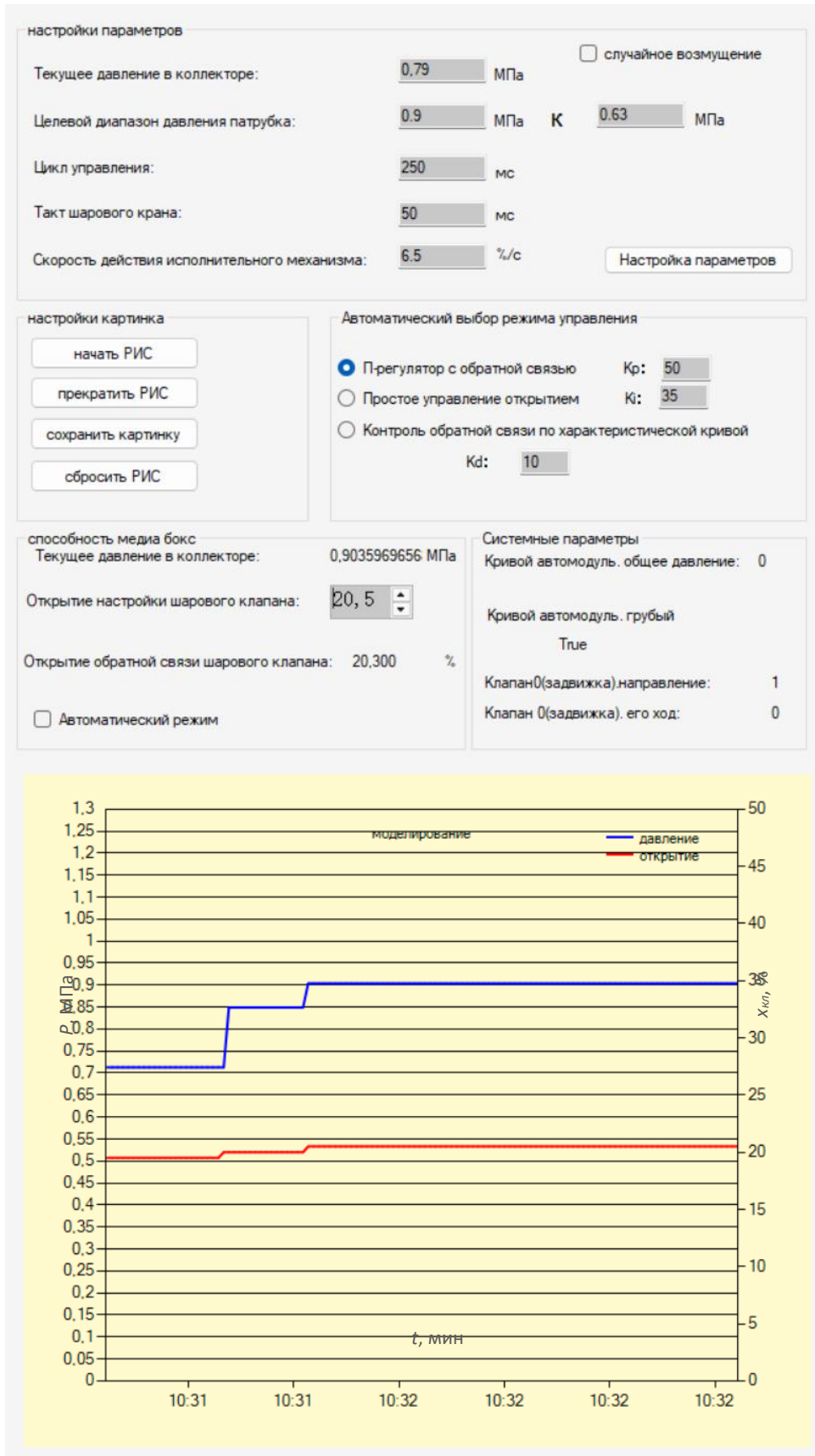


Рисунок 2.6 – Интерфейс программного модуля автоматической системы контроля и поддержки давления пара противопожарной паровой завесы трубчатой печи

2.4. Моделирование процесса функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива

В связи с непрерывной работой трубчатых печей в действующих нефтеперерабатывающих комплексах и отсутствием возможности проведения натуральных испытаний, в разработанном программном обеспечении [72] проведено моделирование процесса функционирования подсистемы с подбором постоянных времени интегрирования и дифференцирования. Для моделирования в качестве исходных данных было использовано текущее давление пара $P(t)$, атм, в паропроводе на участке ТУ ГДТ при одновременном запуске паровых завес трубчатых печей пяти технологических установок КППН ЛК–6У, равное 7,95 атм, при массовом расходе пара $G_{\text{вых}} = 26,65$ т/ч и поступлении пара в паропровод $G_{\text{вх}} = 24$ т/ч. Полоса пропорциональности X_p , атм, определена как заданное давление $P_{\text{зад}}$, атм, для стабильного и эффективного функционирования ПЗТП ТУ ГДТ, равное 9 атм. Разность между периодами измерений датчиком давления пара dt принята 1 с. Результаты моделирования управления давлением в паропроводе ПЗТП ТУ ГДТ с использованием П-регулятора представлены на рисунке 2.7.

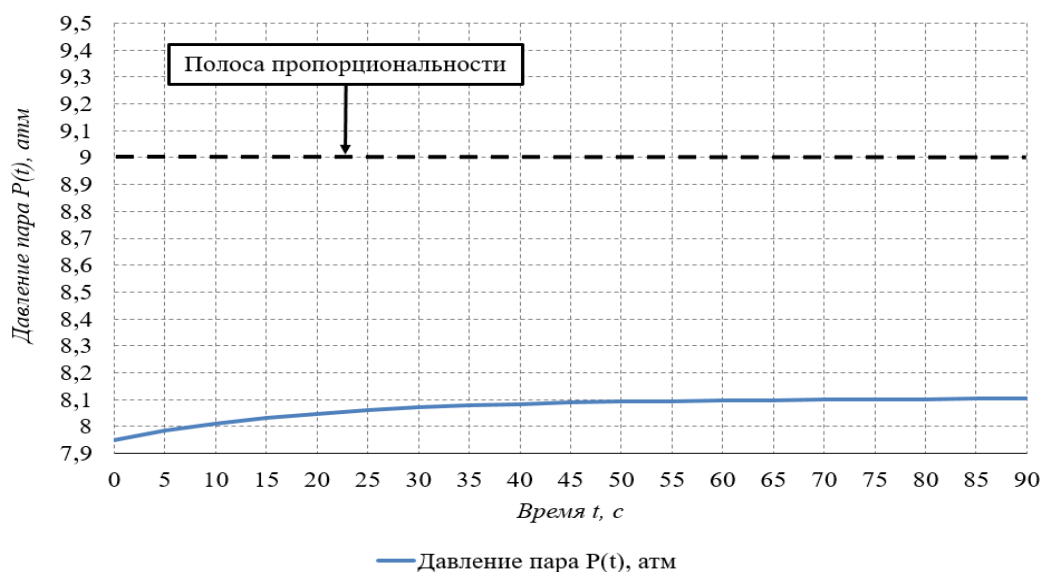


Рисунок 2.7 – Результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с П-регулятором

Результаты моделирования с использованием П-регулятора, представленные на рисунке 2.7, свидетельствуют об относительно медленном переходном процессе и недостижении регулируемым параметром полосы пропорциональности. Это связано с присутствующей ненулевой статической погрешностью.

Моделирование функционирования подсистемы с использованием ПИ-регулятора проведено при изменении постоянной времени интегрирования T_{II} в интервале от 0,01 до 0,05. На рисунке 2.8 представлены результаты моделирования управления давлением в паропроводе ПЗТП ТУ ГДТ с использованием ПИ-регулятора.

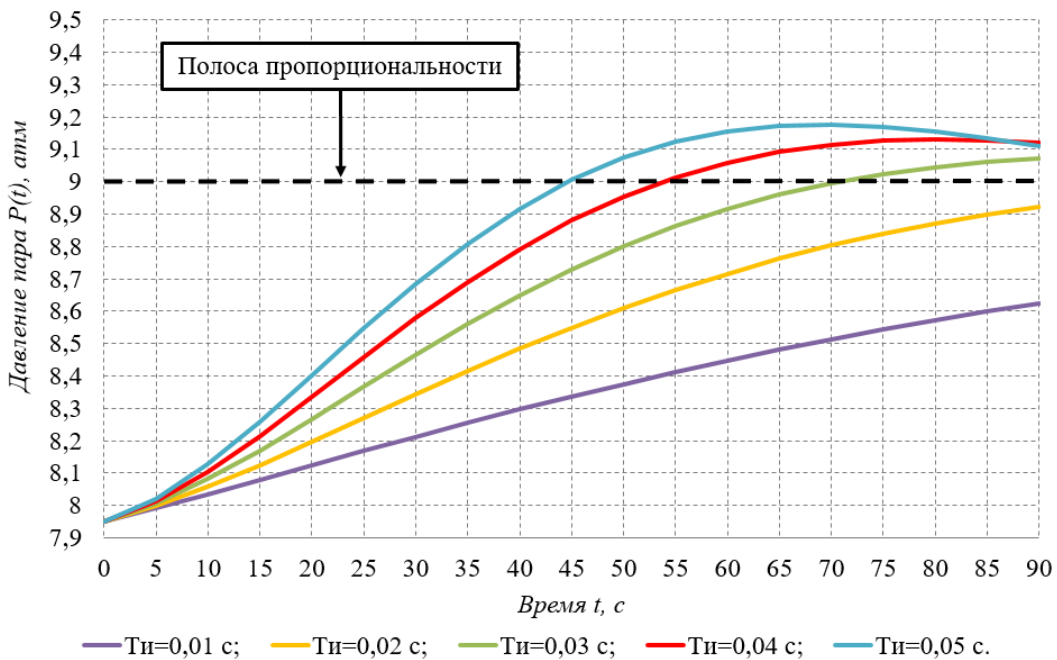


Рисунок 2.8 – Результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с ПИ-регулятором

Результаты моделирования с использованием ПИ-регулятора, представленные на рисунке 2.8, свидетельствуют об относительно медленном переходном процессе достижения регулируемым параметром полосы пропорциональности, где при значении постоянной интегрирования $T_{II} = 0,05$ с время достижения полосы пропорциональности составило 44 с. При достижении интегральной суммы значений $\sum_{i=0}^n E_i(t)dt < 0$ растет усиление регулятора и в системе появляются колебания.

Моделирование функционирования подсистемы с использованием ПД-регулятора проведено при значениях постоянной времени дифференцирования T_d в интервале от 8 до 10. На рисунке 2.9 представлены результаты моделирования управления давлением в паропроводе ПЗТП ТУ ГДТ с использованием ПД-регулятора.

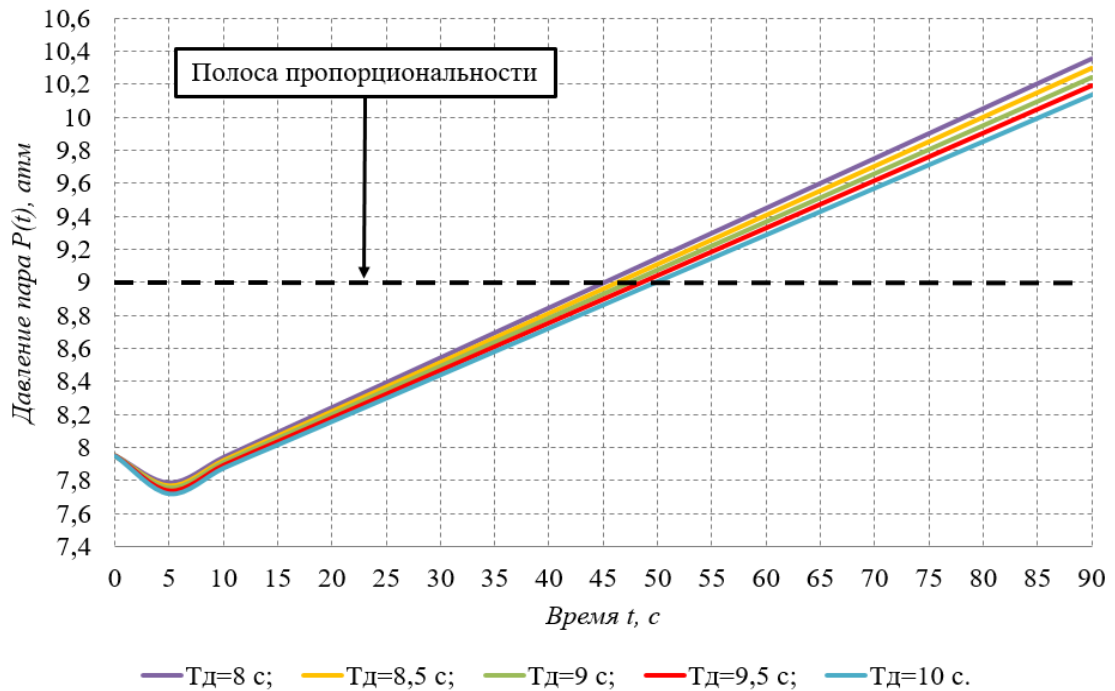


Рисунок 2.9 – Результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с ПД-регулятором

Результаты моделирования с использованием ПД-регулятора, представленные на рисунке 2.9, свидетельствуют об относительно медленном переходном процессе достижения регулируемым параметром полосы пропорциональности. Этот процесс составил 47 с при значении постоянной дифференцирования 9,5 с. Также наблюдается тенденция роста давления. Это связано с тем, что данный регулятор имеет высокое усиление и точность, но при установившемся переходном процессе он обретает статическую ошибку, свойственную П-регулятору.

Моделирование функционирования подсистемы с использованием ПИД-регулятора проведено при изменении постоянной времени интегрирования

T_{II} при значении 5 и постоянной времени дифференцирования T_D в интервале от 8 до 10. На рисунке 2.10 представлены результаты моделирования управления давлением в паропроводе ПЗТП ТУ ГДТ с использованием ПИД-регулятора.

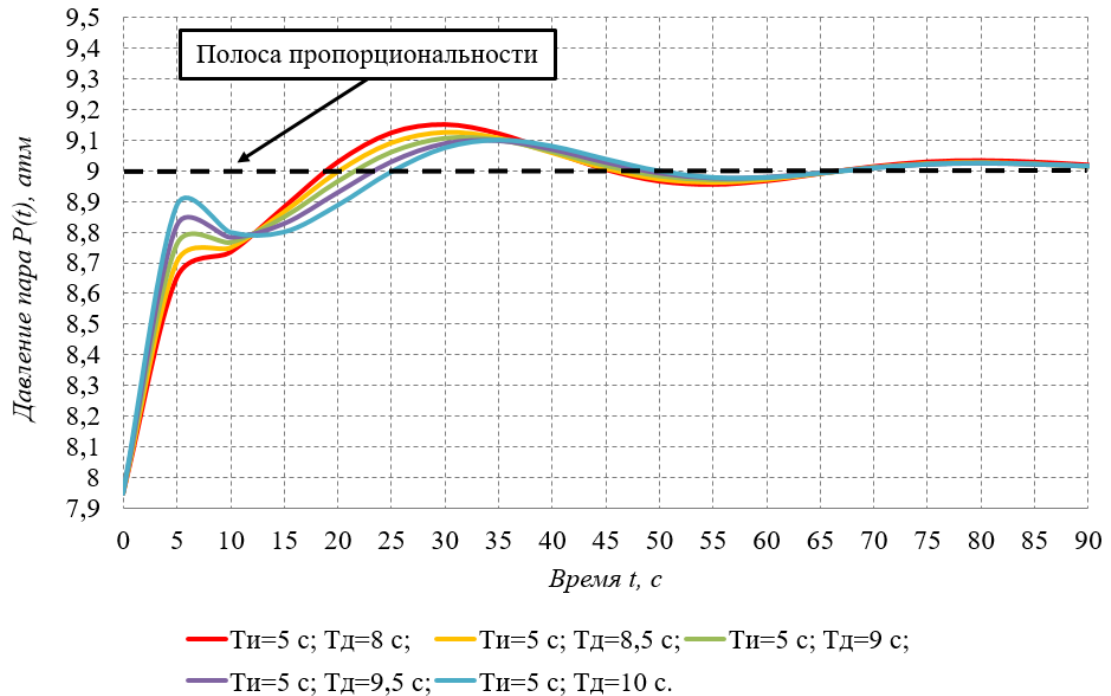


Рисунок 2.10 – Результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с ПИД-регулятором

Результаты моделирования с использованием ПИД-регулятора, представленные на рисунке 2.10, свидетельствуют об относительно быстром переходном процессе достижения регулируемым параметром полосы пропорциональности по сравнению с П, ПИ и ПД-регуляторами. Этот процесс составил 22 с при значении постоянной интегрирования 5 с и постоянной времени дифференцирования 8 с. Однако, аналогично результатам моделирования с использованием ПИ регулятора, представленным на рисунке 2.8, в системе появляются колебания.

Результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с использованием базовых математических моделей П, ПИ, ПД и ПИД-регуляторов свидетельствуют о следующем:

– П, ПД и ПИ-регуляторы демонстрируют недостаточно быстрые и качественные переходные процессы.

– ПИД-регулятор обеспечивает более быстрые переходные процессы.

– Однако в ПИ и ПИД-регуляторах наблюдается перерегулирование и возникновение колебательных процессов, что приводит к снижению регулируемого параметра ниже полосы пропорциональности.

Результаты моделирования с использованием ФСС (2.18) в сочетании с ПИД-регулятором показали, что наибольшее сглаживание процесса управления достигается при минимальной ширине ряда фильтрации. На рисунке 2.11 представлены сравнительные зависимости изменения текущей ошибки регулирования при разных значениях ширины фильтрации.

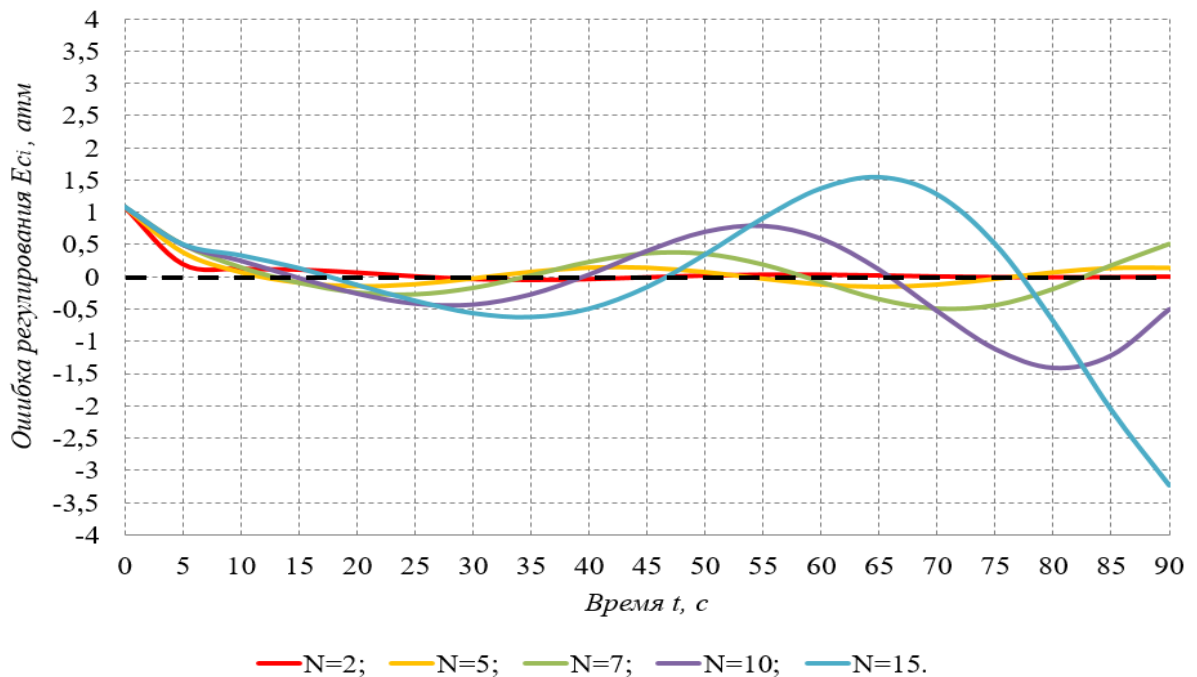


Рисунок 2.11 – Результаты измерения текущей ошибки регулирования при разных значениях ширины фильтрации

С использованием пропорциональных регуляторов в синтезе с ФСС второго порядка проведено моделирование управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ. Результаты представлены на рисунках 2.12–2.15.

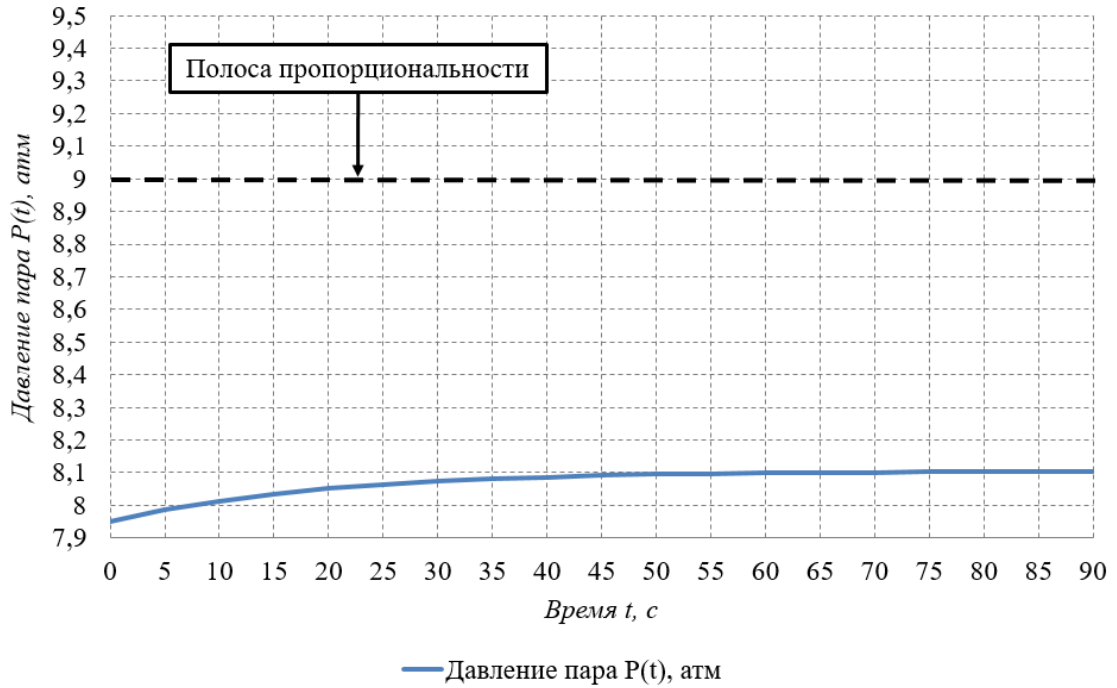


Рисунок 2.12 – Результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с использованием П-регулятора с ФСС

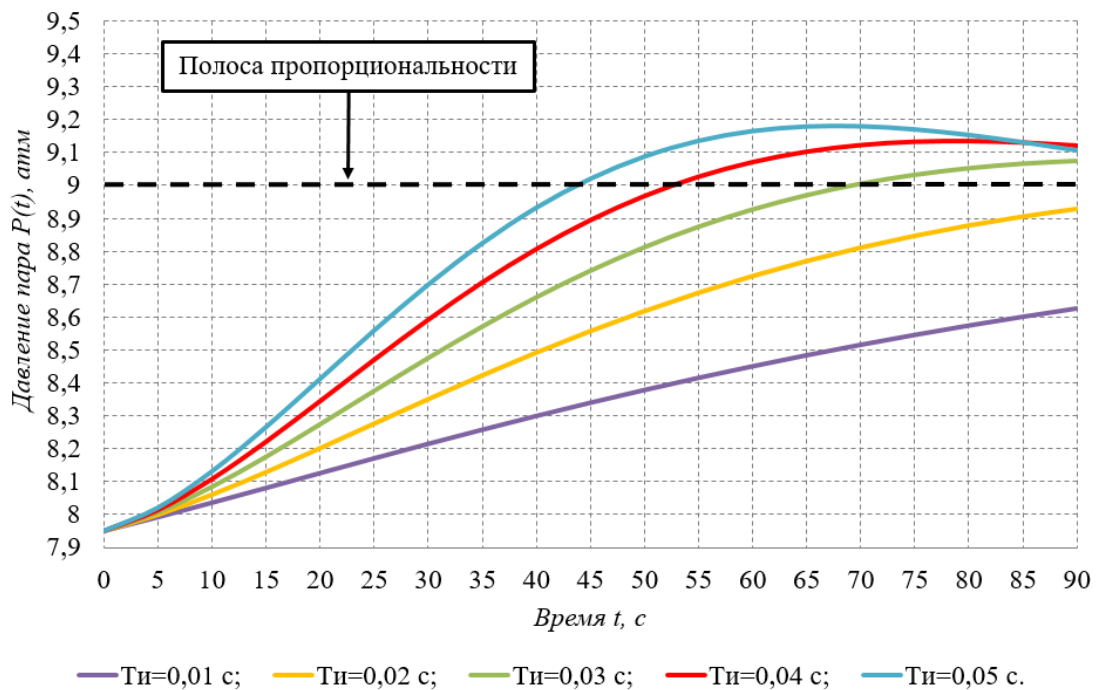


Рисунок 2.13 – Результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с использованием ПИ-регулятора с ФСС

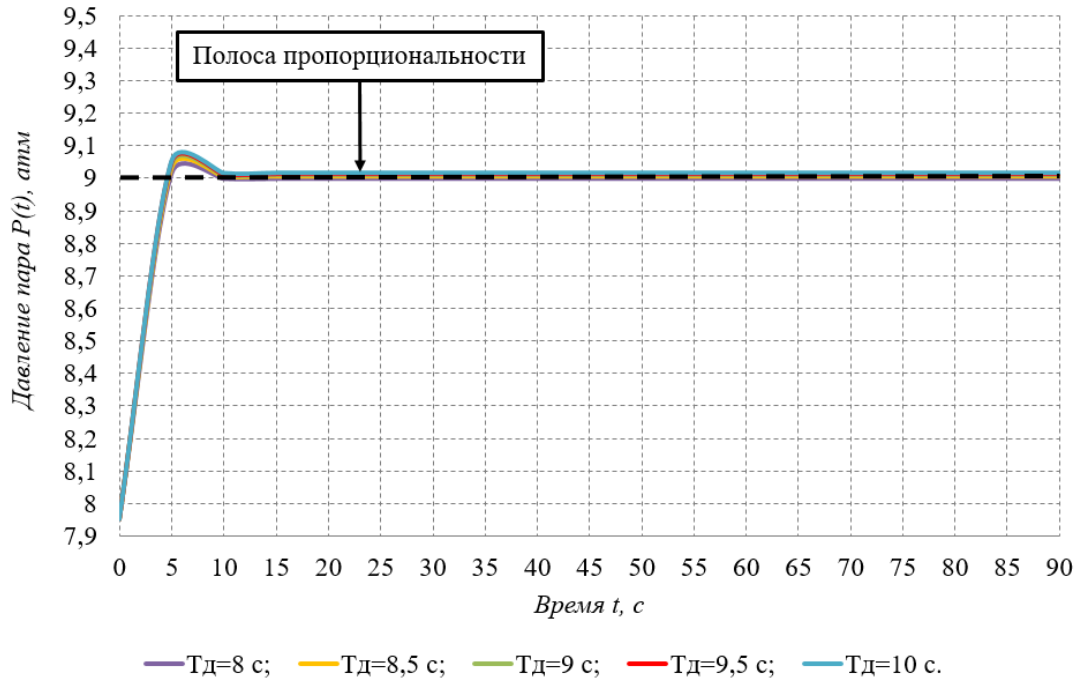


Рисунок 2.14 – Результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с использованием ПД-регулятора с ФСС

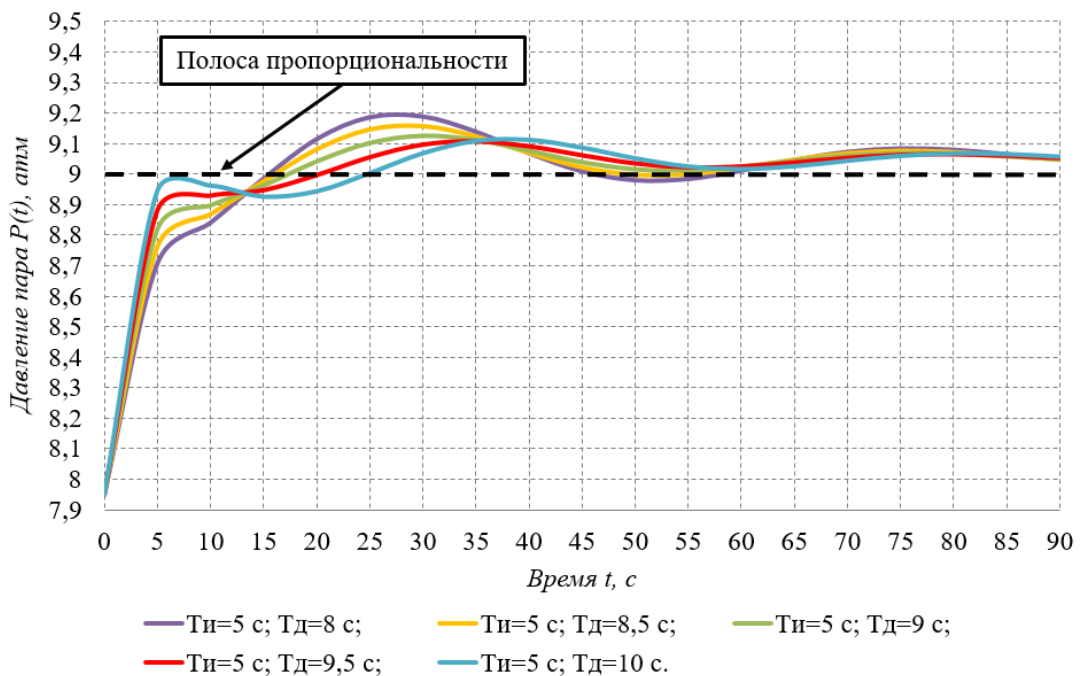


Рисунок 2.15 – Результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с использованием ПИД-регулятора с ФСС

Результаты моделирования процесса управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ, представленные на рисунках 2.13–2.15, показывают отсутствие изменений в процессах с П и ПИ-регулированием. Однако в значительной степени улучшено качество и скорость стабилизации давления пара в процессах с ПД и ПИД-регулированием.

В процессе ПД-регулирования время достижения полосы пропорциональности при постоянной времени дифференцирования, равной 10 с, сократилось на 91 % и составило 14 с. В процессе ПИД-регулирования время достижения полосы пропорциональности при постоянной времени интегрирования, равной 5 с, и времени дифференцирования, равной 9,5 с, сократилось на 18 % и составило 18 с.

На рисунке 2.16 представлены результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с использованием ПИД-регулятора, обеспеченного ФДСС текущей ошибки регулирования.

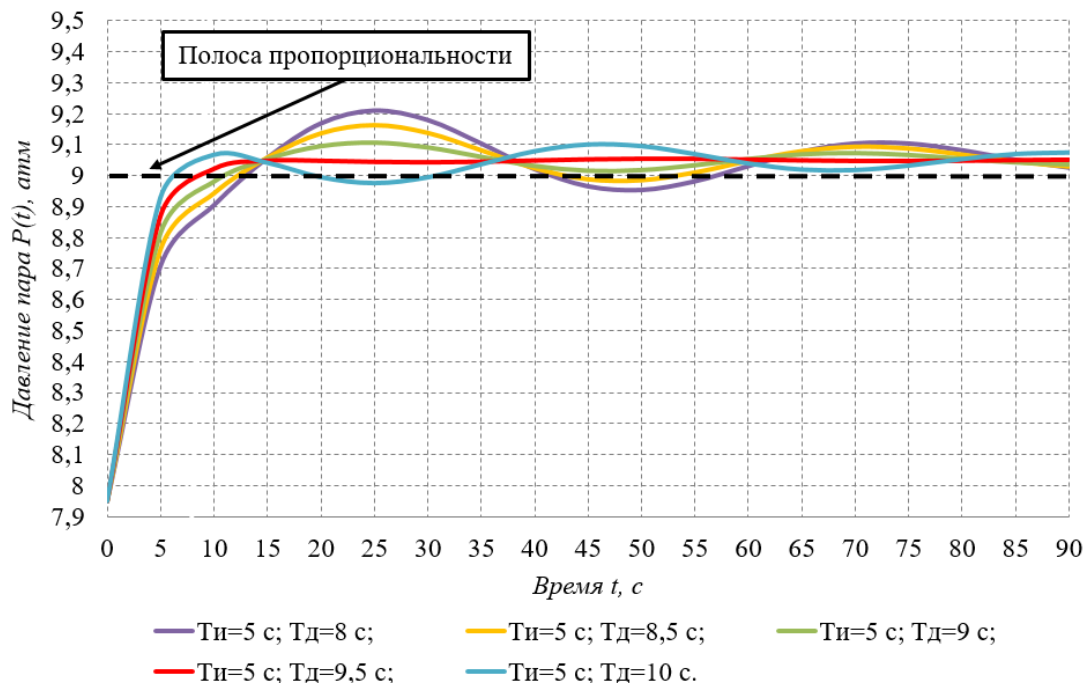


Рисунок 2.16 – Результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с использованием ПИД-регулятора и ФДСС

Представленные на рисунке 2.16 результаты моделирования функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с использованием ПИД-регулятора и ФДСС текущей ошибки регулирования показали стабильное управление процессом. При значениях постоянной времени интегрирования 5 с и постоянной времени дифференцирования 9,5 с время достижения полосы пропорциональности составило 7 с. Это на 61 % меньше по сравнению с использованием существующего метода ФСС текущей ошибки регулирования.

На рисунке 2.17 представлены сравнительные результаты процесса управления базовым ПИД-регулятором, ПИД-регулятором с ФСС и ПИД-регулятором ФДСС.

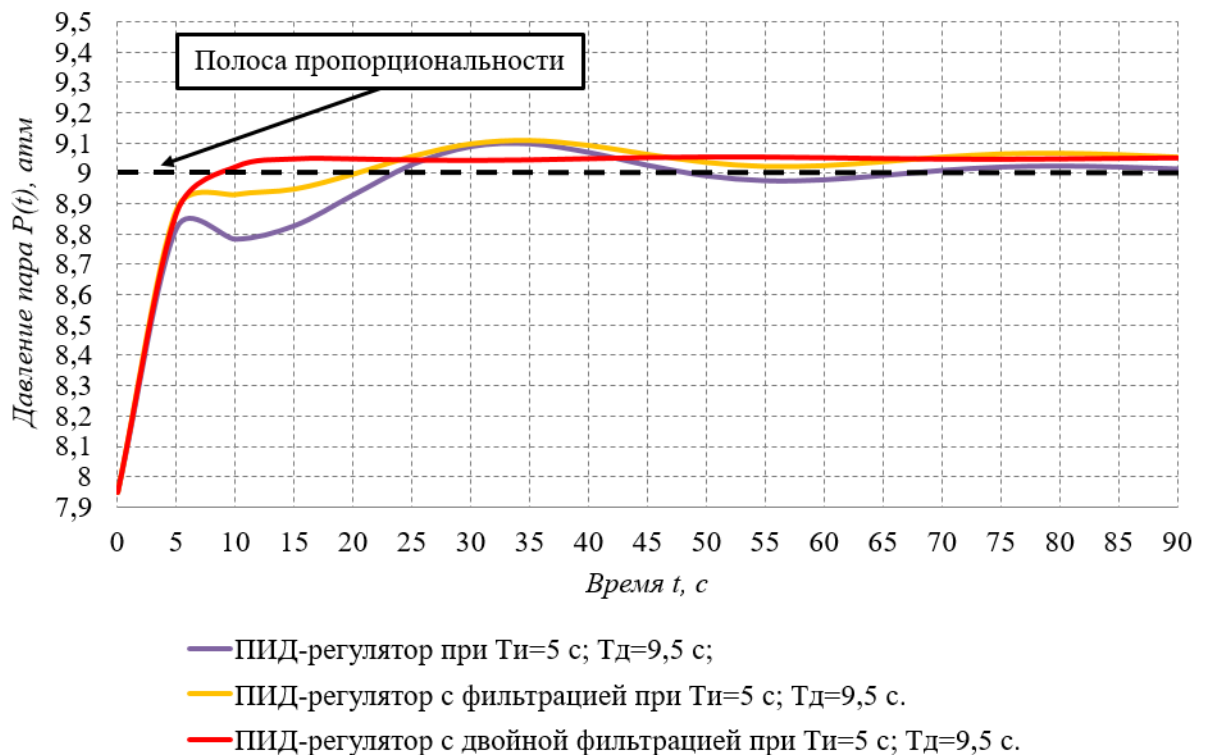


Рисунок 2.17 – Сравнительные результаты процесса управления с базовым ПИД-регулятором, с ФСС и ФДСС [Привод. по: 70]

Улучшение качества, снижение времени управления связано с влиянием процесса двойной фильтрации текущей ошибки регулирования, влияющее на динамику стабилизации интегральной и дифференциальной передаточных функций регулятора. Ниже на рисунках 2.18 и 2.19 представлена динамика

изменения интегральной и дифференциальной передаточных функций регулятора в процессе моделирования процесса управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ.

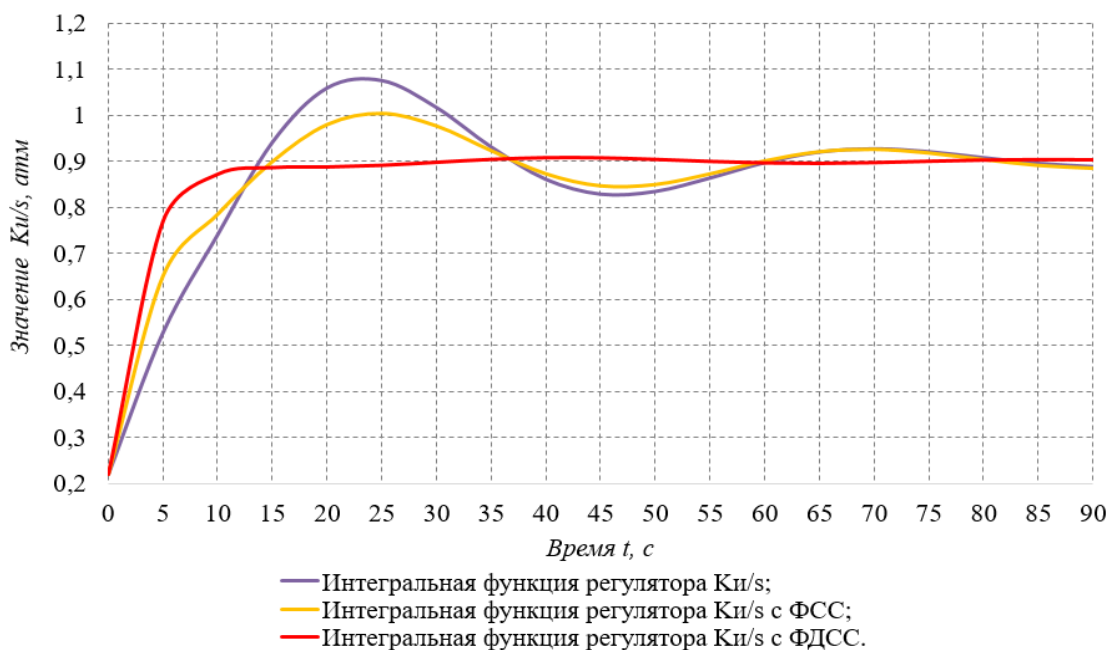


Рисунок 2.18 – Динамика изменения интегральной передаточной функции регулятора в процессе моделирования управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ [Привод. по: 70]

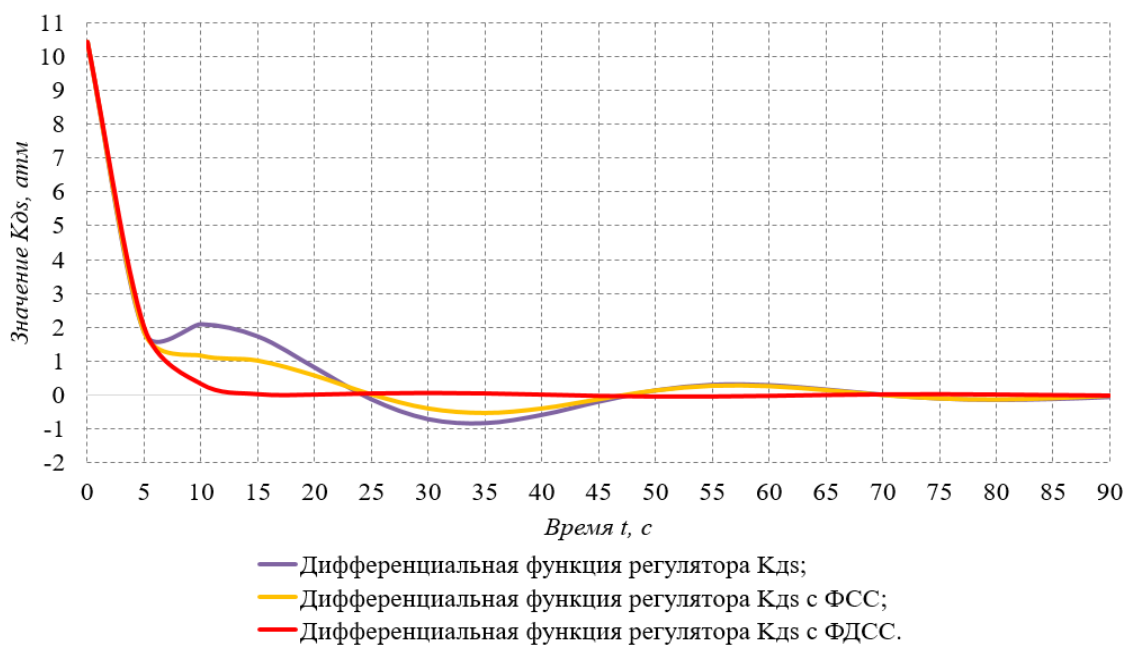


Рисунок 2.19 – Динамика изменения дифференциальной передаточной функции регулятора в процессе моделирования управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ [Привод. по: 70]

Результаты моделирования управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ при регулировании расхода пара для нужд технологических установок нефтеперерабатывающего комплекса, представленные на рисунках 2.16 и 2.17, показывают положительные результаты управления при использовании ФДСС текущей ошибки регулирования в сочетании с ПИД-регулятором. Это связано с влиянием ФДСС как на дифференциальную, так и на интегральную передаточные функции регулятора, что представлено на рисунках 2.18 и 2.19. По результатам моделирования определено ускорение переходных процессов достижения полосы пропорциональности ПИД-регулятором с ФДСС на 61 % по сравнению с использованием ФСС.

На основе результатов моделирования процесса управления давлением пара с использованием ПИД-регулятора, представленных на рисунке 2.17 и соответствующих известным методам, представленным в работах [9, 10, 109], с использованием регрессионного анализа в MS Excel проведена проверка адекватности разработанной математической модели управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ на основе синтеза ПИД-регулятора и ФДСС.

Для регрессионного анализа использована линейная модель регрессии и результаты представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты регрессионного анализа

Коэффициент корреляции, R	Коэффициент линейной детерминации, R^2	Стандартная ошибка	Коэффициент пересечения, Y	Коэффициент переменной, X
0,93	0,86	0,10	0,10	0,98

В данном случае коэффициент корреляции $R = 0,9$ показывает очень высокую взаимосвязанность переменных. Коэффициент линейной детерминации $R^2 = 0,86$ указывает на удовлетворительную точность аппроксимации функции, что свидетельствует об адекватности используемой модели для описываемого процесса управления давлением пара.

2.5. Техническое обеспечение

Комплекс технических средств (КТС) подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ строится с использованием датчика давления пара, установленного в паропроводной линии ПЗТП, контроллера ПАЗ, коммутаторов сети, подключаемых к станции оператора, и блока управления регулирующим клапаном подачи пара на технологические нужды установки.

На рисунке 2.20 представлена структурная блок-схема КТС подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с входящими элементами и структурой программируемого логического контроллера Siemens S7-300 с поэлементным резервированием согласно [54, 71].

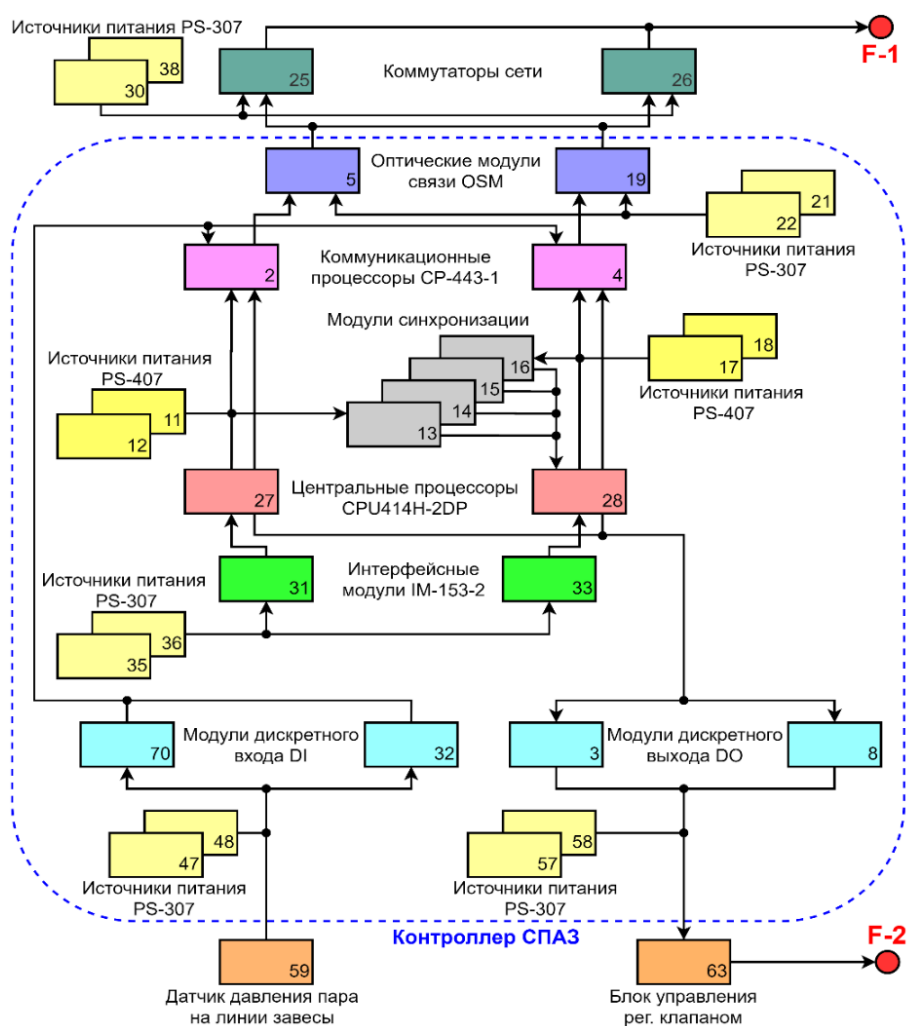


Рисунок 2.20 – Структурная блок-схема КТС подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ. Составлено по: [71]

Представленная на рисунке 2.20 блок-схема КТС создаваемой подсистемы выполнена с детализацией элементов автоматизации. В частности, показано логическое управляющее устройство (контроллер), обеспечивающее сбор, обработку данных, выдачу информационных и управляющих сигналов. Также представлены элементы, обеспечивающие передачу данных для индикации показателей текущего давления пара в период функционирования ПЗТП ТУ ГДТ на АРМ оператора. На схеме также отражены функции, выполняемые создаваемой подсистемой.

В блок-схеме КТС подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ, представленной на рисунке 2.20, показан датчик давления пара (позиция 59), установленный на паропроводной линии ПЗТП. После полного открытия главной электрозадвижки ПЗТП датчик измеряет текущее значение давления пара и преобразует его в электрический сигнал в диапазоне 4–20 мА. Этот сигнал передается в модули аналогового входа программируемого контроллера (позиции 70 и 32).

Модули аналогового входа контроллера (70 и 32) преобразуют входные сигналы от датчика 59 во внутренние логические сигналы контроллера. Затем данные передаются в коммуникационные процессоры (2 и 4), которые обеспечивают подключение контроллера к источникам информации и промышленным сетям для маршрутизации данных.

Оптические модули связи (5 и 19) обеспечивают высокоскоростной канал связи между контроллером и коммутаторами сети (25 и 26) для взаимодействия с системами человеко-машинного интерфейса (верхним уровнем иерархии АСУ). Модули синхронизации центральных процессоров обеспечивают связь базовых блоков контроллера с оптическими модулями связи (5 и 19) через коммуникационные процессоры (2 и 4).

Центральные процессоры (27 и 28) выполняют математическую обработку данных, полученных от модулей аналогового входа (70 и 32). В соответствии с заданной логикой они направляют данные о текущих параметрах и сформированные управляющие команды в систему человеко-машинного

интерфейса для индикации. Управляющие команды передаются на модули дискретного выхода (3 и 8), которые обеспечивают связь контроллера с исполнительным устройством – блоком управления регулирующим клапаном (63) объекта управления.

Интерфейсные модули (31 и 33) контроллера обеспечивают обмен данными между центральными процессорами (27 и 28). Блок управления регулирующим клапаном (63) управляет электроприводом регулирующего клапана. Источники питания (позиции 11, 12, 17, 18, 21, 22, 30, 35, 36, 38, 47, 48, 57 и 58) обеспечивают бесперебойное электроснабжение соответствующих элементов подсистемы.

Выводы по главе 2

1. На основе принципа ПИД-регулирования и фильтрации текущей ошибки регулирования двойным скользящим средним разработана математическая модель процесса управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива.

2. Разработан алгоритм управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с фильтрацией текущей ошибки регулирования двойным скользящим средним. Это позволило улучшить качество и сократить время переходных процессов управления давлением пара на 61 % по сравнению с существующими методами управления ПИД-регулятором в сочетании с фильтром скользящей средней.

3. На основе математической модели процесса управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива и алгоритмов функционирования подсистемы разработана программа для ЭВМ «Программный модуль автоматической системы контроля и поддержки давления пара противопожарной паровой завесы трубчатой печи».

4. Разработана структура комплекса технических средств создаваемой подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

3.1. Моделирование и расчет показателей надежности

3.1.1. Выбор метода, технологии моделирования и расчета показателей надежности

Функционирует ПЗТП в составе СПАЗ входящей в структуру АСУ ТП ТУ ГДТ и определяется как структурно сложная система. На сегодняшний день при разработке (проектировании) высококачественных АСУ обязательным условием является проектный расчет надежности и безопасности. Основные требования к проведению проектных расчетов надежности и безопасности АСУ представлены в российских, международных стандартах и руководящих документах, например, в [50, 51].

Главными задачами проведения проектных расчетов надежности и безопасности, представленных в работе [14], являются:

- сравнительный анализ надежности и безопасности вариантов схемно-конструктивного построения разрабатываемой системы для выбора и обоснования оптимальных проектных решений;

- оценка эффективности с технической и экономической точек зрения, которая охватывает предлагаемые меры, направленные на улучшение структуры, оптимизацию организации эксплуатации и совершенствование технического обслуживания создаваемой системы. Эти меры ставят своей целью увеличение надежности и обеспечение высокого уровня безопасности создаваемой системы;

- определение достигнутого уровня надежности и безопасности создаваемой системы.

Для оценки надежности и обеспечения безопасности технических систем широко используются аналитические подходы. В исследовании [34] к таким

подходам отнесены различные методики, включая теорию случайных процессов и методы экспертных оценок, которые позволяют осуществлять эвристическое прогнозирование. Кроме того, используются методы декомпозиции, которые базируются на принципах эквивалентности, а также логико-вероятностные подходы, позволяющие проводить детальный структурный анализ систем. На основе данных методов разработаны технологии и программные решения, которые позволяют моделировать и анализировать показатели надежности и безопасности сложных технических систем. Известными примерами таких технологий и программных комплексов, согласно [59], являются:

- «RISK SPECTRUM» (Швеция), основанный на построении исходных структурных схем свойств систем в форме деревьев отказов и деревьев событий;
- «РИСК», «CRISS–5.1», «CRISS–4.0» (РФ), основанные на построении исходных структурных схем свойств систем в форме деревьев отказов и деревьев событий;
- «SAPHIRE» (США), основанный на построении исходных структурных схем свойств систем в форме деревьев отказов и деревьев событий;
- «WINDCHILL FTA» (Германия), основанный на построении исходных структурных схем свойств систем в форме деревьев успехов;
- «WINDCHILL RBD» (Германия), основанный на построении специальной блок-схемы работоспособности (безаварийности) исследуемой системы;
- ПК АРБИТР [82], основанный на основе ОЛВМ и информационной технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ) системного анализа.

Проведенный в работе [53] анализ вышепредставленных технологий и программных комплексов показал, что программные комплексы, использующие дерево отказов, не позволяют ставить и решать задачи на основе дерева успеха или блок-схемы работоспособности, и наоборот. Программные комплексы, основанные исключительно на использовании методов дерева отказов, дерева успеха или блок-схем, не способны одновременно решать, как прямые, так и обратные задачи, связанные с моделированием и расчетом вероятностных характеристик

надежности и безопасности систем. Кроме того, такие подходы не позволяют проводить моделирование и вычисление показателей технического риска или прогнозировать возможный ущерб.

Ограничение функциональности программного обеспечения одной технологией моделирования является значительным недостатком, который существенно сужает возможности пользователя. Это ограничение снижает гибкость выбора наиболее удобного и эффективного метода для решения широкого спектра задач системного анализа.

В процессе разработки ОЛВМ, теории и технологии АСМ были решены некоторые из вышепредставленных ограничений традиционных логико-вероятностных методов. Применение СФЦ позволяет обеспечить корректное представление как всех традиционных видов монотонных структурных схем (дерево отказов, дерево событий, дерево успеха и блок-схема), так и немонотонных моделей свойств надежности и безопасности структурно-сложных системных объектов или процессов [34].

Моделирование и расчет показателей надежности создаваемой подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ будет выполнен в ПК АРБИТР [82]. Рассмотрим этапы применения технологии АСМ к расчету надежности и безопасности создаваемой подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ согласно [52]. Основными этапами являются:

- 1) постановка задачи и построение схемы функциональной целостности;
- 2) определение и ввод вероятностных параметров в ПК для расчета надежности и безопасности;
- 3) задание логических критериев функционирования исследуемой системы;
- 4) автоматическое построение вероятностных и расчетных моделей исследуемой системы в ПК;
- 5) применение результатов количественной оценки надежности и безопасности для решения задач оптимизации создаваемой системы.

В соответствии с результатами, представленными в работе [52], установлено, что значения начальных параметров элементов, включая вероятностные

характеристики, определяются на основе рекомендаций, приведенных в [14]. При этом также допускается применение стандартов и технических условий, касающихся составных частей и комплектующих элементов. Дополнительно могут использоваться специализированные справочники и базы данных, содержащие подробные сведения о надежности различных элементов и их эксплуатационных характеристиках. Изобразительные средства построения СФЦ были представлены ранее на рисунке 1.6.

Согласно данным из работы [52], условия выполнения выходных функций (F) и возникновения аварийных ситуаций (AC) в создаваемой подсистеме контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ определяются с использованием логических критериев функционирования (ЛКФ) $Y_F(\{y_i\})$ и $Y_{AC}(\{y_i\})$. Эти критерии формируют основу для анализа поведения системы, задавая четкие требования к реализации ее функциональных возможностей, а также к выявлению условий, при которых могут возникать аварийные ситуации (AC). Такой подход позволяет обеспечить точность моделирования и детальное исследование процессов, протекающих в создаваемой подсистеме. В ПК АРБИТР [82] «коэффициент готовности $KГ_{F/AC}$ восстанавливаемой АСУ ТП рассчитывается путем подстановки в многочлены $P_F(\{p_i, q_i, t\})$ или $P_{AC}(\{p_i, q_i, t\})$ числовых значений коэффициентов готовности $KГ_i$ и коэффициентов неготовности $1 - KГ_i$ элементов:

$$p_i = KГ_i = \frac{T_{Oi}}{T_{Oi} + T_{Bi}}, \quad (3.1)$$

$$q_i = 1 - KГ_i, \quad (3.2)$$

где T_{Bi} – среднее время восстановления i -го элемента» [52, с. 19], час;

T_{Oi} – средняя наработка элемента до отказа i -го элемента, год;

i – номер элемента;

$KГ_i$ – коэффициент готовности i -го элемента;

$1 - KГ_i$ – коэффициент неготовности i -го элемента.

В соответствии с данными, приведенными в работе [52], значимость элемента системы рассчитывается с использованием следующей формулы:

$$\xi_i = (P_{F/AC}(t))_{P_{i(t)=1}} - (P_{F/AC}(t))_{P_{i(t)=0}}, \quad (3.3)$$

где $P_{F/AC}(t)$ – вероятность безотказной работы (отказа) элемента системы.

«Для восстанавливаемых АСУ ТП расчет средней наработки T_O на отказ или аварийную ситуацию и среднего времени восстановления T_B осуществляется на основе формул:

$$T_O = KG_{F/AC} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^H \xi_i \frac{1}{T_{O_i}} KG_i} \right), \quad (3.4)$$

$$T_B = (1 - KG_{F/AC}) = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^H \xi_i \frac{1}{T_{O_i}} KG_i} \right) \gg [52, \text{с. 21}], \quad (3.5)$$

где ξ_i – значимость i -го элемента;

$KG_{F/AC}$ – коэффициент готовности (неготовности) системы;

KG_i – коэффициент готовности i -го элемента;

T_{O_i} – средняя наработка элемента до отказа i -го элемента, год.

Эквивалентная интенсивность отказа $\lambda_{\text{э}}$, согласно [52] выполняется по формуле:

$$\lambda_{\text{э}} = \frac{1}{T_O + T_B}, \quad (3.6)$$

где T_O – средняя наработка системы до отказа, год;

T_B – среднее время восстановления системы, час.

Расчет «вероятности безотказной работы и отказа $P_{BF/AC}$ в течение времени t функционирования восстанавливаемой АСУ ТП любой структуры, составят:

$$P_{BF/AC} = e^{-\lambda_{\text{э}} t} = e^{-\frac{t}{T_O + T_B}}, \quad (3.7)$$

$$Q_{BF/AC}(t) = 1 - P_{BF/AC}(t) \gg [52, \text{с. 21}], \quad (3.8)$$

где $\lambda_{\text{э}}$ – эквивалентная интенсивность отказа;

T_o – средняя наработка элемента до отказа системы, год;

T_B – среднее время восстановления системы, час.

3.1.2. Постановка задачи и проведение автоматизированного структурно-логического моделирования

В таблице 3.1 приведен перечень всех элементов схемы функциональной целостности (СФЦ) подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ, представленной ранее на рисунке 2.20. Также обозначены параметры их надежности согласно паспортным данным на технические изделия.

Таблица 3.1 – Параметры надежности элементов схемы функциональной целостности согласно [33, 35, 52, 78, 96]

№ эл.	Тип элемента	Обозначение на схеме	Кол-во, ед.	Средняя наработка элемента до отказа T_{oi} , год	Среднее время восстановления элемента T_{Bi} , ч
1	Интерфейсный модуль IM 153–2	31, 32	2	47,6	2
2	Центральный процессор CPU414H–2DP	27, 28	2	14,7	4
3	Модуль синхронизации	13, 14, 15, 16	4	150	2
4	Коммуникационный процессор CP 443–1	2, 4	2	20,6	3
5	Оптический модуль связи OSM	5, 19	2	33,6	4
6	Коммутатор сети SICOM3000BA	25, 26	2	43,86	2
7	Модуль дискретного входа DI SN 29500	70, 32	2	68,49	1
8	Модуль дискретного выхода DO SN 29500	3, 8	1	68,49	1
9	Датчик давления ПД100И 1х1–Exi	59	1	57,07	2

10	Блок управления клапаном КР 25ч945нж	63	1	1,14	2
11	Источник питания PS 307	47, 48, 57, 58, 35, 36, 21, 22, 30, 38	10	148	0,5
12	Источник питания PS 407	11, 12, 17, 18	4	71,5	0,5

Первичное описание рассматриваемой структуры подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ выполнено с помощью СФЦ с основными функциями: "«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" [71] установок, построенной в ПК АРБИТР [82] и изображенной на рисунке 3.1.

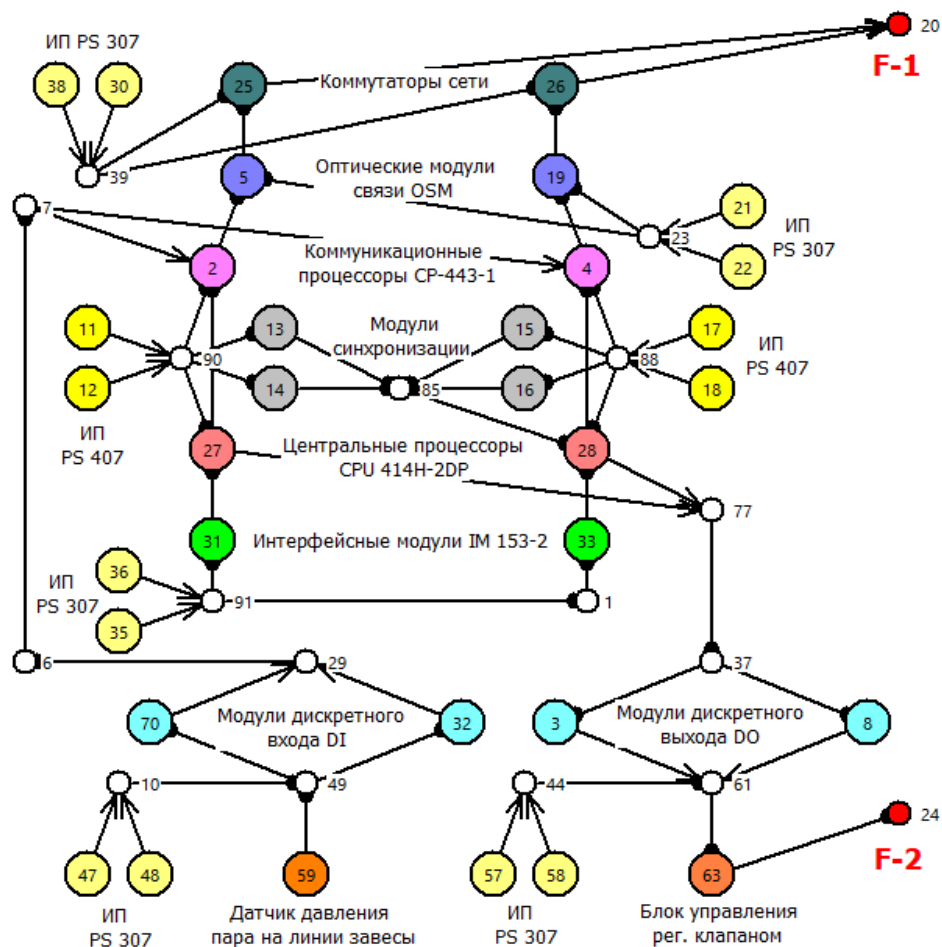


Рисунок 3.1 – Схема функциональной целостности подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ. Привод по: [71]

Основные функции подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ реализуются через контроллер СПАЗ, включающий следующие элементы:

- центральные процессоры: 27 и 28;
- коммуникационные процессоры: 2 и 4;
- интерфейсные модули: 31 и 33;
- модули синхронизации: 13–16;
- источники питания: 11, 12, 17, 18, 21, 22, 30, 35, 36, 38, 47, 48, 57, 58;
- модули дискретного входа и выхода: вход 70 и 32; выход 3 и 8;
- датчик давления пара: 59;
- блок управления клапаном: 63;
- оптические модули связи: 5 и 19;
- коммутаторы сети: 25 и 26.

Логические условия реализации выходных функций:

– датчик давления пара (59) и блок управления клапаном (63) выполняют свои функции (y_{59} и y_{63}) при выполнении двух условий:

- 1) оба устройства исправны (x_{59} и x_{63});
- 2) их работа поддерживается выходными функциями модулей дискретного

входа и выхода;

– центральные процессоры (27 и 28) контроллера СПАЗ выполняют свои функции (y_{27} и y_{28}), если работоспособен хотя бы один из модулей дискретного входа (x_{70} или x_{32});

– взаимодействие центральных процессоров 27 и 28 обеспечивается модулями синхронизации (y_{13} , y_{14} , y_{15} , y_{16}). Интерфейсные модули (31 и 33) поддерживают обмен данными между центральными процессорами (y_{31} и y_{33}).

Для повышения надежности системы в контроллере реализовано групповое резервирование центральных процессоров и интерфейсных модулей. Это обеспечивает возможность горячей замены элементов в случае отказа.

Согласно [52], синхронизация работы резервной цепи контроллера осуществляется через центральный процессор 27. Модули синхронизации (13, 14,

15, 16) объединены в фиктивную вершину 85, связанную с помощью четырех дизъюнктивных дуг.

Конъюнктивная дуга, оканчивающаяся точкой, выполняет соединение фиктивной вершины 85 с функциональными вершинами 27 и 28. Такое соединение играет ключевую роль в обеспечении синхронизации работы двух процессоров – основного, обозначенного как вершина 27, и резервного, обозначенного как вершина 28. Благодаря этому достигается согласованное функционирование центральных процессоров. Кроме того, синхронизация распространяется на всю резервную цепь элементов контроллера, что позволяет гарантировать ее слаженную работу и стабильность всей системы в целом.

Выходные функции y_{27} и y_{28} центральных процессоров 27 и 28 обеспечиваются работоспособностью функций x_3 или x_8 модулей дискретного выхода с последующей обеспеченностью работоспособности функции x_{63} блока управления клапаном 63.

Контроллер СПАЗ инициирует выдачу информационных сигналов в коммутаторы сети 25 и 26 для реализации выходной функции $F-1$, а также обеспечивает выдачу управляющих сигналов для реализации выходной функции $F-2$.

Функция $F-1$, предназначенная для предоставления данных о давлении в трубопроводах линии ПЗТП, обеспечивает отображение параметров давления на АРМ оператора технологического процесса. Это возможно при условии корректной работы контроллера СПАЗ, а также оптических модулей связи – модуля 5, функционирующего в основном режиме, и модуля 19, задействованного в резервном режиме. Дополнительно обеспечивается взаимодействие через сетевые коммутаторы 25 и 26. Дискретные пары дуг, заканчивающиеся стрелками, иллюстрируют реализованные в каналах связи функциональные возможности для основного и резервного режимов работы системы, что гарантирует надежность передачи данных и устойчивость работы в случае переключения между режимами.

Функция $F-2$, предназначенная для передачи управляющих сигналов на электроприводы клапанов, регулирующих подачу пара для технологических нужд

установок 63, выполняется при соблюдении определенных условий. В частности, ее реализация возможна при работе хотя бы одного из двух центральных процессоров, входящих в состав контроллеров СПАЗ, а также при задействовании как минимум одного из модулей дискретного выхода — либо модуля 3, либо модуля 8.

Гарантированное электропитание в подсистеме контроля и управления давлением пара на линии ПЗТП ТУ ГДТ осуществляется за счет применения как группового, так и поэлементного резервирования источников питания, используемых для обеспечения работы элементов структурно-функциональной схемы.

Логическими критериями функционирования подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ являются:

y_{20} – условие реализации функции «F-1» по выдаче информации о давлении в трубопроводе линии ПЗТП на АРМ оператора; (3.9)

y_{24} – условие реализации функции «F-2» по выдаче управляющих сигналов на блок управления регулирующими клапанами подачи пара на технологические нужды установок. (3.10)

3.1.3. Моделирование показателей надежности и безопасности

Исходные данные элементов структуры подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ, представленные в таблице 3.1, вводятся в ПК согласно [52]. Все последующие этапы ПК выполняет автоматически.

Результаты АСМ и расчетов показателей надежности подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ согласно работе [71] составляют:

1) логическая функция работоспособности системы (ФРС) или логико-аналитическая модель по критерию (3.9) включает 192 кратчайших путей успешного функционирования (КПУФ), из которых ниже приведены первые десять наиболее значимых:

$$\begin{aligned}
y_{20} = & x_{11} x_{27} x_{31} x_{35} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{21} x_{32} x_{25} x_{38} \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{36} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \\
& \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{36} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{30} \vee x_{12} x_{27} x_{31} x_{35} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \\
& \vee x_{12} x_{27} x_{31} x_{35} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{30} \vee x_{12} x_{27} x_{31} x_{36} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \quad (3.11) \\
& \vee x_{12} x_{27} x_{31} x_{36} x_{48} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{30} \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{35} x_{47} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \vee \\
& \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{35} x_{47} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{30} \vee x_{11} x_{27} x_{31} x_{36} x_{47} x_{59} x_2 x_5 x_{22} x_{32} x_{25} x_{38} \dots,
\end{aligned}$$

где x_i – представление реализации своей функции i -ым элементом в подсистеме на рисунке 3.1;

$x_i x_j$ – комбинация реализации своей функции i -ым и j -ым элементами в подсистеме на рисунке 3.1 с логической операцией «И»;

\vee – логическая операция «ИЛИ»;

2) многочлен расчетной вероятностной функции (ВФ) безотказности критерию (3.10) состоит из 320 одночленов, из которых ниже приведены первые пять наиболее значимых:

$$\begin{aligned}
P_{F-1}(t) = & p_{11} q_{12} q_{13} q_{14} q_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{27} p_{31} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_2 p_5 q_{21} p_{22} p_{32} q_{25} p_{26} p_{38} q_{30} + \\
& + p_{11} q_{12} q_{13} p_{14} q_{15} q_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} p_{32} q_{25} p_{26} p_{38} q_{30} + \\
& + p_{11} q_{12} q_{13} q_{14} q_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{27} p_{31} p_{35} q_{36} p_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_2 p_5 q_{21} p_{22} q_{25} p_{26} p_{38} q_{30} + \quad (3.12) \\
& + p_{11} q_{12} q_{13} p_{14} q_{15} q_{16} q_{17} p_{18} p_{28} p_{33} p_{35} q_{36} p_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_4 p_{19} q_{21} p_{22} q_{25} p_{26} p_{38} q_{30} + \\
& + p_{12} q_{13} q_{14} q_{15} p_{16} q_{17} p_{18} p_{27} p_{31} p_{35} q_{36} q_{70} q_{47} p_{48} p_{59} p_2 p_5 q_{21} p_{22} p_{32} q_{25} p_{26} p_{38} q_{30} + \dots,
\end{aligned}$$

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

q_i – числовое значение вероятности отказа i -го элемента.

3) «все параметры $p_i = p_i(t)$, подставляемые в многочлен $P_{F-1}(t)$ являются функциями времени. Значение $t = 1$ год = 8760 ч одинаковое для всех параметров и составляет заданное время работы» [52, с. 27] всей системы (наработку).

Результаты расчетов показателей надежности восстанавливаемой подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ, полученные в ПК АРБИТР [82] по критериям (3.9) и (3.10), представлены в таблице 3.2.

Результаты расчета надежности и безопасности создаваемой подсистемы, представленные в таблице 3.2, свидетельствуют о несоответствии показателей рассматриваемых функций уровню полноты безопасности (УПБ) для технологических блоков I категории взрывоопасности согласно [16]. Для данного

типа производства определяется УПБ 3 с требуемой вероятностью отказа $P_{AC}(t)$ в пределах от 10^{-4} до 10^{-3} при режиме низкой интенсивности запросов.

Таблица 3.2 – Результаты расчета надежности и безопасности по критериям (3.9) и (3.10) согласно [71]

Определяемый параметр	По функции $F-1$	По функции $F-2$
ФРС/ВФ	192/320	48/80
$K\Gamma_F$	0,99999	0,99997
T_{OF} , год	56,93	11,4
T_{BF} , ч.	1,99964	1,99997
$P_{BF}(t)$	0,98260	0,41594
$P_{AC}(t)$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$5,84 \cdot 10^{-1}$

Согласно п. 233 [97], системы ПАЗ опасных производственных объектов выполняются по отказоустойчивой структуре с учетом восстановления. Методы создания должны определяться в соответствии с требуемым уровнем полноты безопасности (УПБ) согласно [16].

Проведен анализ отказоустойчивости модели по критерию:

y''_{20} – отказ функции « $F-1$ » по выдаче информации о давлении в трубопроводе линии ПЗТП на АРМ оператора; (3.13)

y''_{24} – отказ функции « $F-2$ » по выдаче управляющих сигналов на электроприводы клапанов регулирования подачи пара на технологические нужды установок. (3.14)

Полученная с помощью ПК АРБИТР [82] и представленная в работе [71] логико-аналитическая модель (ФРС) для критерия (3.13) содержит 57 конъюнкций:

$$\begin{aligned}
 y''_{20} = & \underline{x''_{59}} \vee x''_{27} x''_{28} \vee x''_{27} x''_4 \vee x''_{28} x''_2 \vee x''_{28} x''_5 \vee x''_{27} x''_{19} \vee x''_2 x''_4 \vee x''_2 x''_{19} \vee \\
 & \vee x''_4 x''_5 \vee x''_5 x''_{19} \vee x''_{27} x''_{26} \vee x''_{28} x''_{25} \vee x''_{27} x''_{33} \vee x''_{28} x''_{31} \vee x''_4 x''_{25} \vee \\
 & \vee x''_2 x''_{26} \vee x''_{31} x''_4 \vee x''_{33} x''_2 \vee x''_5 x''_{26} \vee x''_{19} x''_{25} \vee x''_{31} x''_{19} \vee x''_{33} x''_5 \vee \\
 & \vee x''_{16} x''_{27} \vee x''_{15} x''_{27} \vee x''_{13} x''_{27} \vee x''_{14} x''_{27} \vee x''_{25} x''_{26} \vee x''_{16} x''_2 \vee x''_{13} x''_2 \vee \\
 & \vee x''_{15} x''_2 \vee x''_{14} x''_2 \vee x''_{33} x''_{25} \vee x''_{31} x''_{26} \vee x''_{31} x''_{33} \vee x''_{16} x''_5 \vee x''_{14} x''_5 \vee
 \end{aligned}
 \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} & \vee x''_{15} x''_5 \vee x''_{13} x''_5 \vee x''_{14} x''_{25} \vee x''_{13} x''_{25} \vee x''_{16} x''_{25} \vee x''_{15} x''_{25} \vee x''_{15} x''_{31} \vee \\ & \vee x''_{14} x''_{31} \vee x''_{13} x''_{31} \vee x''_{16} x''_{31} \vee x''_{70} x''_{32} \vee x''_{11} x''_{12} \vee x''_{47} x''_{48} \vee x''_{35} x''_{36} \vee \\ & \vee x''_{30} x''_{38} \vee x''_{21} x''_{22} \vee x''_{17} x''_{18} x''_{27} \vee x''_{17} x''_{18} x''_2 \vee x''_{17} x''_{18} x''_5 \vee \\ & \vee x''_{17} x''_{18} x''_{25} \vee x''_{17} x''_{18} x''_{31}. \end{aligned}$$

В соответствии с данными ФРС (3.15), определено 57 минимальных сечений отказов (МСО) элементов, каждое из которых надежно приводит к указанной аварийной ситуации. Результаты преобразования ФРС (3.15), выполненного в программном комплексе АРБИТР [82], показывают, что результирующая выраженная функция включает в себя 3264 одночлена. Верхнее значение вероятности неготовности системы, рассчитанное с учетом восстановления элементов по функции (3.13), составило:

$$KG_{AC} = 4 \cdot 10^{-6}. \quad (3.16)$$

Полученная с помощью ПК АРБИТР [82] и представленная в работе [71] логико-аналитическая модель (ФРС) для критерия (3.14) содержит 19 конъюнкций:

$$\begin{aligned} y''_{24} = & \underline{x''_{63}} \vee x''_{27} x''_{28} \vee x''_{28} x''_{31} \vee x''_{27} x''_{33} \vee x''_{14} x''_{27} \vee x''_{13} x''_{27} \vee x''_{16} x''_{27} \vee \\ & \vee x''_{15} x''_{27} \vee x''_{31} x''_{33} \vee x''_{13} x''_{31} \vee x''_{14} x''_{31} \vee x''_{15} x''_{31} \vee x''_{16} x''_{31} \vee x''_3 x''_8 \vee \quad (3.17) \\ & \vee x''_{11} x''_{12} \vee x''_{57} x''_{58} \vee x''_{35} x''_{36} \vee x''_{17} x''_{18} x''_{27} \vee x''_{17} x''_{18} x''_{31}. \end{aligned}$$

Согласно представленной ФРС (3.17), выявлено 19 МСО элементов, каждое из которых надежно ведет к возникновению описанной аварийной ситуации. В результате преобразования ФРС (3.17) в ПК АРБИТР [82] была получена выраженная функция, содержащая 240 одночленов. Расчет верхнего значения вероятности неготовности системы, выполненный с учетом восстановления элементов и на основании функции (3.14), показал следующее значение:

$$KG_{AC} = 2 \cdot 10^{-4}. \quad (3.18)$$

Сравнительный анализ конъюнкций (3.15) и (3.17) показывает, что для отказа функции $F-1$ требуется 57 минимальных комбинаций отказов элементов, тогда как для функции $F-2$ достаточно 19 таких комбинаций. При этом наиболее критичным элементом для функции $F-1$ является датчик давления пара на линии завесы (элемент 59), в то время как для функции $F-2$ наибольшую угрозу представляет блок управления клапаном (элемент 63). Отказ или повреждение любого из этих

элементов приводит к полной утрате работоспособности подсистемы контроля и управления давлением пара в системе ПЗТП ТУ ГДТ по соответствующим функциям.

Анализ данных, полученных в ходе АСМ и выполненных расчетов (см. табл. 3.2, формулы (3.15) и (3.17)), позволяет сделать вывод, что наибольший эффект в повышении надежности и уровня безопасности подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ достигается за счет резервирования ключевых компонентов структуры. К таким компонентам относятся датчик давления пара, установленный на линии завесы, и блок управления клапанами. Внедрение резервирования данных элементов значительно увеличивает устойчивость системы к отказам и способствует ее стабильной работе в условиях эксплуатационных нагрузок. На рисунке 3.2 представлена резервированная структура подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ.

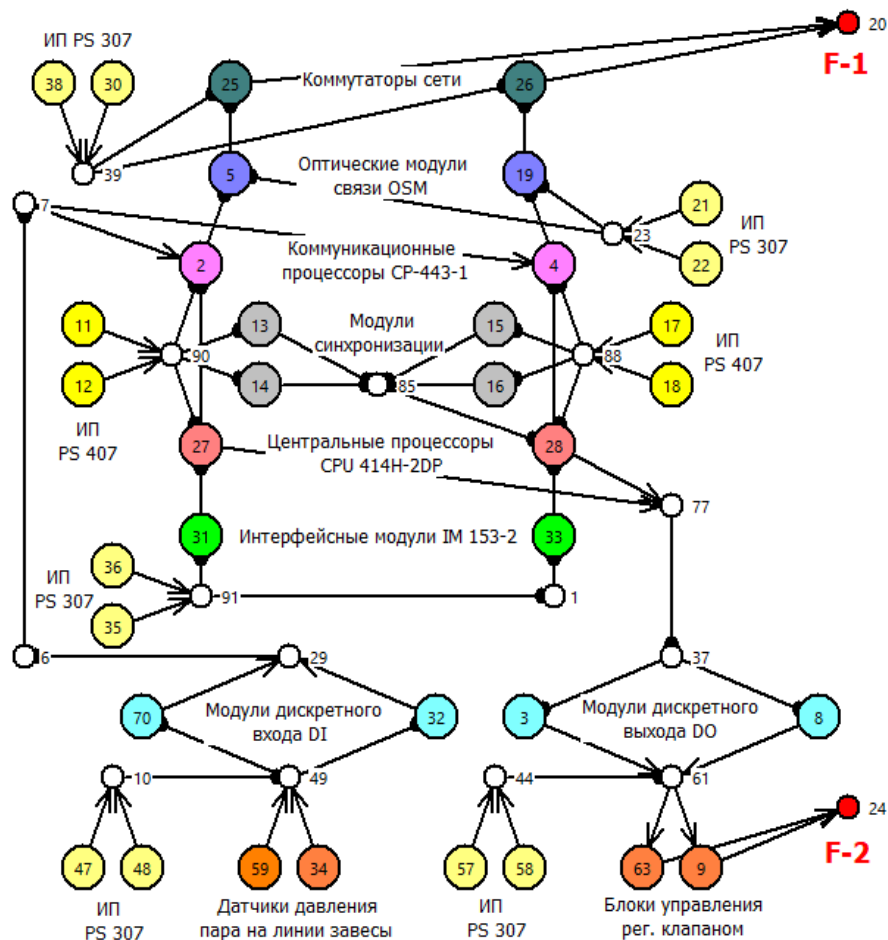


Рисунок 3.2 – Схема функциональной целостности модели подсистемы с дополнительными элементами резервирования. Привод по: [71]

Представленная на рисунке 3.2 схема функциональной целостности (СФЦ) структуры подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП включает резервный датчик давления пара, установленный на линии завесы под номером 34, и резервный блок управления клапанами под номером 9. Такая архитектура обеспечивает не только повышение надежности системы, но и ее способность сохранять работоспособность в случае отказа одного из основных компонентов.

По результатам проведения АСМ получены логико-аналитические и логико-вероятностные модели для расчета вероятностей отказа ($P_{AC}(t)$) и безотказной работы ($P_{BF}(t)$) контуров контроля и управления создаваемой резервированной подсистемы. Полученные логико-вероятностные модели позволяют обеспечить расчет вероятностей безотказной работы ($P_{BF}(t)$) при подборе или замене составляющих элементов подсистемы.

Результаты АСМ и расчетов показателей надежности и безопасности подсистемы контроля и управления давлением пара в ПЗТП ТУ ГДТ с резервным датчиком давления пара на линии завесы 34 и блоком управления клапанами 9 приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета надежности и безопасности подсистемы с резервным датчиком давления пара на линии завесы 34 и блоком управления клапанами 9 по критериям (3.9), (3.10) согласно [71]

Определяемый параметр	По функции $F-1$	По функции $F-2$
ФРС/ВФ	384/640	96/160
$K\Gamma_F$	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
$P_{AC}(t)$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$

Сравнительные результаты расчетов, представленные в таблицах 3.2 и 3.3, показали положительный результат при обеспечении резервирования датчика

давления и блока управления регулирующими клапанами. Это привело к увеличению вероятности безотказной работы ($P_{BF}(t)$) создаваемой подсистемы по функции $F-1$ в среднем на 2 % и по функции $F-2$ в 2,4 раза. В результате снижена вероятность отказа ($P_{AC}(t)$) по функциям $F-1$ и $F-2$, а также получены значения, соответствующие требованиям к функциональной безопасности.

3.2. Оценка эффективности применения паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара

3.2.1. Выбор метода оценки эффективности

Целью работы является повышение надежности функционирования ПЗТП ТУ ГДТ на основе формализации контроля и управления давлением пара. В этой связи необходимо выполнить количественную оценку относительной эффективности применения паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара.

В работе Ф.В. Демехина говорится о следующем – «там, где нет возможности разрабатывать аналитические модели и получать репрезентативные статистические данные, приходится использовать методы экспертных оценок» [19, с. 293]. В связи с отсутствием аналитических моделей оценки эффективности предлагаемых решений, согласно исследования [19], одним из наиболее приемлемых методов решения этих задач является метод анализа иерархий.

В работе [19] отмечается, что анализ относительной эффективности технической системы имеет ключевое значение при определении важности различных параметров. Такой подход помогает установить, в какой мере эти параметры воздействуют на показатели, относящиеся к более высоким уровням иерархической структуры системы. Это способствует более глубокому пониманию взаимосвязей между элементами системы и их влияния на общую эффективность. Кроме того, такой анализ предоставляет возможность провести количественную оценку значений каждого из показателей. Таким образом, относительная

эффективность системы не только помогает определить приоритетность характеристик, но и способствует более детальному пониманию их вклада в общий результат работы системы.

Для оценки эффективности использована методика, предложенная в исследовании [19], основанная на теоретическом обосновании метода Гретенера и метода анализа иерархий (Т. Л. Саати), применяемая для определения уровня пожароопасности объектов защиты различного назначения с использованием автоматизированных систем противопожарной защиты с технологией видеомониторинга. Данная методика была использована в работах для оценки эффективности АСУ ПЗ с технологией видеомониторинга на ННП путем внедрения дополнительного параметра в показатель, представляющий наличие специальных мер и технических средств по обнаружению, оповещению и тушению пожара на ННП.

Дальнейшее развитие методики и определение относительной эффективности предлагаемых технических решений необходимо решить путем внедрения дополнительного параметра наличия паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара в показатель, представляющий наличие мер и технических средств по обнаружению, оповещению и тушению пожара на объекте.

В методе Гретенера, согласно методики [19], «основным показателем пожароопасности объекта является уровень пожароопасности $У$. Уровень пожароопасности рассчитывается по формуле:

$$У = \frac{П}{П_d}, \quad (3.19)$$

где $П$ – показатель пожароопасности объекта;

$П_d$ – допустимое значение пожароопасности» [19, с. 320].

Количественной мерой противопожарной защиты объекта является численное значение уровня пожароопасности. Как отмечает в своей работе Ф. В. Демехин, в случае когда расчетное значение « $У < 1$, объект является

защищенным от пожара, в случае, когда $U > 1$, объект имеет повышенную пожароопасность» [19, с. 320].

Согласно методики [19] «пожароопасность P определяется по формуле:

$$P = \frac{M \cdot A}{Z}, \quad (3.20)$$

где M – потенциальная опасность, учитывающая влияние всех основных факторов, способствующих возникновению и развитию пожара;

A – параметр активации, отражающий вероятность возникновения пожара, связанную с видом использования объекта;

Z – параметр противопожарной защиты, учитывающий влияние имеющихся на объекте средств и систем противопожарной защиты, степень выполнения противопожарных мероприятий» [19, с. 321].

Далее определяемая по методике «потенциальная опасность M рассчитывается по следующей формуле:

$$M = q \cdot c \cdot r \cdot k \cdot i \cdot e \cdot g, \quad (3.21)$$

где q – параметр подвижной пожарной нагрузки;

c – параметр горючести;

r – параметр дымообразования;

k – параметр токсичности;

i – параметр неподвижной пожарной нагрузки;

e – параметр этажности или высоты здания;

g – параметр размеров и формы площади объекта» [19, с. 321].

Параметр противопожарной защиты Z , рассчитывается по следующей формуле:

$$Z = N \cdot F \cdot S, \quad (3.22)$$

где N – показатель, определяющий выполнение нормативных требований по обеспечению противопожарной защиты объекта;

F – показатель, отражающий влияние огнестойкости строительных конструкций объекта;

S – показатель, представляющий наличие специальных мероприятий и технических средств по обнаружению, оповещению и тушению пожара на объекте.

Параметр, отражающий наличие паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара на ННП, целесообразно включить в соответствующий показатель S . Также необходимо преобразовать данный показатель таким образом, чтобы он не только учитывал наличие паровых завес, но и представлял весь комплекс специальных мер и технических средств, направленных на предотвращение, обнаружение, оповещение и тушение пожара на объекте. Это позволит более точно оценивать уровень пожарной безопасности на предприятии. В этой связи показатель можно записать в следующем «виде:

$$S = f(s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8), \quad (3.23)$$

где s_1 – показатель наличия и качества системы пожарной сигнализации;

s_2 – показатель наличия и качества средств передачи сигнала пожарной тревоги на пост пожарной службы;

s_3 – показатель боевой готовности и уровня подготовленности пожарноспасательных подразделений, обслуживающих объект;

s_4 – показатель наличия и типа установок автоматического пожаротушения;

s_5 – показатель наличия и качества системы эвакуации людей;

s_6 – показатель наличия и качества системы водяного орошения при пожаре;

s_7 – показатель наличия и качества системы цифрового телевидения, интегрированного в автоматизированную систему противопожарной защиты» [19, с. 322];

s_8 – показатель наличия паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара.

На рисунке 3.3 в виде дерева представлена вышеописанная иерархия показателей эффективности и их параметров согласно методики [110] с указанием дополнительного показателя s_8 .

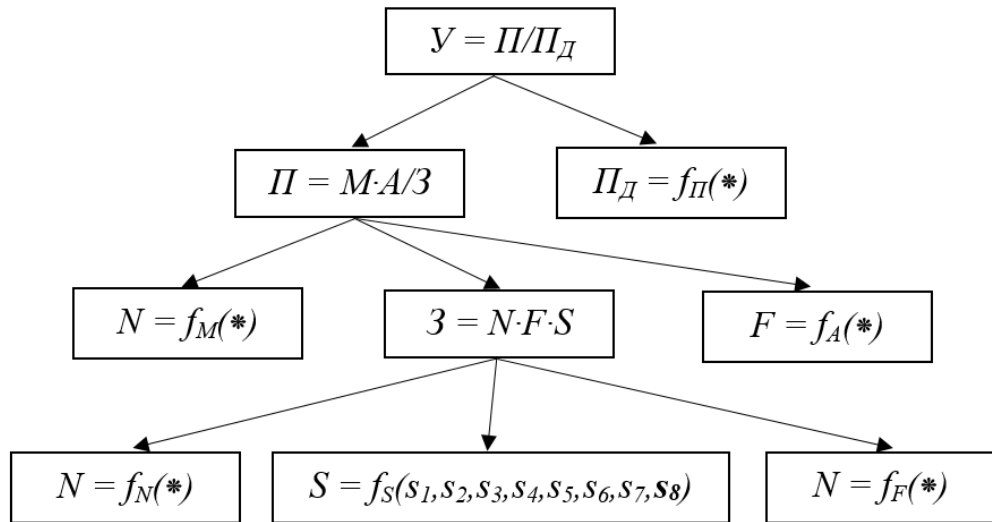


Рисунок 3.3 – Иерархия показателей эффективности методики определения уровня пожароопасности ННП [Привод. по: 65, с. 67]

На рисунке 3.3 представлена запись вида $\Pi_D = f_{\Pi}(*),$ которая указывает, что дополнительное уточнение данной формулы не является значимым для проведения оценки относительной эффективности. В то же время запись вида $S = f(s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8)$ демонстрирует отсутствие на текущем этапе аналитических зависимостей между основным показателем S и его частными показателями $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8$ в рамках ННП, как отмечается в источнике [110]. Такой подход позволяет оптимизировать процесс анализа, исключая необходимость детализации в тех случаях, когда это не оказывает существенного влияния на общую оценку эффективности системы.

Для анализа влияния паровых завес трубчатых печей, выполняющих функции контроля и управления давлением пара, на рассматриваемый показатель S , необходимо произвести расчет его величины в двух вариантах: с применением предлагаемых технических решений и без их использования. Полученная разница между этими значениями ΔS позволяет оценить техническую эффективность системы. Более того, такой подход дает возможность количественно определить вклад внедряемых технических средств в итоговое значение показателя. Как указывается в исследовании [19], данный подход играет ключевую роль в обеспечении точного понимания вклада предлагаемых решений в улучшение

параметров функционирования системы. Он позволяет детально оценить их влияние на эффективность работы системы и определить перспективные направления для дальнейшего развития и оптимизации.

Для выполнения расчета показателя ΔS требуется наличие соответствующих аналитических зависимостей, как это видно на рисунке 3.3. Однако таких зависимостей на данный момент не существует. В случае невозможности теоретического определения зависимости показателя S от частных показателей s_i , авторы исследования [91] рекомендуют применять экспертные методы для оценки влияния частных показателей s_i на общий показатель S . Именно этот подход был реализован в работе [19], что позволило выполнить необходимые расчеты и получить достоверные результаты.

Этапы оценки эффективности включают следующие этапы:

1) структурно-логический анализ взаимовлияния показателей через вероятностно-временные параметры системы противопожарной защиты. Результатом данного этапа являются матрицы парных сравнений предыдущих оценок важности параметров эффективности, которые являются исходными данными для последующего этапа;

2) формализация экспертных оценок по индивидуальному и групповому принципам. Индивидуальный принцип включает формализацию мнения одного эксперта, где исходными данными будут матрицы парных сравнений, полученные на первом этапе. Групповой принцип включает обобщение мнений группы экспертов, включая проверку согласованности на основе критерия Стюдента и расчет средних значений важности параметров эффективности, которые используются в качестве исходных данных для следующего этапа метода;

3) оценка эффективности на основе обобщения вероятностно-временных характеристик системы и средних значений показателей важности, полученных на предыдущем этапе. В результате на данном этапе будет получена оценка эффективности в процентном отношении.

3.2.2. Оценка влияния частных параметров на вероятностно-временные показатели системы

В работе [19] автор подробно рассматривает вопрос определения ключевых параметров, оказывающих влияние на эффективность функционирования системы противопожарной защиты на опасных производственных объектах. Особое внимание уделяется анализу факторов, определяющих уровень надежности и оперативности данной системы. Среди наиболее значимых показателей выделяются вероятностно-временные характеристики, которые играют важную роль в оценке быстродействия и эффективности системы при возникновении чрезвычайных ситуаций. Эти параметры рассматриваются как критически важные при анализе способности системы своевременно реагировать на аварийные происшествия, минимизировать их последствия и предотвращать развитие масштабных чрезвычайных событий. Среди них выделяются: «время обнаружения пожара $t_{оп}$; отношение времени эвакуации к времени наступления опасных факторов пожара на путях эвакуации $t_{эв}$; время задействования систем автоматического пожаротушения $t_{АП}$; время прибытия и тушения пожарными подразделениями $t_{ПП}$; вероятность ложного срабатывания системы пожарной сигнализации $P_{ЛТ}$ » [19, с. 324].

В работе [19] автором приводятся как «наиболее важными показателями эффективности системы противопожарной защиты предприятий нефтеперерабатывающего комплекса, являются вероятностно-временные показатели: время обнаружения пожара $t_{оп}$; отношение времени эвакуации к времени наступления опасных факторов пожара на путях эвакуации $t_{эв}$; время задействования систем автоматического пожаротушения $t_{АП}$; время прибытия и тушения пожарными подразделениями $t_{ПП}$; вероятность ложной тревоги (ложного срабатывания системы пожарной сигнализации) $P_{ЛТ}$ » [19, с. 323]. На рисунке 3.4 представлено отношение частных параметров на вероятностно-временные показатели эффективности противопожарных мероприятий на НПП.

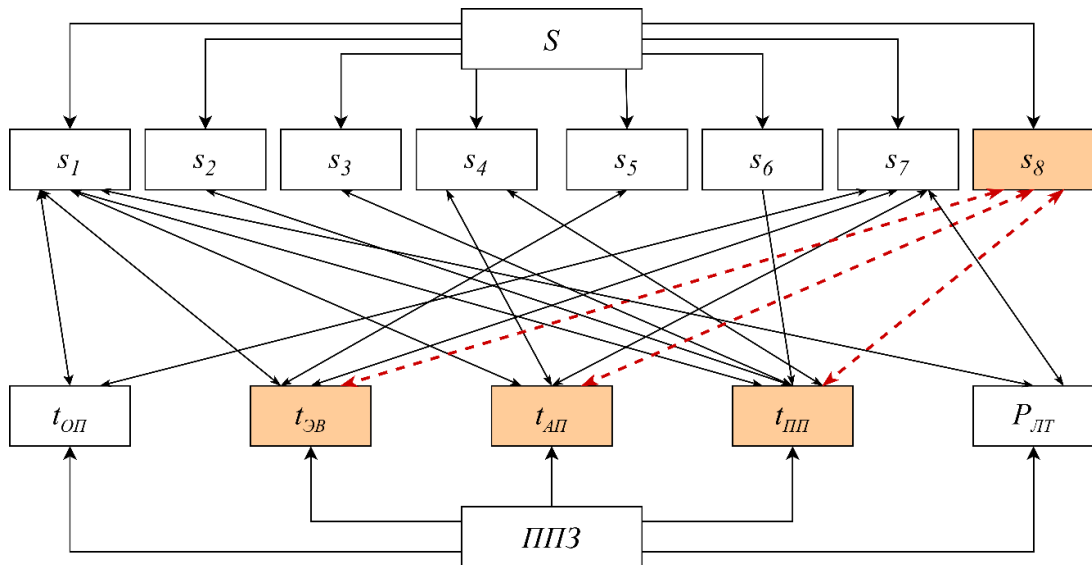


Рисунок 3.4 – Отношение частных параметров на вероятностно-временные показатели

Как показано на рисунке 3.4, параметр s_8 оказывает влияние на такие временные характеристики, как – $t_{ЭВ}$, $t_{АП}$, $t_{ПП}$.

Для определения значимости параметров s_i в контексте их воздействия на пространственно-временные показатели, был применен метод анализа иерархий, как это рекомендовано в исследованиях [24, 19]. В дальнейшем представлены теоретические основы метода анализа иерархий, адаптированные для решения задачи оценки эффективности применения паровых завес в трубчатых печах, оснащенных функциями контроля и управления давлением пара.

Исходя из иерархии показателей эффективности, представленной на рисунке 3.3 следует, что для определения относительной эффективности по показателю s_i согласно [65] необходимо транспонировать формулы следующим образом:

$$\Delta Z = N \cdot F \cdot S, \quad (3.24)$$

$$\Delta \Pi = \frac{M \cdot A}{3} = \frac{M \cdot A}{3 \cdot (1 - \Delta S)} = \frac{M \cdot A}{3} \cdot \frac{1}{(1 - \Delta S)}, \quad (3.25)$$

$$\Delta Y = -\left(1 - \frac{1}{(1 - \Delta S)}\right) \cdot \frac{\Delta \Pi}{\Pi_d}, \quad (3.26)$$

$$\Theta = \frac{1}{(1 - \Delta S)} - 1 = \frac{\Delta S}{1 - \Delta S}. \quad (3.27)$$

Исходными данными для расчета являются данные таблицы 3.4.

Таблица 3.4 – Данные опроса эксперта о значимости параметров S_i для эффективного функционирования системы

Частные показатели	S_i	...	S_n
S_1	1	...	A_n

Отличительной особенностью предлагаемого способа формализации мнения эксперта является наличие оценок важности суждений, представленных в таблице. Эксперту требуется ответить на вопрос: «к какому из уже существующих показателей по степени важности близок предлагаемый новый показатель s_8 ?».

Тогда следующим этапом выполняется опрос эксперта о том к какой оценке A_i для S_i ближе оценка A^* для S^* .

После составляется матрица парных сравнений по S_1 . Матрица представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Матрица сравнения оценки эксперта по одному показателю

Наименование показателя	S_1	$S_{...}$...	S_n	S^*
S_1	1	$A_{...}$...	A_n	A^*
$S_{...}$	$1/A_{...}$	1			
...	...		1		
S_n	$1/A_n$			1	
S^*	$1/A^*$				1

Решение матрицы относительно коэффициентов важности предлагается по первой строке в соответствии с упрощенной процедурой анализа иерархий согласно методики [19]:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{A_i}, \quad (3.28)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n, n+1$.

$$\omega_i = \frac{1}{A_i} \cdot \frac{1}{\Delta}, \quad (3.29)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n, n+1$.

Выполняем проверку:

$$\sum_{i=1}^{n+1} \omega_i = 1, \quad (3.30)$$

Здесь акцентируем внимание на то, что совокупность ω_i является формализацией мнения соответствующего эксперта. Данные по всем m экспертам сводим в обобщенную таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Расчетные значения весовых параметров по m количеству экспертам

	S_1	S_{\dots}	S_n	S^*
\mathcal{E}_1	$\omega_{i,1}$	$\omega_{\dots,1}$	$\omega_{n,1}$	$\omega_{n+1,1}$
\mathcal{E}_{\dots}	$\omega_{i,\dots}$	$\omega_{\dots,\dots}$	$\omega_{n,\dots}$	$\omega_{n+1,\dots}$
\mathcal{E}_m	$\omega_{1,m}$	$\omega_{\dots,m}$	$\omega_{n,m}$	$\omega_{n+1,m}$
S_{cp}	W_1	W_{\dots}	W_n	W^*
t_{np}	t_{np1}	$t_{np\dots}$	$t_{np,n}$	t_{np}^*
α	α_1	α_{\dots}	α_n	α^*

Вычисление коэффициента Стьюдента выполняет роль проверки степени согласованности экспертов взамен классического критерия Конкордации, что обусловлено авторским методом [19] во избежание противоречий с уже полученными значениями при оценке эффективности по показателю s_8 .

$$S_{cpi} = \sum_{j=1}^m \omega_{i,j}, \quad (3.31)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\omega_{i,j} - S_{cpi})^2}{m-1}}, \quad (3.32)$$

$$t_{CTi} = \frac{S_{cpi}}{\alpha_i}, \quad (3.33)$$

где α – уровень значимости для t_{CTi} , $\gamma = m-1$.

Таким образом, искомые оценки – $\langle \omega_1, \dots, \omega_n, \omega^* \rangle$, представляют собой формализацию мнения группы экспертов.

В свою очередь, при переходе в оценке эффективности с уровня s на S важность вероятностно-временных параметров будет принята изначально по данным, представленным в исследовании [19].

3.2.3. Определение значимости показателей эффективности

Известный специалист в области управления экономикой, профессор В. Н. Эйтингон в своей работе «Методы организации экспертизы и обработки экспертных оценок в менеджменте» отмечает следующее: «необходимое и достаточное число экспертов для проведения качественной экспертизы, согласно статистическому подходу, определяется по формуле:

$$N = \frac{t_{\alpha}^2}{\varepsilon_1}, \quad (3.34)$$

где t_{α}^2 – показатель достоверности для заданной доверительной вероятности полученного результата;

ε_1 – заданная до начала опроса предельно допустимая ошибка, выраженная в долях среднеквадратического отклонения (δ):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\sigma}, \quad (3.35)$$

где ε – абсолютная погрешность.

Приняв $\varepsilon_1 = 0,5$ при доверительной вероятности $\alpha = 0,85$, получаем необходимое число экспертов, равное 7, которое является наиболее распространенным случаем» [111].

Основным критерием при выборе экспертов являлся их профессиональный опыт в области обеспечения пожарной и промышленной безопасности на предприятиях нефтеперерабатывающей отрасли. Для участия в экспертной оценке рассматривались только специалисты, имеющие стаж работы в данной сфере не

менее 10 лет. Ниже представлена оценка к какому из уже существующих показателей по степени важности близок предлагаемый новый показатель s_8 и его влияние на $t_{ЭВ}$, $t_{АП}$, $t_{ПП}$, а также проведена оценка эффективности паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара на уровень пожароопасности объекта.

По результатам оценки первого эксперта проведена оценка влияния показателей s_1, s_5, s_7, s_8 , на время эвакуации. Таблица 3.7 содержит матрицу парных сравнений, сформированную на основе оценок, предоставленных первым экспертом.

Таблица 3.7 – Матрица парных сравнений на основе оценки эксперта 1

$t_{ЭВ}$	s_1	s_5	s_7	s_8	Δ
s_1	1	4	1,5	1	2,916667
s_5	0,25	1			
s_7	0,666667		1		
s_8	1			1	

Таблица 3.8 – Веса элементов системы

W	w_1	w_5	w_7	w_8
$t_{ЭВ}$	0,343	0,086	0,229	0,343

Согласно результатам расчета относительный вес влияния на эффективность эвакуации частных параметров следующие: $s_1 = 0,343$; $s_5 = 0,086$; $s_7 = 0,229$; $s_8 = 0,343$. Аналогичным образом обобщены и проанализированы высказывания других шести экспертов и представлены в таблицах Б.1–Б.6 приложения Б. Данные оценки сведены в таблицу 3.9.

Таблица 3.9 – Обобщение результатов оценок экспертного опроса

$t_{ЭВ}$	s_1	s_5	s_7	s_8
\mathcal{E}_1	0,34	0,09	0,23	0,34

Продолжение таблицы 3.9

\mathcal{E}_2	0,46	0,12	0,31	0,12
\mathcal{E}_3	0,34	0,09	0,23	0,34
\mathcal{E}_4	0,46	0,12	0,31	0,12
\mathcal{E}_5	0,34	0,09	0,23	0,34
\mathcal{E}_6	0,34	0,09	0,23	0,34
\mathcal{E}_7	0,39	0,10	0,26	0,26
Z	0,38	0,10	0,26	0,27
S_{cp}	0,06	0,01	0,04	0,11
t_{np}	6,83	7,01	6,86	2,47
α	0,000	0,000	0,000	0,048

Рассмотрим влияние показателей s_1, s_4, s_7, s_8 , на время заедьствования систем автоматического пожаротушения $t_{АП}$. Данные влияния параметра s_8 на основе оценок экспертов представлены в таблицах Б.7–Б.13 приложения Б. Данные оценок сведены в таблицу 3.10.

Таблица 3.10 – Матрица парных сравнений

$t_{АП}$	s_1	s_4	s_7	s_8
\mathcal{E}_1	0,33	0,11	0,22	0,33
\mathcal{E}_2	0,43	0,14	0,29	0,14
\mathcal{E}_3	0,38	0,12	0,25	0,25
\mathcal{E}_4	0,43	0,14	0,29	0,14
\mathcal{E}_5	0,38	0,12	0,25	0,25
\mathcal{E}_6	0,33	0,11	0,22	0,33
\mathcal{E}_7	0,33	0,11	0,22	0,33
Z	0,37	0,12	0,25	0,26
S_{cp}	0,04	0,01	0,03	0,09

Продолжение таблицы 3.10

t_{np}	8,77	8,60	8,67	2,99
α	0,000	0,000	0,000	0,024

Согласно результатам расчета относительный вес влияния на эффективность автоматического пожаротушения частных параметров следующие: $s_1 = 0,37$; $s_4 = 0,12$; $s_7 = 0,25$; $s_8 = 0,26$.

Рассмотрим влияние частных показателей s_1, s_2, s_3, s_7, s_8 , на время прибытия и тушения пожарными подразделениями $t_{шт}$. Данные влияния параметра s_8 на основе оценок экспертов представлены в таблицах Б.14–Б.20 приложения Б. Данные оценки сведены в таблицу 3.11.

Таблица 3.11 – Матрица парных сравнений

$t_{шт}$	s_1	s_2	s_3	s_7	s_8
\mathcal{E}_1	0,32	0,16	0,11	0,21	0,21
\mathcal{E}_2	0,29	0,14	0,10	0,19	0,29
\mathcal{E}_3	0,32	0,16	0,11	0,21	0,21
\mathcal{E}_4	0,32	0,16	0,11	0,21	0,21
\mathcal{E}_5	0,33	0,17	0,11	0,22	0,17
\mathcal{E}_6	0,29	0,14	0,10	0,19	0,29
\mathcal{E}_7	0,29	0,14	0,10	0,19	0,29
Z	0,31	0,15	0,10	0,20	0,24
S_{cp}	0,02	0,01	0,01	0,01	0,05
t_{np}	15,71	15,71	15,71	15,71	4,87
α	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003

В результате выполнения трех ранее описанных этапов были получены пять векторов. Каждый из этих векторов характеризует уровень влияния отдельных частных показателей на временные параметры системы, обозначенные как $t_{эв}$, $t_{шт}$, $t_{шт}$ и $P_{шт}$. Данные векторы позволяют детально проанализировать вклад отдельных показателей в формирование указанных временных параметров. Для удобства

представления результатов и их последующего анализа все вычисленные векторы сведены в обобщенную таблицу 3.12, где наглядно отображены их значения и распределение влияния.

Таблица 3.12 – Влияние частных параметров на показатели эффективности

Частные показатели	Показатели эффективности, влияющие на S				
	$t_{оп}$	$t_{эв}$	$t_{ап}$	$t_{пп}$	$P_{лт}$
s_1	0,6	0,38	0,37	0,34	0,25
s_2	0	0	0	0,17	0
s_3	0	0	0	0,11	0
s_4	0	0	0,12	0	0
s_5	0	0,13	0	0	0
s_6	0	0	0	0	0
s_7	0,4	0,25	0,25	0,22	0,75
s_8	0	0,24	0,26	0,27	0

Согласно результатам расчета, относительный вес влияния на на эффективность эвакуации составляет: $s_1 = 0,38$; $s_5 = 0,13$; $s_7 = 0,25$; $s_8 = 0,24$.

Согласно данным, представленным в исследовании [19], показатели следующего уровня обладают определенной степенью значимости, величины которой представлены в таблице 3.13. Эти значения играют ключевую роль в дальнейшем анализе и позволяют оценить влияние каждого показателя на общий результат. Для более наглядного представления информация об их важности была структурирована в таблице, что облегчает понимание и сравнительный анализ. Таблица 3.13 служит основным инструментом для визуализации полученных результатов и их использования в последующих расчетах.

Таблица 3.13 – «Относительные веса расчетных параметров системы

Относительные веса	$t_{оп}$	$t_{эв}$	$t_{ап}$	$t_{пп}$	$P_{лт}$
D^1	0,439	0,212	0,147	0,118	0,083

Таким образом, относительный вес времени обнаружения пожара $t_{оп}$ в смысле влияния на показатель S составляет $t_{оп} = 0,439$, времени $t_{эв} = 0,212$, $t_{ап} = 0,147$, $t_{ип} = 0,118$ и вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 0,083$ » [19, с. 332].

Представим вышеуказанные показатели в виде строк матрицы D :

$$D = (0,439 \quad 0,212 \quad 0,147 \quad 0,118 \quad 0,083). \quad (3.36)$$

Данные, приведенные в таблице 3.13, будут преобразованы в матрицу V посредством транспонирования

$$V = \begin{pmatrix} 0,6 & 0,38 & 0,37 & 0,34 & 0,25 \\ 0 & 0 & 0 & 0,17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,11 & 0 \\ 0 & 0 & 0,12 & 0 & 0 \\ 0 & 0,13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,4 & 0,25 & 0,25 & 0,22 & 0,75 \\ 0 & 0,24 & 0,26 & 0,27 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.37)$$

В результате умножения вектора D (3.36) на матрицу V (3.37) получается вектор, содержащий веса, отражающие степень влияния параметров $s_1 - s_8$ на показатель S . Итоговые данные расчетов представлены в таблице 3.14, что позволяет наглядно оценить значимость каждого параметра в формировании общего показателя.

$$Z = D \cdot V. \quad (3.38)$$

Таблица 3.14 – Вес элемента системы

S	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8
Z	0,459	0,02	0,013	0,018	0,027	0	0,354	0,12

Результаты, представленные в таблице 3.14, показывают, что вес паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара составил 0,12.

Теперь, зная, что среднее приращение параметра S по мнению всех экспертов достигается за счет паровых завес трубчатых печей с функциями

контроля и управления давлением пара $\Delta S = 0,12$, мы можем вычислить приращение эффективности:

$$\Xi = \frac{0,12}{1-0,12} = 0,136 \approx 13,6\% . \quad (3.39)$$

Согласно полученным результатам, применение паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара оказывает значительный эффект на повышение уровня пожарной безопасности объектов ННП, увеличивая его более чем на 13,6 %.

Полученные в работе результаты использованы: для обеспечения техническими средствами дистанционного контроля давления пара в коллекторе паровых завес трубчатых печей ТОО «Kyzylorda Refinery»; в разработке внутриорганизационной методики и технологии определения величин страховых взносов производственных предприятий АО «Страховая компания «Freedom Finance Insurance»; в научной деятельности и учебном процессе Академии гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан по направлению 6В12302 «Пожарная безопасность». Соответствующие акты представлены в приложении В.

Выводы по главе 3

1. На основе технологии автоматизированного структурно-логического моделирования получены логико-аналитические и логико-вероятностные модели контуров контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива. Проведен анализ наиболее уязвимых элементов подсистемы, расчет вероятностей безотказной работы и отказа подсистемы по рассматриваемым функциям.

По результатам анализа выполнено резервирование датчика давления пара на линии паровой завесы и блока управления регулирующим клапаном подачи пара на технологические нужды установки. Это привело к увеличению вероятности безотказной работы создаваемой подсистемы: по функции $F-1$ в среднем на 2 %, а по функции $F-2$ в 2,4 раза. Также значительно снижена вероятность отказа по функциям $F-1$ и $F-2$, а полученные значения соответствуют требованиям к функциональной безопасности.

2. На основе методики определения уровня пожароопасности объектов нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, основанной на обобщении метода Гретенера и анализа иерархий, получен параметр наличия паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара. С использованием данного параметра увеличен показатель наличия специальных мероприятий и технических средств по предотвращению, обнаружению, оповещению и тушению пожара, что позволило снизить уровень пожароопасности объекта на 13,6 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований получены следующие научные и практические 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 этих 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 %.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АББ – анализ барьеров безопасности;
- АРМ – автоматизированное рабочее место;
- АСМ – автоматизированное структурно-логическое моделирование;
- АСУ – автоматизированная система управления;
- АСУ ПЗ – автоматизированная система управления противопожарной защитой;
- АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;
- ВС – трубчатая печь с вертикальным расположением труб змеевика;
- ВСГ – водородсодержащий газ;
- ВФ – вероятностная функция;
- ГГМ – горелка газомазутная;
- ГП – горелка парового распыливания;
- ГС – трубчатая печь с горизонтальным расположением труб змеевика;
- КППН – комплекс первичной переработки нефти;
- КПУФ – кратчайшие пути успешного функционирования;
- ЛКФ – логический критерий функционирования;
- МСО – минимальные сечения отказов;
- МЭА – моноэтаноламин;
- НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени;
- ННП – нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность;
- НПЗ – нефтеперерабатывающий завод;
- ОЛВМ – общий логико-вероятностный метод;
- ОПО – опасный производственный объект;
- ПАЗ – противоаварийная автоматическая защита;
- ПДК – предельно-допустимая концентрация;
- ПК – программный комплекс;
- ПЛК – программируемый логический контроллер;
- ПНХЗ – Павлодарский нефтехимический завод;
- ПО – программное обеспечение;

PCY – распределительная система управления;

СГК – система газового контроля;

СПАЗ – система противоаварийной автоматической защиты;

СФЦ – схема функциональной целостности;

ТОО – товарищество с ограниченной ответственностью;

ФРС – функция работоспособности системы;

ЭЛОУ-АТ – электрообессоливающая установка – атмосферная трубчатка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахимов, Ю. Р. Получение зимних дизельных топлив с улучшенными свойствами внедрением процесса гидродепарафинизации [Текст] / Ю. Р. Абдрахимов, В. М. Апликаева // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14, № 1. – С. 139–144.
2. Аскарлов, И. В. Моделирование паровой завесы трубчатых печей / И. В. Аскарлов, С. И. Поникаров, А. Д. Галеев // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы V Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Казань, 23–25 мая 2018 года. – Казань : ООО «Инновационно-издательский дом «Бутлеровское наследие», 2018. – С. 398–401.
3. Бизюкова, Е. Е. Разработка системы противоаварийной автоматической защиты для блока подогрева товарной нефти / Е. Е. Бизюкова, Н. А. Сизова, А. А. Ивлев // Экономика и управление: современные тенденции : сборник статей, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова». – Чебоксары : Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2018. – С. 41–45.
4. Вахов, Д. Н. Автоматизированные системы пожаротушения и противоаварийной защиты [Текст] / Д. Н. Вахов // Автоматизация в промышленности. – 2015. – № 6. – С. 29–31.
5. Ведомственные указания по противопожарному проектированию предприятий, зданий и сооружений нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности [Текст] : ВУПП–88 : утв. Миннефтехимпром СССР 14.03.1986, Приказ №762. – Взамен ВНТП–28–79 ; ввод. в действие 14.03.1986. – М. : Миннефтехимпром СССР, 1989. – 31 с.
6. Венитиади, Н. А. Анализ потенциальной опасности установок пиролиза / Н. А. Венитиади, А. С. Королев // Материалы научно-практической конференции «Нефтегазовое производство – основа научно-технического прогресса и экономической стабильности» ; Труды РГУ нефти и газа (НИУ) имени

И.М. Губкина, Оренбургский филиал. – Саратов : Амирит, 2020. – С. 525–528.

7. Взрыв на Ачинском НПЗ. Охрана Труда! [Электронный ресурс]. // YouTube : Охрана труда в видеоформате от Блог–Инженера. – 2024. – Режим доступа: youtube.com/watch?v=QEHRiSEpUQc&t=793s (дата обращения 02.01.2024).

8. Воронин, В. В. Разработка автоматизированной системы противоаварийной защиты абсорбционно-газофракционирующей установки [Текст] / В. В. Воронин, Е. А. Захаров, И. В. Скубино // Информационные технологии XXI века : Сборник научных трудов. – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2014. – С. 58–62.

9. Гоппе, Г. Г. Математическая модель управления давлением газовых сред в автоклаве для вулканизации резиновых изделий [Текст] / Г. Г. Гоппе, Д. С. Киргин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 11(58). – С. 15–20.

10. Гоппе, Г. Г. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процесса изменения давления пара в автоклаве при вулканизации резиновых изделий [Текст] / Г. Г. Гоппе, Д. С. Киргин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 11(82). – С. 265–271.

11. Гордиенко, Д. М. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов [Текст] / Д. М. Гордиенко, Ю. Н. Шебеко, А. Ю. Шебеко, Д. С. Кириллов, В. А. Трунева. – М. : ВНИИПО МЧС России, 2012. – 242 с.

12. ГОСТ 12.1.010–76. Взрывобезопасность. Общие требования [Текст]. – Введ. 1978–01–01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 7 с.

13. ГОСТ 12.3.047–2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля [Текст]. – Взамен ГОСТ Р 12.3.047–98 ; введ. 2012–12–27. – М. : Стандартиформ, 2014. – 65 с.

14. ГОСТ 27.301–95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – Взамен ГОСТ 27.410–87 (в части п. 2) ; введ. 1997–01–01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1996. – 15 с.

15. ГОСТ Р МЭК 61508-1-2007. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования [Текст]. – Введ. 2007-12-27. – М. : Стандартиформ, 2008. – 50 с.

16. ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Требования к системам. – Взамен ГОСТ Р МЭК 61508-2-2007 ; введ. 2012-10-29. – М. : Стандартиформ, 2014. – 86 с.

17. ГОСТ Р МЭК 61511-1-2018. Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов. Термины, определения и технические требования. – Взамен ГОСТ Р МЭК 61511-1-2011 ; введ. 2018-08-08. – М. : Стандартиформ, 2018. – 67 с.

18. Гумеров, И. Ф. Совершенствование системы противоаварийной защиты трубчатых печей [Текст] / И. Ф. Гумеров, С. А. Федоров, Е. В. Шептунов [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2018. – № 10. – С. 49–53.

19. Демехин, Ф. В. Методологические основы совершенствования автоматизированных систем противопожарной защиты предприятий нефтеперерабатывающего комплекса с применением видеотехнологий [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.03 : защищена 27.03.09 / Демехин Феликс Владимирович. – СПб., 2009. – 399 с. – 003463466.

20. Добротворский, А. М. О вреде экономии на паровой завесе печей [Текст] / А. М. Добротворский, А. В. Балуттов, Е. П. Денисенко [и др.] // Химическая техника. – 2016. – № 2. – С. 25.

21. Добротворский, А. М. Опыт экспертизы промышленной безопасности документации на строительство технологических печей, технического диагностирования и анализа технического состояния печного оборудования [Текст] / А. М. Добротворский, А. В. Балуттов, Е. П. Денисенко [и др.] // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. – 2015. – № 5. – С. 102–108.

22. Инструкция по проектированию паровой защиты технологических печей на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности : утв. М-вом нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР 21.09.1976. – М. : ВНИИПКнефтехим, 1976. – 24 с.

23. Кадыров, Р. Р. Модернизация системы автоматизированного управления узлом хемосорбции и локальной очистки сточных вод / Р. Р. Кадыров, И. А. Каримова // Современные технологии: достижения и инновации – 2020 : Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции, Стерлитамак, 25 марта 2020 года. – Стерлитамак : Нефтегазовое дело, 2020. – С. 417–418.

24. Кадыров, Р. Р. Разработка автоматизированной системы управления по загрузке углеводородных фракций технологических установок производства бутадиена, изопрена, латексов в цехе сырья №1 открытого акционерного общества «Стерлитамакский нефтехимический завод» / Р. Р. Кадыров, А. А. Гиззатуллин // Современные технологии: достижения и инновации – 2020 : Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции, Стерлитамак, 25 марта 2020 года. – Стерлитамак : Нефтегазовое дело, 2020. – С. 411–413.

25. Кадыров, Р. Р. Разработка автоматизированной системы управления узлом азеотропной осушки толуола, получения толуола-хладагента и конденсации углеводородных отдувок / Р. Р. Кадыров, Н. Ф. Ахметов // Современные технологии: достижения и инновации – 2020 : Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции, Стерлитамак, 25 марта 2020 года. – Стерлитамак : Нефтегазовое дело, 2020. – С. 401–402.

26. Камешков, А. В. Установка ЭЛОУ-АВТ-2. Этапы модернизации [Текст] / А. В. Камешков, М. М. Гоев, Н. Н. Коронатов, С. В. Рассказов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2011. – № 5. – С. 12–13.

27. Карар, М. Е. История и современное состояние нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности Казахстана [Текст] / М. Е. Карар // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 21. – С. 32–38.

28. Катин, В. Д. Системы пожаротушения на трубчатых технологических печах нефтеперерабатывающих заводов [Текст] / В. Д. Катин, В. И. Нестеров // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2019. – № 1–3. – С. 334–336.

29. Катин, В. Д. Характеристика систем пожаротушения технологических печей нефтеперерабатывающих заводов / В. Д. Катин, И. Я. Борзеев // Сборник статей XXIV Международной научно-практической конференции «Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии», Пенза, 30–31 марта 2022 года. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 45–48.

30. Каяшев, А. И. Оптимизация температурного режима прокали катализаторов крекинга по экономическим показателям технологического процесса [Текст] / А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева, Р. Ф. Габитов // Башкирский химический журнал. – 2011. – Т. 18. – № 2. – С. 106–110.

31. Каяшев, А. И. Проектирование интегрированных систем управления технологическими процессами и производствами в среде Trase Mode 6 [Текст] / А. И. Каяшев, Е. А. Муравьева, М. И. Шарипов. – Уфа : Издательство «Нефтегазовое дело», 2012. – 131 с. – ISBN 978-5-98755-126-1.

32. Киргин, Д. С. Энергосберегающие технологии вулканизации в автоматизированных системах производства резиновых изделий [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 : защищена 21.02.13 / Киргин Дмитрий Сергеевич. – Иркутск, 2013. – 155 с. – 005048967.

33. Клапан регулирующий КР 25с947нж с электроприводом Ду 15...300 [Электронный ресурс] // ООО «Вся арматура». – 2024. – Режим доступа: all-armatura.ru/klapany/klapany-reguliruyuwie-s-elektroprivodom/klapan-reguliruyuwij-kr-25s947nzh-s-elektroprivodom-du-15-300-vr525/ (дата обращения 03.04.2024).

34. Конесев, С. Г. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем [Электронный ресурс] / С. Г. Конесев, Р. Т. Хазиева // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–1. – Режим доступа: science-education.ru/ru/article/view?id=17558 (дата обращения 11.06.2024).

35. Контроллер программируемый логический МКLogic200 : руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] // АО «Нефтеавтоматика» [сайт]. – 2024. – Режим доступа: nefteavtomatika.ru/ru/sup/industrial-automation-facilities-and-systems/plk/plk-serii-mklogic-200/?tab=mc_third (дата обращения 03.04.2024).

36. Корж, А. Ф. Технология переработки нефти и газа. Процессы глубокой переработки нефти и нефтяных фракций : учеб.-метод. комплекс для студ. спец. 1–48 01 03 в 2-х ч. : ч. 2 Методические материалы к практическим и семинарским занятиям / А. Ф. Корж, С. М. Ткачев. – Новополюцк : ПГУ, 2006. – 160 с. – ISBN 5-7501-0296-3.

37. Коронатов, Н. Н. Моделирование и оптимизация химико–технологической системы вторичной ректификации бензинов ксилольного риформинга [Текст] / Н. Н. Коронатов, Н. В. Кузичкин, Н. В. Лисицын // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2014. – № 27(53). – С. 47–55.

38. Коронатов, Н. Н. Управление параметрами технологических процессов нефтепереработки [Текст] / Н. Н. Коронатов, И. В. Ильин, С. Е. Калязина // Экономика и управление. – 2020. – Т. 26. – № 7/177. – С. 784–792. – doi 10.35854/1998-1627-2020-7-784-792.

39. Кубашев С. М. Разработка основного технологического оборудования установки гидроочистки дизельного топлива [Текст] : магистерская дис. : 18.04.02 / Кубашев Сымбат Муратович. – Томск, 2009. – 128 с.

40. Лебедева, М. И. Автоматизированная система управления противопожарной защитой технологической установки первичной переработки нефти [Текст] / М. И. Лебедева, А. В. Федоров, Ф. В. Демехин // Материалы Международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2014. – № 23. – С. 303–306.

41. Лебедева, М. И. Комплекс технических средств автоматизированной системы управления противопожарной защитой технологической установки первичной переработки нефти [Текст] / М. И. Лебедева, А. В. Федоров, Е. Н. Ломаев, А. В. Богданов // Пожары и чрезвычайные ситуации:

предотвращение, ликвидация. – 2015. – № 1. – С. 22–27.

42. Лебедева, М. И. Модели и алгоритмы автоматизации системы взрывопожарозащиты технологического процесса первичной переработки нефти [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 : защищена 07.10.15 / Лебедева Марина Ивановна. – М., 2013. – 182 с. – 2015674668.

43. Лебедева, М. И. Организационная структура автоматизированной системы управления противопожарной защитой установки первичной переработки нефти [Электронный ресурс] // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 4/56. – Режим доступа: elibrary.ru/download/elibrary_23105878_47219979.pdf (дата обращения 12.12.2024).

44. Левин, С. Н. Интеграция систем противопожарной защиты с АСУ ТП [Текст] / С. Н. Левин // Алгоритм безопасности. – 2016. – № 4. – С. 12–14.

45. Ленгипронефтехим [Электронный ресурс] : материал из Википедии // Википедия : свободная энциклопедия. – 2024. – Режим доступа: ru.wikipedia.org/wiki/Ленгипронефтехим (дата обращения 18.09.2024).

46. Лукьянченко, А. А. Моделирование газодинамики полей концентраций в помещениях для обеспечения пожарной безопасности и экологического мониторинга [Текст] / А. А. Лукьянченко, А. В. Федоров // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009. – № 1. – С. 56–62.

47. Мазуров, В. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Часть 2. Автоматические регуляторы и их настройка. Общие сведения о промышленных системах регулирования [Электронный ресурс] // Компоненты и технологии. – 2003. – №5. – Режим доступа: kit-e.ru/wp-content/uploads/2003_05_114.pdf (дата обращения 10.07.2024).

48. Масаков, Е. М. Задачи систем усовершенствованного управления технологическими процессами в нефтехимии [Текст] / Е. М. Масаков, Р. Р. Кадыров // Актуальные проблемы науки и техники : Материалы II Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», Сарапул, 19–21 мая 2022 года. – Ижевск : Ижевский

государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2022. – С. 657–659.

49. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : [Электронный ресурс] : утв. МЧС России 26.06.2024, Приказ № 533 : ввод в действие с 01.01.2025 // ГАРАНТ.РУ: информационно-правовой портал [сайт]. – 2025. – Режим доступа: garant.ru/products/ipo/prime/doc/409515151/#:~:text=%D0%B8%D1%8E%D0%BD%D1%8F%202024%20%D0%B3. (дата обращения 02.01.2025).

50. Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности [Электронный ресурс] : Руководство по безопасности : утв. Ростехнадзором России 28.11.2022, Приказ № 414 : ввод в действие с 28.11.2022 // Техкранэнерго: информационно-правовой портал [сайт]. – 2024. – Режим доступа: tk-expert.ru/lib/1080/ (дата обращения 01.02.2024).

51. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах [Электронный ресурс] : Руководство по безопасности : утв. Ростехнадзором России 03.11.2022, Приказ № 387 : ввод в действие с 03.11.2022 // Техкранэнерго: информационно-правовой портал [сайт]. – 2024. – Режим доступа: tk-expert.ru/lib/1052/ (дата обращения 01.02.2024).

52. Можяев, А. С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и расчет надежности и безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами и оборудованием на стадии проектирования / А. С. Можяев // Методические рекомендации. – Спб. : СПИК СЗМА, 2003. – 35 с.

53. Можяев, А. С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем [Электронный ресурс]. – Л. : Воен.-мор. акад. им. Маршала Совет. Союза А. А. Гречко. – 1988. – 68 с. – Режим доступа: szma.com/wp-content/uploads/2023/08/Mozhaev_method.pdf (дата обращения 02.04.2024).

54. Можаяев, А. С. Технология автоматизированного структурно-логического моделирования надежности, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования систем [Текст] / А. С. Можаяев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 9. – С. 1–14.
55. Насибуллин, Р. Р. Газовоздушные завесы, формируемые свободноконвективными турбулентными воздушными струями [Текст] / Р. Р. Насибуллин, А. Д. Галеев, С. И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 20. – С. 180–182.
56. Насибуллин, Р. Р. Компьютерное моделирование воздействия ветрового потока на эффективность защиты тепловой завесы [Текст] / Р. Р. Насибуллин, А. Д. Галеев, С. И. Валеев // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 151–153.
57. Насибуллин, Р. Р. Моделирование защитной паровой завесы [Текст] / Р. Р. Насибуллин, С. И. Валеев, А. Д. Галеев, С. И. Поникаров // Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук: Сборник научных статей по итогам работы пятого международного круглого стола, Казань, 29 сентября 2018 года. – Казань : ООО «Конверт», 2018. – С. 28–32.
58. Насибуллин, Р. Р. Численный анализ взаимодействия паровой завесы и газовоздушного облака [Текст] / Р. Р. Насибуллин, А. Д. Галеев, С. И. Поникаров // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 3. – С. 291–293.
59. Нозик, А. А. Применение программного комплекса АРБИТР в задачах проектной оценки надежности структурно-сложных систем / А. А. Нозик, А. С. Можаяев, А. В. Струков, И. А. Гладкова // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Международный научный семинар им. Ю. Н. Руденко, Санкт-Петербург, 30 июня 2014 года. – СПб. : Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2015. – С. 624–633.
60. Нозик, А. А. Программная реализация методов количественного анализа риска аварий опасных производственных объектов на основе логико-вероятностного и логико-детерминированного подходов [Текст] /

А. А. Нозик, А. В. Струков, И. А. Можаяева // Наука и Безопасность. – 2016. – № 2/20. – С. 25–35.

61. О промышленной безопасности опасных производственных объектов [Электронный ресурс] : федер. закон : [Принят Гос. Думой 20 июня 1997 г. №116–ФЗ : с изменениями на 14 нояб. 2023 г.] // Кодекс : информационно-правовой портал [сайт]. – 2024. – Режим доступа: docs.cntd.ru/document/9046058 (дата обращения 12.12.2024).

62. Обеспечение пожарной безопасности предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности [Текст] : рекомендации : утв. ФГУ ВНИИПО МЧС России 24.05.2004 : Согласованы ГУГПС МЧС России письмом от 13.05.2004 №18/5/1225. – М. : ВНИИПО, 2004. – 158 с.

63. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : СП 12.13130.2009 : утв. МЧС России 25.03.2009, Приказ № 182 : ввод. в действие 25.03.2009. – М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. – 27 с.

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

65. Оспанов, К. К. Оценка эффективности применения паровых завес трубчатых печей с функциями контроля и управления давлением пара / 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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. (дата обращения 21.01.2024).

69. Оспанов, К. К. Аналитический обзор систем противоаварийной и противопожарной защиты технологического процесса гидроочистки дизельного топлива [Текст] / К. К. Оспанов, А. В. Федоров, С. К. Байжанова // Наука и образование в гражданской защите. – 2022. – № 3. – С. 64–69.

70. 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 (дата обращения 03.07.2024).

71. 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 (дата обращения 04.03.2025).

72. 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 ; опубл. 28.04.2023, Бюл. № 5. – 1 с.

73. Оспанов, К. К. Развитие автоматизированных систем управления взрывопожарной защитой опасных производственных процессов [Текст] / К. К. Оспанов, А. В. Федоров, О. С. Калиев // Сборник тезисов и докладов XIII-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций», Кокшетау, 7 октября 2022 года. – Кокшетау : АГЗ им. М. Габдуллина МЧС РК, 2022. – С. 128–132.

74. 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.

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

76. Остах, С. В. Формализация алгоритмизации системного проектирования автоматизированных систем пожарной безопасности [Электронный ресурс] / С. В. Остах, С. А. Панов, Н. Г. Топольский // Технологии техносферной безопасности. – 2006. – № 1/5. – Режим доступа: elibrary.ru/download/elibrary_21816292_95697152.pdf (дата обращения 21.01.2024).

77. Паровая защита трубчатых печей [Электронный ресурс] : материал форума «Диалог специалистов» // НП АВОК. – 2024. – Режим доступа: forum.abok.ru/lofiversion/index.php/t97277-0.html (дата обращения 12.03.2024).

78. ПД100И, модель 1x1. Датчик, преобразователь давления измерительный повышенной надежности для насосных, котельных, водоснабжения, агрессивных сред [Электронный ресурс] // ООО «Производственное Объединение ОВЕН» [сайт]. – 2024. – Режим доступа: owen.ru/product/pd100i_datchik_davleniya_s_uvelichennim_mezhpoverochnim_intervalom_dlya_teploschetchikov (дата обращения 03.04.2024).

79. Пегушин, С. Л. Оценка и повышение надежности автоматических систем противоаварийной защиты нефтеперерабатывающих производств / С. Л. Пегушин, А. Г. Шумихин // Сборник научных трудов SWorld. – 2012. – Т. 5, № 3. – С. 45–49.

80. Петрова, Н. В. Анализ практики экспертного исследования пожаров на объектах хранения нефти и нефтепродуктов [Текст] / Н. В. Петрова, И. Д. Чешко, М. А. Галишев // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2016. – № 3. – С. 40–46.

81. ПИД регулятор. Частные случаи (П, ПД, ПИ регулятор) : глоссарий [Электронный ресурс] // ООО «Производственное Объединение ОВЕН» [сайт]. – 2024. – Режим доступа: siberien.ru/text/17029976.htm (дата обращения 10.07.2024).

82. ПК АРБИТР. О программном комплексе [Электронный ресурс] // СПИК СЗМА : специализированная инжиниринговая компания [сайт]. – 2024. – Режим доступа: szma.com/arbitr/ (дата обращения 03.05.2024).

83. Правила пожарной безопасности в нефтяной промышленности ППБО–85 [Текст] / сост. В. И. Хоботько, А. С. Агаев, И. С. Марченко и др. – М. : Недра, 1987. – 152 с.

84. Рахматуллина, А. Р. Анализ аварийных ситуаций с участием печного оборудования на нефтеперерабатывающих заводах [Текст] / А. Р. Рахматуллина, Т. М. Еникеева, Н. В. Вадулина // Экспертиза промышленной безопасности и диагностики опасных производственных объектов. – 2016. – № 2/8. – С. 49–52.

85. Сагдатуллин, А. М. Интеллектуальные системы автоматизации в нефтегазовой промышленности / А. М. Сагдатуллин, А. А. Емекеев, А. И. Каяшев //

Современные технологии в нефтегазовом деле – 2014 : Сборник трудов международной научно-технической конференции, Октябрьский, 14 марта 2014 года, Уфимский государственный нефтяной технический университет. Том 2. – Октябрьский : Аркаим, 2014. – С. 253–257.

86. Садыков, Х. А. Особенности построения АСУТП в нефтепереработке [Текст] / Х. А. Садыков, Ю. К. Хатаев // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 2/104. – С. 87–91.

87. Сафонов, А. П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям : учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.

88. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям [Электронный ресурс] : СП 4.13130.2013 : утв. МЧС России 24.04.2013, Приказ №288. – Взамен СП 4.13130.2009 ; ввод. в действие 29.07.2013 // Кодекс: информационно-правовой портал [сайт]. – 2024. – Режим доступа: base.garant.ru/70398302/ (дата обращения 12.12.2024).

89. Скворцов, М. С. Проектирование систем ПАЗ с учетом анализа опасностей и риска аварий на опасном производственном объекте [Текст] / М. С. Скворцов // Автоматизация в промышленности. – 2018. – № 3. – С. 61.

90. Текешева, Ж. А. Изготовление трубчатой печи [Текст] // Академическая публицистика. – 2018. – № 5. – С. 62–68.

91. Топольский, Н. Г. Комплексная оценка эффективности автоматизированных систем противопожарной защиты предприятий нефтепереработки с использованием видеотехнологий [Текст] / Н. Г. Топольский, Ф. В. Демехин // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 4(100). – С. 33–36.

92. Топольский, Н. Г. Модель оценки влияния человека на устойчивость специального программного обеспечения автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности [Текст] / Н. Г. Топольский, А. В. Крючков, К. А. Михайлов, Т. А. Нгуен // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27, № 7–8. – С. 53–59. – doi: 10.18322/PVB.2018.27.07–08.53–59.

93. Топольский, Н. Г. Основы автоматизированных систем

пожаровзрывобезопасности объектов. – М. : МИПБ МВД России, 1997. – 164 с.

94. Топольский, Н. Г. Основы создания автоматизированных систем пожарной безопасности объектов : учеб. пособие / Н. Г. Топольский, И. М. Тетерин, А. С. Гудков.– М. : Академия ГПС МЧС России, 2006. – 60 с.

95. Уварова, Н. А. Архитектура автоматизации технологического процесса производства топлива на мини-НПЗ / Н. А. Уварова // Информационные технологии в современном мире – 2020 : материалы XVI Всероссийской студенческой конференции, Екатеринбург, 14 мая 2020 года, под науч. ред. Н. В. Хмельковой. – Екатеринбург : Автономная некоммерческая организация высшего образования «Гуманитарный университет», 2020. – С. 75–77.

96. Управляемый коммутатор L2 до 3 Гб и 6 Мб портов, на DIN-Rail SICOM3000BA : краткое описание [Электронный ресурс] // Компания ООО «ТМС» [сайт]. – 2024. – Режим доступа: kyland.ru/userfiles/product-files/datasheet-ru/148.pdf (дата обращения 03.04.2024).

97. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств [Электронный ресурс] : утв. Ростехнадзором России 15.12.2020, Приказ № 533 : введ. в действие 01.01.2021 // Кодекс: информационно-правовой портал [сайт]. – 2024. – Режим доступа: docs.cntd.ru/document/573200380 (дата обращения 21.01.2024).

98. Федоров, А. В. Информационное обеспечение АСУ противопожарной защитой технологических процессов переработки нефти [Электронный ресурс] / А. В. Федоров, М. И. Лебедева, Е. Н. Ломаев // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 6/58. – Режим доступа: elibrary.ru/download/elibrary_23150209_17920815.pdf (дата обращения 12.12.2024).

99. Федоров, А. В. 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.

100. Федоров, А. В. О характеристиках и применении газоаналитических сенсоров [Электронный ресурс] / А. В. Федоров, А. А. Лукьянченко, А. В. Соколов // Технологии техносферной безопасности. – 2006. – № 1/5. – Режим доступа: elibrary.ru/download/elibrary_21816293_45331704.pdf (дата обращения 12.12.2024).

101. Федоров, А. В. Основы создания автоматизированных систем управления противопожарной защитой потенциально опасных производств [Электронный ресурс] / А. В. Федоров, А. В. Лукьянченко, Ч. Д. Хынг, А. М. Алешков // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 2/18. – Режим доступа: elibrary.ru/download/elibrary_14779183_53791177.pdf (дата обращения 12.12.2024).

102. Федоров, А. В. Повышение уровня пожаровзрывобезопасности потенциально опасных производств путем анализа и управления рисками [Текст] / А. В. Федоров, А. М. Алешков, М. И. Лебедева // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2011. – № 1. – С. 21–28.

103. Федоров, А. В. Пожарные извещатели АСУ противопожарной защитой нефтеперерабатывающих производств [Текст] / А. В. Федоров, А. А. Лукьянченко, П. В. Коноваленко // Вестник Академии Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2005. – № 4. – С. 87–90.

104. Федоров, А. В. Применение тензорного метода для прогнозирования аварийных ситуаций в потенциально опасных технологических процессах [Текст] / А. В. Федоров, А. А. Лукьянченко, Е. Н. Ломаев [и др.] // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2010. – № 3. – С. 122–128.

105. Федоров, А. В. Прогнозирование аварийных ситуаций на потенциально опасных производствах с использованием метода двойственных сетей [Текст] / А. В. Федоров, А. А. Лукьянченко, А. М. Алешков // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2010. – № 3/15. – С. 1–14.

106. Федоров, А. В. Совершенствование автоматизированной системы управления противопожарной защитой объектов нефтепереработки [Текст] / А. В. Федоров, А. Н. Членов, М. И. Лебедева // Материалы Международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2013. – № 22. –

С. 231–234.

107. Федоров, А. В. Структура и функции автоматизированной системы управления противопожарной защитой промышленного объекта [Электронный ресурс] / А. В. Федоров, А. А. Лукьянченко, А. М. Алешков, Е. Н. Ломаев // Технологии техносферной безопасности. – 2010. – № 3/31. – Режим доступа: elibrary.ru/download/elibrary_16335650_19516580.pdf (дата обращения 12.12.2024).

108. Фомин, В. И. Автоматический аналитический контроль взрывоопасности воздушной среды промышленных объектов [Текст] / В. И. Фомин, А. В. Федоров, А. А. Лукьянченко, Д. К. Костюченков // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – Т. 13. – № 4. – С. 49–54.

109. Чихрай, Е. В. Способ стабилизации давления водяного пара при проведении высокотемпературных коррозионных испытаний графитовых материалов ЯР И ТЯР [Текст] / Е. В. Чихрай, В. П. Шестаков, С. К. Аскербек, И. Е. Кенжина // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – №4. – С. 134–138.

110. Членов, А. Н. Метод оценки влияния качества пожарной сигнализации на эффективность автоматизированной системы противопожарной защиты промышленного предприятия [Электронный ресурс] / А. Н. Членов, Ф. И. Демехин // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 5(21). – Режим доступа: elibrary.ru/item.asp?id=14866966 (дата обращения 17.06.2024).

111. Эйтингон, В. Н. Методы организации экспертизы и обработки экспертных оценок в менеджменте : учебно-методическое пособие / В. Н. Эйтингон, М. А. Кравец, Н. П. Панкратова. – Воронеж : ВГУ, 2004. – 44 с.

112. Эмзаев, А. З. Применение контроллеров в системах подготовки и очистки нефти [Текст] / А. З. Эмзаев, А. З. Эмзаев, Х. А. Садыков // Молодежь, наука, инновации : Сборник статей X Всероссийской научно–практической конференции, Грозный, 28 октября 2021 года. – Грозный : РПК «СПЕКТР» (ИП Иноркаев Ваха Абу-Рашидович), 2021. – С. 404–408.

113. 100 Largest Losses in the Hydrocarbon Industry 1974–2019 // Marsh LLC. – 2020. – Vol. 26. P. 1–3. – Режим доступа: marsh.com/content/dam/marsh/Documents/PDF/UK-en/100-largest-losses-in-hydrocarbon-history.pdf (дата обращения:

26.04.2024).

114. Diaz-Ovalle, C. A model to optimize facility layouts with toxic releases and mitigation systems / C. Diaz-Ovalle, R. Vázquez-Román, J. Lira-Flores, M. S. Mannan. // *Computers & Chemical Engineering*. – 2013. – Vol. 56. – P. 218–227. – doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.05.017.

115. Diaz-Ovalle, C. A simplified steady-state model for air, water and steam curtains / C. Diaz-Ovalle, R. Vazquez-Roman, R. Lesso-Arroyo, M. S. Mannan. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2012. – Vol. 25. – № 6. – doi.org/10.1016/j.jlp.2012.05.011.

116. Foong, O. S. ALAP: Alarm Prioritization System For Oil Refinery / O. S. Foong, S. A. Rambli, D. A. Noor // *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. – San Francisco : WCECS. – 2009. – Vol. 2. – ISBN978-988-18210-2-7.

117. Hartwig, S. Der Wirkungsgrad von Dampfvorhängen zur Verdünnung von Schwergasschwaden bei Störfallfreisetzungen / S. Hartwig, U. Barth // *Chemie Ingenieur Technik*. – 1991. – Vol. 63. – № 10. – doi.org/10.1002/cite.330631017.

118. Iftekharul, M. An Intelligent Fire Detection and Mitigation System Safe from Fire (SFF) / M. Iftekharul, Abid-Ar-Rafi, I. Neamul, H. Rifat // *International Journal of Computer Applications*. – 2016. – Vol. 133. – № 6. – doi:10.5120/ijca2016907858.

119. Lopez, J. P. Water spray and steam curtain design: a common research programme / J. P. Lopez, J. Badin, J. Lieto, R. Grollier-Baron // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 1990. – Vol. 3. – № 2. – doi.org/10.1016/0950-4230(90)85004-S.

120. Marsegan, C. Studio fluidodinamico dell'influenza di cortine di vapore acqueo sulla dispersione di gas densi [Text] / C. Marsegan. – Milano : Politecnico di Milano, 2013. – P. 68–69.

121. Nivolianitou, Z. Statistical analysis of major accidents in petrochemical industry notified to the major accident reporting system (MARS) / Z. Nivolianitou, M. Konstandinidou, M. Christou // *Journal of Hazardous Materials*. – Vol. 137. – № 1. – doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.12.042.

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

123. Sato, K. Gas screening effect caused by steam curtains / K. Sato // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 1989. – Vol. 2. – № 4 – doi.org/10.1016/0950-4230(89)80035-X.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Свидетельство о государственной регистрации «Программный модуль автоматической системы контроля и поддержки давления пара противопожарной паровой завесы трубчатой печи»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023618750

«Программный модуль автоматической системы контроля и поддержки давления пара противопожарной паровой завесы трубчатой печи»

Правообладатели: **Оспанов Кайрат Кельденович (KZ), Малфи Халил Алаззи Масаед Наджи (YE)**

Авторы: **Оспанов Кайрат Кельденович (KZ), Малфи Халил Алаззи Масаед Наджи (YE)**

Заявка № **2023617369**

Дата поступления **14 апреля 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **28 апреля 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Handwritten signature of Yu.S. Zubov in black ink.

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Результаты расчетов экспертной оценки

Б.1. Результаты расчета коэффициентов важности для показателя « $t_{ЭВ}$ »Таблица Б.1 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 2: $s_8 = s_5$

\mathcal{E}_2	s_1	s_5	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	4,000	1,500	4,000	2,167
s_5	0,250	1,000	0,375	1,000	
s_7	0,667	2,667	1,000	2,667	
s_8	0,250	1,000	0,375	1,000	
W	w_1	w_5	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,462	0,115	0,308	0,115	1,000

Таблица Б.2 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 3: $s_8 = s_1$

\mathcal{E}_3	s_1	s_5	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	4,000	1,500	1,000	2,917
s_5	0,250	1,000	0,375	0,250	
s_7	0,667	2,667	1,000	0,667	
s_8	1,000	4,000	1,500	1,000	
W	w_1	w_5	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,343	0,086	0,229	0,343	1,001

Таблица Б.3 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 4: $s_8 = s_5$

\mathcal{E}_4	s_1	s_5	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	4,000	1,500	4,000	2,167
s_5	0,250	1,000	0,375	1,000	
s_7	0,667	2,667	1,000	2,667	

Продолжение таблицы Б.3

s_8	0,250	1,000	0,375	1,000	
W	w_1	w_5	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,462	0,115	0,308	0,115	1,000

Таблица Б.4 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 5: $s_8 = s_1$

\mathcal{E}_5	s_1	s_5	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	4,000	1,500	1,000	2,917
s_5	0,250	1,000	0,375	0,250	
s_7	0,667	2,667	1,000	0,667	
s_8	1,000	4,000	1,500	1,000	
W	w_1	w_5	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,343	0,086	0,229	0,343	1,001

Таблица Б.5 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 6: $s_8 = s_1$

\mathcal{E}_6	s_1	s_5	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	4,000	1,500	1,000	2,917
s_5	0,250	1,000	0,375	0,250	
s_7	0,667	2,667	1,000	0,667	
s_8	1,000	4,000	1,500	1,000	
W	w_1	w_5	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,343	0,086	0,229	0,343	1,001

Таблица Б.6 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 7: $s_8 = s_7$

\mathcal{E}_7	s_1	s_5	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	4,000	1,500	1,500	2,583
s_5	0,250	1,000	0,375	0,375	
s_7	0,667	2,667	1,000	1,000	
s_8	0,667	2,667	1,000	1,000	
W	w_1	w_5	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,387	0,097	0,258	0,258	1,000

Б.2. Результаты расчета коэффициентов важности для показателя « $t_{АП}$ »Таблица Б.7 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 1: $s_8 = s_1$

\mathcal{E}_1	s_1	s_4	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	3,000	1,500	1,000	2,997
s_4	0,330	1,000	0,500	0,333	
s_7	0,667	2,000	1,000	0,667	
s_8	1,000	3,000	1,500	1,000	
W	w_1	w_4	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,334	0,110	0,222	0,334	1

Таблица Б.8 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 2: $s_8 = s_4$

\mathcal{E}_2	s_1	s_4	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	3,000	1,500	3,000	2,330
s_4	0,330	1,000	0,500	1,000	
s_7	0,667	2,000	1,000	2,000	
s_8	0,333	1,000	0,500	1,000	
W	w_1	w_4	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,429	0,142	0,286	0,143	1

Таблица Б.9 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 3: $s_8 = s_4$

\mathcal{E}_3	s_1	s_4	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	3,000	1,500	1,500	2,663
s_4	0,330	1,000	0,500	0,500	
s_7	0,667	2,000	1,000	1,000	
s_8	0,667	2,000	1,000	1,000	
W	w_1	w_4	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,375	0,124	0,250	0,250	0,999

Таблица Б.10 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 4: $s_8 = s_4$

\mathcal{E}_4	s_1	s_4	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	3,000	1,500	3,000	2,330
s_4	0,330	1,000	0,500	1,000	
s_7	0,667	2,000	1,000	2,000	
s_8	0,333	1,000	0,500	1,000	
W	w_1	w_4	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,429	0,142	0,286	0,143	1

Таблица Б.11 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 5: $s_8 = s_7$

\mathcal{E}_5	s_1	s_4	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	3,000	1,500	1,500	2,663
s_4	0,330	1,000	0,500	0,500	
s_7	0,667	2,000	1,000	1,000	
s_8	0,667	2,000	1,000	1,000	
W	w_1	w_4	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,375	0,124	0,250	0,250	0,999

Таблица Б.12 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 6: $s_8 = s_1$

\mathcal{E}_6	s_1	s_4	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	3,000	1,500	1,000	2,997
s_4	0,330	1,000	0,500	0,333	
s_7	0,667	2,000	1,000	0,667	
s_8	1,000	3,000	1,500	1,000	
W	w_1	w_4	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,334	0,110	0,222	0,334	1

Таблица Б.13 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 7: $s_8 = s_1$

\mathcal{E}_7	s_1	s_4	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	3,000	1,500	1,000	2,997

Продолжение таблицы Б.13

s_4	0,330	1,000	0,500	0,333	
s_7	0,667	2,000	1,000	0,667	
s_8	1,000	3,000	1,500	1,000	
W	w_1	w_4	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,334	0,110	0,222	0,334	1

Б.3. Результаты расчета коэффициентов важности для показателя « t_{III} »Таблица Б.14 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 1: $s_8=s_7$

\mathcal{E}_1	s_1	s_2	s_3	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	2,000	3,000	1,500	1,500	3,167
s_2	0,500	1,000	1,500	0,750	0,750	
s_3	0,333	0,667	1,000	0,500	0,500	
s_7	0,667	1,333	2,000	1,000	1,000	
s_8	0,667	1,333	2,000	1,000	1,000	
W	w_1	w_2	w_3	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,316	0,158	0,105	0,211	0,211	1,000

Таблица Б.15 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 2: $s_8=s_1$

\mathcal{E}_2	s_1	s_2	s_3	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	2,000	3,000	1,500	1,000	3,500
s_2	0,500	1,000	1,500	0,750	0,500	
s_3	0,333	0,667	1,000	0,500	0,333	
s_7	0,667	1,333	2,000	1,000	0,667	
s_8	1,000	2,000	3,000	1,500	1,000	
W	w_1	w_2	w_3	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,286	0,143	0,095	0,190	0,286	1,000

Таблица Б.16 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 3: $s_8=s_1$

\mathcal{E}_3	s_1	s_2	s_3	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	2,000	3,000	1,500	1,500	3,167
s_2	0,500	1,000	1,500	0,750	0,750	
s_3	0,333	0,667	1,000	0,500	0,500	
s_7	0,667	1,333	2,000	1,000	1,000	
s_8	0,667	1,333	2,000	1,000	1,000	
W	w_1	w_2	w_3	w_7	w_8	Проверка t_{cti}
	0,316	0,158	0,105	0,211	0,211	1,000

Таблица Б.17 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 4: $s_8=s_7$

\mathcal{E}_4	s_1	s_2	s_3	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	2,000	3,000	1,500	1,500	3,167
s_2	0,500	1,000	1,500	0,750	0,750	
s_3	0,333	0,667	1,000	0,500	0,500	
s_7	0,667	1,333	2,000	1,000	1,000	
s_8	0,667	1,333	2,000	1,000	1,000	
W	w_1	w_2	w_3	w_7	w_8	Проверка t_{cti}
	0,316	0,158	0,105	0,211	0,211	1,000

Таблица Б.18 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 5: $s_8=s_2$

\mathcal{E}_5	s_1	s_2	s_3	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	2,000	3,000	1,500	2,000	3,000
s_2	0,500	1,000	1,500	0,750	1,000	
s_3	0,333	0,667	1,000	0,500	0,667	
s_7	0,667	1,333	2,000	1,000	1,333	
s_8	0,500	1,000	1,500	0,750	1,000	
W	w_1	w_2	w_3	w_7	w_8	Проверка t_{cti}
	0,333	0,167	0,111	0,222	0,167	1,000

Таблица Б.19 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 6: $s_8=s_1$

\mathcal{E}_6	s_1	s_2	s_3	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	2,000	3,000	1,500	1,000	3,500
s_2	0,500	1,000	1,500	0,750	0,500	
s_3	0,333	0,667	1,000	0,500	0,333	
s_7	0,667	1,333	2,000	1,000	0,667	
s_8	1,000	2,000	3,000	1,500	1,000	
W	w_1	w_2	w_3	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,286	0,143	0,095	0,190	0,286	1,000

Таблица Б.20 – Оценка влияния на основе мнения эксперта 7: $s_8=s_1$

\mathcal{E}_7	s_1	s_2	s_3	s_7	s_8	Δ
s_1	1,000	2,000	3,000	1,500	1,000	3,500
s_2	0,500	1,000	1,500	0,750	0,500	
s_3	0,333	0,667	1,000	0,500	0,333	
s_7	0,667	1,333	2,000	1,000	0,667	
s_8	1,000	2,000	3,000	1,500	1,000	
W	w_1	w_2	w_3	w_7	w_8	Проверка t_{CTi}
	0,286	0,143	0,095	0,190	0,286	1,000

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

Акты внедрения

«УТВЕРЖДАЮ»

Исполнительный директор

ТОО «Kyzylorda Refinery»

Абдраманов Т. М.

«11» 09 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»
Оспанова Кайрата Кельденовича в ТОО «Kyzylorda Refinery»

Комиссия в составе:

Председатель комиссии: Начальник УПН – Айходжаев Е.

Члены комиссии:

Начальник ПТО – Олжабай А. К.;

Зав. лабораторией – Шалбаева А.А.

подтверждает, что результаты диссертационной работы Оспанова К. К. посвящённой разработке моделей и алгоритмов функционирования системы паровой завесы трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива с функциями контроля и управления давлением пара использованы при разработке и внедрении новых методов автоматизации контроля и устойчивого функционирования паровых завес трубчатых печей в ТОО «Kyzylorda Refinery», а именно:

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

– 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;

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

Председатель комиссии



Айходжаев Е.

Члены комиссии



Олжабай А. К.

Шалбаева А.А.



Insurance company
«Freedom Finance Insurance» JSC,
115, Zhetysayn str., «Kaisar Plaza» BC,
floor 2, Almaty, 050000, Almaty district,
Republic of Kazakhstan

«Freedom Finance Insurance»
Сактандыру компаниясы
Акционерлік қоғамы, ҚР, 050000,
Алматы қ., Алматы ауданы, Жетітоқсан к.,
115 ү., 2 қабат, «Kaisar Plaza» БД

Акционерное общество
«Страховая компания «Freedom
Finance Insurance», РК, 050000, г. Алматы,
Алмалинский р-н, ул. Жетітоқсан, д. 115,
2 этаж, БЦ «Kaisar Plaza»

+7 727 300 43 00
info@ffins.kz

Исх.№ 13-06/4
От «13» июня 2023 г.

**Исполняющему обязанности
начальника Академии
им. М. Габдуллина МЧС
Республики Казахстан
полковнику Карменову К. К.**

Уважаемый Куанышбек Казетаевич!

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Оспанова Кайрата Кельденовича по специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (технические науки) обладают актуальностью и представляют практический интерес, а именно дополнительный показатель учитывающий наличие технических систем предотвращения пожара с контролем параметров функционирования для индексной оценки пожарного риска методом Гретенера. Данный показатель принят нашей компанией для использования в разработке внутриорганизационной методики и технологии определения величины страховых взносов производственных предприятий. Применение вышеуказанного показателя позволит расширить диапазон индексной оценки пожарных рисков при определении страховых взносов для производственных предприятий.

С уважением,

Директор Департамента Страхования

А. В. Белаш



5 777
ffins.kz

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии
гражданской защиты им. М. Габдуллина
МЧС Республики Казахстанв научной работе, к.т.н.,
подполковник гражданской защиты
М.М. Альменбаев

«10» 09 2024 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Оспанова Кайрата Кельденовича, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (технические науки)»

Комиссия в составе: председателя – начальника факультета очного обучения, к.т.н., подполковника гражданской защиты Макишева Жандоса Куандыковича, и членов комиссии – начальника научно-исследовательского центра, к.т.н., подполковника гражданской защиты Захарова Игорь Анатольевича, заместителя начальника кафедры пожарной профилактики полковника гражданской защиты Рахметулина Берика Жамбуловича подтверждает, что результаты диссертационной работы Оспанова Кайрата Кельденовича в части теоретических положений разработки подсистемы контроля и управления давлением пара в паровой завесе трубчатой печи технологической установки гидроочистки дизельного топлива, включающих модель и алгоритмы процесса контроля и управления давлением пара с фильтрацией текущей ошибки регулирования двойным скользящим средним использованы при выполнении 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 Академии гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан на 2023 год).

Председатель комиссии:

Начальник факультета очного обучения,
к.т.н., доцент, подполковник гражданской защиты

Ж.К. Макишев

Члены комиссии:

Начальник научно-исследовательского центра,
к.т.н., подполковник гражданской защиты

И.А. Захаров

Заместитель начальника кафедры
пожарной профилактики
полковник гражданской защиты

Б.Ж. Рахметулин




УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии
гражданской защиты им. М. Габдуллина
МЧС Республики Казахстан

по научной работе, к.т.н.,

подполковник гражданской защиты

 М.М. Альменбаев

«10» 09 2024 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Оспанова Кайрата Кельденовича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)» в учебную деятельность Академии гражданской защиты им. М.Габдуллина МЧС Республики Казахстан

Комиссия в составе: председателя – начальника факультета очного обучения, к.т.н., подполковника гражданской защиты Макишева Жандоса Куандыковича, и членов комиссии – начальника научно-исследовательского центра, к.т.н., подполковника гражданской защиты Захарова Игорь Анатольевича, заместителя начальника кафедры пожарной профилактики полковника гражданской защиты Рахметулина Берика Жамбуловича подтверждает, что результаты диссертационной работы Оспанова Кайрата Кельденовича используются при организации и проведении учебных занятий по дисциплинам «Пожарная безопасность технологических процессов» и «Производственная и пожарная автоматика» (направление подготовки 6В123 «Общественная безопасность» (уровень бакалавриата), образовательная программа 6В12302 «Пожарная безопасность»).

Председатель комиссии:

Начальник факультета очного
обучения, к.т.н., доцент,
подполковник гражданской защиты



Ж.К. Макишев

Члены комиссии:

Начальник научно-исследовательского
центра, к.т.н.,
подполковник гражданской защиты



И.А. Захаров

Заместитель начальника кафедры
пожарной профилактики
полковник гражданской защиты



Б.Ж. Рахметулин