

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт инженерной и экологической безопасности
(наименование института полностью)

20.04.01 Техносферная безопасность
(код и наименование направления подготовки)

Управление промышленной безопасностью, охраной труда и окружающей среды в
нефтегазовом и химическом комплексах
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование и разработка эффективных методов обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем

Обучающийся

А.В. Кудрявцев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

д.т.н., профессор В.А. Тарасов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы. Фамилия)

Консультант

к.э.н., доцент Т.Ю. Фрезе

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы. Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Содержание.....	2
Введение.....	3
Термины и определения	7
Перечень сокращений и обозначений.....	8
1 Теоретические основы обеспечения безопасности при эксплуатации факельных систем	9
1.1 Понятие факельных систем. Основы классификации и конструкция основных элементов системы	9
1.2 Обзор научных исследований в области факельных систем.....	19
2 Методы обеспечения безопасной эксплуатации.....	26
2.1 Особенности процесса обеспечения безопасной эксплуатации	26
2.2 Аварии на факельных установках	54
2.3 Изучение методов безопасной эксплуатации.....	69
3 Анализ и оценка эффективности внедрения метода обеспечения безопасной эксплуатации с использованием струйного затвора.....	97
3.1 Анализ факельной системы.....	97
3.2 Применение факельного оголовка со струйным затвором с целью повышения безопасной эксплуатации факельной системы	106
3.3 Анализ и оценка эффективности предлагаемых мероприятий по обеспечению техносферной безопасности в организации.....	113
Заключение	118
Список используемых источников.....	120
Приложение А Схема конструкции факельной установки со струйным оголовком	126
Приложение Б Форма акта проверки факельной системы со струйным оголовком в соответствии с графиком ТО.....	127

Введение

Актуальность обеспечения безопасной эксплуатации факельных установок обусловлена рядом причин. В первую очередь, это соблюдение экологических требований, поскольку сжигание попутных газов на факеле приводит к выбросам вредных веществ в атмосферу, что может негативно сказаться на состоянии окружающей среды и здоровье населения. В этом случае, уменьшение выбросов загрязняющих веществ может привести к снижению затрат на экологический контроль и штрафы. Во-вторых, обеспечение безопасности эксплуатации факельной установки является ключевым аспектом для предотвращения возможных аварий, которые могут привести к серьезным последствиям. Факельные системы используют на нефтяных месторождениях при аварийном сбросе давления, на химических и нефтеперерабатывающих заводах для устранения избыточных газов после реакций, и, они являются критически важными системами для промышленной безопасности, но их использование требует баланса между технической необходимостью и экологической ответственностью. Оптимизация работы факельной системы позволит сэкономить ресурсы, а также повысить безопасность и общую эффективность производственного процесса.

В этой связи, объектом исследования в данной работе является процесс обеспечения безопасной эксплуатации факельных установок.

Предметом исследования является процесс применения факельного оголовка со струйным затвором с целью повышения безопасной эксплуатации факельной системы.

Цель исследования: совершенствование безопасности при эксплуатации факельных установок путем применения оголовка со струйным затвором.

Гипотеза исследования состоит в том, что повышение безопасности при эксплуатации факельных установок будет достигнуто, если будет:

- проведен анализ теоретических основ обеспечения безопасности при эксплуатации факельных систем;
- проведен обзор методов предложен метод обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем с использованием струйного затвора;
- проведен анализ и оценка эффективности внедрения метода обеспечения безопасной эксплуатации с использованием струйного затвора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать теоретические основы обеспечения безопасности при эксплуатации факельных систем;
- провести обзор методов и предложить метод обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем с использованием струйного затвора;
- провести анализ и оценку эффективности внедрения метода обеспечения безопасной эксплуатации с использованием струйного затвора.

Теоретико-методологическую основу данного исследования представляют технические регламенты, нормативные акты РФ, патенты, научная литература, опыт эксплуатации факельных систем на отечественных и зарубежных предприятиях.

Базовыми для настоящего исследования явились также статистические данные аварийных ситуаций, связанных с эксплуатацией факельных установок.

В исследовании применены следующие методы научного исследования:

- теоретические – анализ, систематизация, классификация;
- практические – работы по определению и описанию объектов, эксперимент.

Опытно-экспериментальной базой исследования является АО «Сызранский НПЗ».

Научная новизна исследования заключается:

- в определении особенностей обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем;
- в разработке инженерного решения по применению факельного оголовка со струйным затвором и ее интеграция с системами автоматики.

Теоретическая значимость исследования заключается в применении метода обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем с использованием струйного затвора.

Практическая значимость исследования заключается в применении разработанных инженерных и организационных решениях по применению факельного оголовка с использованием струйного затвора, произведена его интеграция с датчиками и системой автоматики. Кроме того, разработан график ТО и форма акта проверки факельной системы со струйным оголовком в соответствии с графиком.

Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается:

- данными апробации и оценкой экономической эффективности применения факельного оголовка с использованием струйного затвора в АО «Сызранский НПЗ»;
- публикацией статьи «Исследование и разработка эффективных методов обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем» / А.В. Кудрявцев // Инновационное развитие: ключевые проблемы и направления их решения: сборник статей Международной научно-практической конференции (5 марта 2025 г., г. Уфа). - Уфа: Аэтерна, 2025. – С.23-27. Апробация и внедрение результатов работы велись в течение всего исследования.

Личное участие автора исследования заключается в определении особенностей обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем, в разработке инженерных и организационных решений по применению факельного оголовка с использованием струйного затвора.

На защиту выносятся:

- результаты анализа особенностей обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем;
- оценка методов по обеспечению безопасной эксплуатации факельных систем с использованием струйного затвора;
- результаты анализ и оценка эффективности внедрения метода обеспечения безопасной эксплуатации с использованием струйного затвора.

Структура магистерской диссертации работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, содержит 33 таблицы, 7 рисунков, 2 приложения, список используемых источников (43 источника). Основной текст работы изложен на 125 страницах.

Термины и определения

Внутреннее горение – процесс окисления топлива или горючих веществ, происходящий внутри замкнутой системы или устройства.

Оголовок – верхняя часть факельной системы, где происходит сжигание газов.

Сбросные горючие газы – побочные газообразные продукты промышленных процессов (например, нефтедобычи, нефтепереработки, химического производства), которые не могут быть повторно использованы или переработаны.

Системы IoT – системы взаимосвязанных вычислительных устройств, которые могут собирать и передавать данные по беспроводной сети без участия человека.

Струйный затвор – инженерный узел, предотвращающий обратную тягу и взрывы.

Технологический регламент – нормативный документ, регламентирующий все стадии производства, включая требования к оборудованию, персоналу и процессам.

Факельная головка – это горелка с форсунками, система сбора включает трубы и сепараторы для удаления жидкостей.

Факельная установка – эта установка, которая используется для утилизации газов или горючих паров.

SCADA-системы – программное обеспечение для удалённого контроля и анализа данных

Перечень сокращений и обозначений

IoT – Internet of Thing.

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition.

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом.

БАРКП – блок автоматического розжига и контроля пламени.

БВВ – блок высоковольтный.

БЗР – блок запорно-регулирующий.

ДГ – дежурные горелки.

ИИ – искусственный интеллект.

ИК – инфракрасный.

ЛОС – летучие органические соединения.

НПЗ – нефтеперерабатывающий завод.

ПБЭ – правила безопасной эксплуатации.

ПДК – предельно-допустимая концентрация.

ПНГ – попутный нефтяной газ.

САРКП – система автоматизации розжига и контроля пламени.

СКДМ – системы комплексного диагностического мониторинга.

СПГ – сжиженный природный газ.

ТА – тоководы.

ТР – технологический регламент.

УФ – ультрафиолет.

ФУ – факельные установки.

1 Теоретические основы обеспечения безопасности при эксплуатации факельных систем

1.1 Понятие факельных систем. Основы классификации и конструкция основных элементов системы

В процессе промышленной деятельности предприятий (добыча нефти и газа, нефтепереработка, химическое производство) образуются сбросные горючие газы, которые являются газообразными продуктами и не могут быть использованы в технологическом цикле. Их сжигание в факельных системах или утилизация требуются для минимизации экологических и технологических рисков.

Основной состав сбросных горючих газов: углеводороды (метан, пропан, бутан), попутный нефтяной газ (ПНГ), водород, сероводород ($H_2 S$), летучие органические соединения (ЛОС). Могут содержать примеси (сера, механические частицы).

Источниками сбросных горючих газов являются аварийные выбросы при перегрузке оборудования; технологические процессы, такие как, дегазация резервуаров, продувка трубопроводов, сбросы с установок крекинга; попутный газ при добыче нефти.

Факельные системы играют ключевую роль в безопасной утилизации горючих газов на нефтегазоперерабатывающих предприятиях. Классификация факельных систем по назначению (общие, отдельные, специальные) основана на их функциональной роли, масштабах применения и специфике обрабатываемых газов. Рассмотрим подробное описание каждой категории.

Общие (общезаводские) факельные системы предназначены для утилизации газов со всего предприятия или нескольких технологических установок их особенность заключается в том, что они объединяют потоки сбросных газов от разных источников (например, нефтеперерабатывающий

завод, химический комплекс) и рассчитаны на большие объёмы и переменный состав газов. Общие ФУ (факельные установки) включают в свою конструкцию системы сепарации для удаления жидкостей и твёрдых частиц. Такие системы применяют для сжигания газов от резервуаров хранения, трубопроводов, нескольких реакторов, а также для аварийных сбросов при общезаводских отказах.

Отдельные (локальные) факельные установки. Их предназначение заключается в обслуживании одной технологической установки или процесса. Особенность их применения в том, что данные ФУ узкоспециализированы под конкретный источник газа (например, крекинг-установка, компрессорная станция). Отличие от общезаводских в том, что они имеют меньшую мощность по сравнению с общезаводскими системами, а конструкция оптимизирована под стабильный состав газов. Такие системы применяют для сжигания газов от отдельного реактора в химическом производстве, а также при утилизации попутного нефтяного газа на локальной скважине.

Специальные факельные системы предназначены для работы с газами, требующими особых условий сжигания из-за их состава, токсичности или эксплуатационных требований. Оснащены дополнительными системами: дожигатели, скрубберы, фильтры для токсичных компонентов (например, сероводород. При их эксплуатации могут быть использованы технологии плазменного, каталитического или бездымного сжигания, часто работают в экстремальных условиях (высокие/низкие температуры, давление). Такие системы применяют для утилизации кислых газов (с высоким содержанием сероводорода на газоперерабатывающих заводах), при сжигании высокотоксичных газов в фармацевтической промышленности, а также в аварийных системах для ядерных объектов или космических стартовых комплексов.

В таблице 1 представлены ключевые различия в классификации факельных установок.

Таблица 1 – Ключевые различия в классификации факельных установок

Критерий	Общие системы	Отдельные системы	Специальные системы
Масштаб	Все предприятие (завод)	Одна установка	Уникальные условия
Состав газов	Смешанный, переменный	Стабильный	Токсичный, агрессивный
Сложность	Высокая (сепарация, контроль)	Средняя	Очень высокая (дополнительные технологии)
Пример	Нефтеперерабатывающий завод	Компрессорная станция	Газ с высоким содержанием сероводорода

Классификация факельных установок по рабочему давлению в источнике (давлению газа, поступающего в систему) зависит от требований к безопасности, конструкции и методам сжигания [9]. Обычно выделяют три основных категории (таблица 2).

Таблица 2 – Классификация факельных установок по рабочему давлению в источнике

Вид установки	Диапазон давления	Особенности	Примеры применения
Установки низкого давления	0–0.1 МПа (0–1 бар)	Газ поступает с минимальным напором, часто требует дополнительных компрессоров или эжекторов для подачи в факел. Простые конструкции с открытыми факельными головками. Используются системы стабилизации пламени (например, паровые или воздушные завесы).	Утилизация биогаза на очистных сооружениях. Сжигание ПНГ на малолетных скважинах.

Продолжение таблицы 2

Вид установки	Диапазон давления	Особенности	Примеры применения
Установки среднего давления	0.1–1 МПа (1–10 бар)	Наиболее распространённый тип, так как соответствует типовым промышленным процессам. Требуют сепарации жидкости и контроля состава газа. Используются многоствольные горелки для улучшения смешивания газа с воздухом.	НПЗ (сбросы с колонн, резервуаров). Химическое производство (остаточные газы после реакторов).
Установки высокого давления	1–10 МПа (10–100 бар)	Требуют усиленной конструкции (толстостенные трубопроводы, высокопрочные материалы). Оснащаются системами аварийного сброса давления (предохранительные клапаны, разрывные мембраны). Используются закрытые факелы с камерами дожигания для предотвращения взрывов.	Газоперерабатывающие заводы (сбросы при очистке газа от сероводорода). Нефтехимические комплексы (аварийные сбросы с высоконапорных реакторов).
Установки сверхвысокого давления	10 МПа (свыше 100 бар)	Редкие и специализированные системы, требующие уникальных инженерных решений. Используются многоуровневые системы безопасности, включая дублирующие клапаны и	Глубоководные нефтегазовые месторождения. Аварийные сбросы на заводах по производству СПГ

Продолжение таблицы 2

Вид установки	Диапазон давления	Особенности	Примеры применения
		автоматические блокировки. Часто интегрированы с системами рекуперации энергии (например, турбинами для генерации электричества).	

Рассмотрим классификацию факельных установок по области установки горелок.

Конструкция высотных (элеваторные) факельных установок монтируются на высоких мачтах, башнях или опорах, часто достигающих десятков метров в высоту. Часто оснащены одной горелкой на вершине конструкции [9]. Их преимущества заключаются в безопасном рассеивании тепла и продуктов сгорания в атмосфере, минимизируя воздействие на персонал и оборудование. К достоинствам также можно отнести эффективное снижение уровня радиационного тепла на земле. Высотные ФУ подходят для мест с ограниченной площадью или плотной застройкой. Чаще всего применяют при непрерывном или аварийном сжигании больших объёмов газов (например, на НПЗ, химических заводах). Особенность высотных ФУ заключается в том, что в процессе эксплуатации они могут использовать паровые или воздушные системы для подавления дыма.

Наземные (грунтовые) факельные установки. Располагаются на уровне земли или в углублениях (котлованах), иногда с защитными экранами или решётками. Допускается устанавливать их вблизи жилых зон из-за меньшей заметности. Представляют собой многоступенчатые системы с несколькими горелками для регулировки нагрузки, однако требуют дополнительных мер

безопасности (барьеры, системы охлаждения). В качестве достоинств можно отметить:

- снижение шума и визуального воздействия (пламя частично скрыто);
- лучший контроль выбросов благодаря закрытым камерам сгорания.
- энергоэффективность при сжигании малых или переменных объёмов газа.

Чаще всего применяют при периодическом сжигании газов, например, при техническом обслуживании или запуске оборудования. Критерии выбора типа установки по области установки горелок представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Критерии выбора типа установки по области установки горелок

Аспекты/ограничения	Критерии
Пространственные ограничения	Высотные – для компактных площадок, наземные – для территорий с достаточным пространством.
Экологические аспекты	Наземные чаще используются при строгих требованиях к шуму и видимости пламени.
Характеристики газа	Высотные подходят для опасных газов, наземные – для менее токсичных или малых объёмов.
Экономические аспекты	Высотные требуют больших затрат на строительство и обслуживание, наземные – на инфраструктуру (котлованы, экраны).

Данная классификация помогает оптимизировать безопасность, экологичность и эффективность работы факельных систем в различных промышленных условиях.

Сбросы на ФУ могут быть постоянными, периодическими и аварийными. Постоянные сбросы происходят непрерывно, а периодические через определённые интервалы времени. Аварийные сбросы возникают при возникновении нештатных ситуаций, таких как нарушение технологического процесса или неисправность оборудования [8]. На факельной установке могут сбрасываться различные газы и пары, такие как горючие, постоянные, периодические и аварийные. Эти газы направляются в факельные системы,

которые могут быть общими, отдельными или специальными. При проектировании и эксплуатации факельных систем важно учитывать состав и параметры сбрасываемых газов, такие как температура, давление, плотность, расход и продолжительность сброса. Также необходимо использовать продувочные газы, например, топливный или природный, инертные газы, получаемые на технологических установках. Устройство, обеспечивающее смешивание сбрасываемого газа с атмосферным воздухом и стабилизацию горения называется – факельный оголовок, он повышает безопасность и экологичность сжигания газа [9].

Принцип работы оголовка заключается в выходе сбросного газа под давлением, его смешивании с воздухом и поджигании полученной горючей смеси пламенем от пилотных горелок. По методу смешивания с воздухом, факельные установки классифицируют на два типа:

- тип Бунзена: в этом типе горючая смесь направляется в горелку заранее, и горение зависит от скорости химических реакций.
- тип диффузии: процесс смешивания происходит во фронте пламени, и эффективность горения зависит от скорости смешивания воздуха и горючего газа.

Факельные установки, которые используются на нефтегазодобывающих и перерабатывающих предприятиях для бездымного сжигания выбросов бывают двух типов: сухие и мокрые. Сухие факельные установки работают на основе принципа сжигания топлива в потоке горячих газов. Мокрые факельные установки используют воду для охлаждения и распыления выбросов, что снижает температуру и уменьшает образование оксидов азота.

Основные их характеристики включают рабочую среду (природный, нефтяной и другие горючие газы), производительность (от 61 тыс. м³ до 8 тыс. м³ в сутки), давление (низкое и высокое), температуру среды (от -30 °С до +300 °С), температуру горения (до 1200 °С) и высоту ствола (от 7 до 120 метров) [8].

Методы розжига дежурных горелок и факельных систем в целом, включают:

- электроискровой розжиг. Принцип работы заключается в использовании электрической искры для зажигания топлива;
- бегущий огонь. Принцип работы заключается в создании последовательности искр, которые распространяются вдоль горелки, зажигая топливо;
- дублирующий способ розжига. Принцип работы состоит в комбинации первых двух методов для повышения надёжности [22].

Современные системы обнаружения пламени в факельных установках используют различные технологии, обеспечивающие безопасность, надежность и соответствие экологическим нормам [8]. Проведем анализ характеристик основных типов сигнализаторов пламени ФУ (таблица 4).

Таблица 4 – Анализ характеристик основных типов сигнализаторов пламени

Тип сигнализатора	Принцип работы	Преимущества	Недостатки	Применение
Ультрафиолетовые (УФ) датчики	Регистрируют ультрафиолетовое излучение, характерное для пламени	Быстрое срабатывание (менее 1 секунды). Устойчивость к помехам от солнечного света или теплового излучения	Чувствительность к УФ-излучению от сварок, молний или разрядов. Снижение эффективности при сильном задымлении	Установки с открытым пламенем (высотные факелы)
Инфракрасные (ИК) датчики	Анализируют инфракрасное излучение пламени в определенном спектре	Эффективны в условиях дыма, тумана или пыли. Высокая точность при работе с углеводородными пламенами	Возможны ложные срабатывания от нагретых поверхностей или солнечного света	Различают односпектральные – анализ одной ИК-волны и многоспектральные – комбинация нескольких ИК-диапазонов для повышения надежности.

Продолжение таблицы 4

Тип сигнализатора	Принцип работы	Преимущества	Недостатки	Применение
Комбинированные УФ/ИК-датчики	Совмещают анализ УФ- и ИК-излучения, что минимизирует ложные срабатывания	Максимальная надежность в сложных условиях. Подходят для взрывоопасных зон	Высокая стоимость	Критические промышленные объекты (НПЗ, химические заводы)
Термоэлектрические датчики (термопары)	Фиксируют температуру пламени через тепловое излучение	Простота конструкции и низкая стоимость. Устойчивость к электромагнитным помехам	Медленное срабатывание (до нескольких секунд). Низкая точность при переменной интенсивности пламени	Критические промышленные объекты (НПЗ, химические заводы)
Видеодетекторы пламени (на основе ИИ и камер)	Анализируют визуальные характеристики пламени (форма, цвет, пульсация) с помощью камер и алгоритмов машинного обучения	Возможность мониторинга большой площади. Интеграция с системами видеонаблюдения	Зависимость от качества изображения (дождь, снег, туман). Высокие требования к вычислительным ресурсам	Крупные факельные установки с распределенными горелками
Акустические датчики	Фиксируют низкочастотные колебания, возникающие при горении	Работают в условиях нулевой видимости (дым, пар)	Ложные срабатывания от шума оборудования или ветра. Ограниченное применение в шумных промышленных зонах	Критические промышленные объекты (НПЗ, химические заводы)

Рассмотрим критерии выбора сигнализатора пламени для факельных систем (таблица 5).

Таблица 5 – Критерии выбора сигнализатора пламени для факельных систем

Аспекты/характеристики	Критерии
Тип пламени	Для углеводородных газов – ИК-датчики, для водорода – УФ
Условия среды	При задымлении – ИК или видеодетекторы; во взрывоопасных зонах – искробезопасные УФ/ИК-системы
Скорость реакции	Для аварийных систем – УФ или комбинированные датчики
Экономические аспекты	Термопары – для простых задач, видеодетекторы – для комплексного мониторинга

Сигнализаторы пламени являются ключевым элементом безопасности факельных систем, предотвращающий аварии и обеспечивающий экологическую безопасность. Выбор технологии зависит от специфики объекта и требований нормативов [8]. К современным трендам сигнализаторов можно отнести следующие:

- цифровизация. Интеграция датчиков с системами IoT для удаленного мониторинга и прогнозной аналитики;
- многоспектральные системы. Комбинация 3–4 диапазонов (УФ, ИК, видимый свет) для минимизации ошибок;
- беспроводные решения. Установка датчиков в труднодоступных зонах без прокладки кабелей.

Таким образом, можно сделать вывод, что факельные системы используют на нефтяных месторождениях при аварийном сбросе давления, на химических и нефтеперерабатывающих заводах для устранения избыточных газов после реакций, и, они являются критически важными системами для промышленной безопасности, но их использование требует баланса между технической необходимостью и экологической ответственностью. Это связано с тем, что сжигание в факелах неидеально, поскольку при неполном сгорании образуются токсичные вещества (СО, сажа, оксиды азота). СО₂, хотя и менее опасен, чем метан, всё же вносит негативный вклад в изменение климата. Отметим, что современные

тенденции таковы, что вместо сжигания всё чаще применяют технологии улавливания и повторного использования газов (например, для генерации энергии). Это снижает экологический ущерб и соответствует глобальным инициативам по сокращению «факельного сжигания» (например, программа Всемирного банка GGFR «Полное прекращение регулярного факельного сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) к 2030 году»).

1.2 Обзор научных исследований в области факельных систем

История развития факельных систем началась в начале XX века. Конструкции развивались постепенно, и нет одного изобретателя. Вклад в создание и развитие данных конструкций принимали множество компаний и инженеров, например, «John Zink Company», основанная в 1929 году, известная разработкой факельных систем. Их основатель, Джон Зинк, сыграл роль в стандартизации конструкций. Современные факельные установки – это результат работы многих инженеров и компаний, это коллективное достижение [36].

Первые примитивные факелы использовались для сжигания попутных газов при добыче нефти. Это были простые трубы, направленные вертикально вверх, где газ горел открытым пламенем. С развитием нефтепереработки (особенно после открытия месторождений в России и США) возникла необходимость безопасного удаления избыточных газов, что стимулировало создание более сложных систем.

Первые факелы представляли собой отрезки трубопроводов, а для их зажигания использовали зажжённые промасленные тряпки. Затем стали применять тросы и лебёдки для поднятия горячей тряпки к верхнему срезу факельной трубы.

Главной функцией факела в 20-х годах был сброс лишнего газа и разгрузка давления в установках. Конструкция факелов в то время представляла собой простые отрезки труб с примитивными запальными

системами. Запальные системы представляли собой промасленные тряпки, которые в самом начале бросали зажженными кверху дымовой трубы. Выполнение этой функции выполнял специально обученный работник – запальник. Данное рабочее место характеризовалось большим количеством несчастных случаев и инцидентов, в том числе, с летальным исходом [2].

Факела того времени отличались крайней неэффективностью и высоким процентом дымности, а главными проблемами для конструкций факельных систем являлись – шум, запах, недопустимая яркость, тепловое излучение.

Компания «John Zink Company» сыграла ключевую роль в разработке современных факельных систем. Ее основатель, Джон Зинк, инженер-нефтяник, запатентовал технологии, улучшающие эффективность и безопасность сжигания газов. В этот период появились первые специализированные горелки, системы подачи пара для снижения дымообразования и методы рассеивания тепла.

В 40-х годах были разработаны основные элементы факельных систем такие как дежурные горелки, запальные устройства и различные пароинжекционные наконечники, которые позволяли повысить эффективность горения и безопасность установок и снизить дымность.

В 70-х годах появились бездымные факельные оголовки и другие усовершенствования. Кроме того, в 70-е годы были приняты законодательные акты в области защиты окружающей среды, что повлекло за собой разработку более безопасных для экологии новых деталей и узлов факельных установок.

С ростом экологических норм факельные установки стали оснащаться системами контроля выбросов, многоступенчатыми горелками и датчиками пламени. Несколько компаний, например, Zeeco, GEA и Siemens внесли вклад в создание закрытых (наземных) факелов, технологий утилизации тепла и подавления шума.

В 80–90-х годах были разработаны инженерные решения для увеличения надёжности работы факельных систем и контроля наличия пламени. Инженерные того времени были направлены на решение таких проблем, которые снижают надёжность факелов: коррозия, термические напряжения, засорение горелок, нестабильность пламени, воздействие окружающей среды. Также проводятся исследования по использованию жаропрочных сплавов, термозащитных покрытий, систем мониторинга в реальном времени, улучшенные системы подачи пара или воздуха для стабилизации пламени [2].

Кроме того, начинается применение дистанционного мониторинга, предиктивной аналитики для предупреждения поломок, и, продолжаются модернизации и инновации в конструкции, таких как модульные горелки, которые легко заменять без остановки работы. В настоящее время, факельные системы продолжают развиваться, чтобы уменьшить вредные выбросы в атмосферу и повысить экологическую безопасность. Во всем мире существуют компании, которые специализируются на разработке и проектировании деталей, устройств, узлов ФУ (таблица 6).

Таблица 6 – Компании, которые специализируются на разработке и проектировании деталей, устройств, узлов ФУ

Компания	Специализация	Технологии	Примечание
John Zink Company (США, входит в Koch Industries) [36]	Разработка факельных систем для нефтегазовой и химической промышленности (по данным статистики является лидером в отрасли)	Высотные и наземные факелы с системами подавления дыма (паровые/воздушные инжекторы). Технология MagnaFlare® для минимизации шума и выбросов. Системы утилизации тепла (теплообменники).	Участие в строительстве факелов для крупных НПЗ (ExxonMobil, Shell, Saudi Aramco).
Zeeco (США) [42]	Инновационные решения для сжигания газов, включая беспламенные технологии.	Free-Jet – высокоэффективные элеваторные факелы. Enclosed Ground Flare (EGF) – закрытые наземные системы с	Акцент на снижение углеродного следа и соответствие стандартам EPA. Стандарты EPA

Продолжение таблицы 6

Компания	Специализация	Технологии	Примечание
		керамическими горелками. Гибридные системы для работы с кислыми газами (H ₂ S).	(Environmental Protection Agency) – это экологические стандарты, разработанные Агентством по охране окружающей среды США (EPA). Они устанавливают требования к продукции и процессам, которые должны соответствовать определённым критериям по защите окружающей среды.
AEREON (Нидерланды/США) [30]	Факелы для нефтехимических комплексов и СПГ-терминалов.	SonicFlare – системы с сверхзвуковым сжиганием для минимизации дыма. Модульные установки для арктических условий.	Клиенты: Chevron, BP, TotalEnergies.
CRA (Канада) [33]	Экологичные решения для утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ).	CleanBurn+ - факелы с каталитическим дожигом для снижения выбросов CO и NOx. Мобильные установки для временного сжигания на месторождениях.	Сертификация по стандарту World Bank Zero Routine Flaring.
GEA Group (Германия) [35]	Термическая обработка газов и интеграция факелов с системами энергоэффективности.	Рекуперация тепла для генерации пара или электроэнергии.	Факелы для биогазовых и химических производств.
Siemens Energy (Германия) [40]	Цифровые системы управления и автоматизация факельных установок	SIMATIC PCS 7 – платформа для контроля пламени, давления и состава газов.	Интеграция с датчиками IoT для прогнозной аналитики.
Kaldair (Великобритания)	Малые и средние факельные системы	FlexiFlare — модульные	Системы с низким уровнем шума для

Продолжение таблицы 6

Компания	Специализация	Технологии	Примечание
[37]	для биохимических заводов и ВИЭ.	установки для сжигания биогаза.	урбанизированных территорий.
WSP (Канада/США) [41]	Инжиниринг ФУ «под ключ», включая экологическую оценку и проектирование.	Снижение сжигания ПНГ в рамках инициативы OGMP 2.0 (ООН).	Факелы для проектов снижения сжигания ПНГ в рамках инициативы OGMP 2.0 (ООН).
China Petroleum Technology & Development Corporation (Китай) [32]	Локализованные решения для азиатского рынка.	Факелы для морских платформ и шельфовых месторождений.	Системы, адаптированные под высокое содержание серы.
Petrojet (Египет) [38]	Факельные установки для Ближнего Востока и Африки.	Строительство факелов для газоперерабатывающих заводов.	Системы, адаптированные под высокое содержание серы.
Компания SAG (Россия, Нижегородская область, Нижний Новгород) [39]	Контрольно-измерительные приборы ФУ	Адаптированы под стандарты России и стран ближнего зарубежья.	Лидирующий производитель и поставщик промышленного электрооборудования и систем управления энергией в России.
ТПП «Нефтеавтоматика» (Россия, Республика Башкортостан, Уфа) [25]	Проектирование, изготовление и монтаж оборудования для нефтегазовой промышленности, а также создание систем измерений и АСУТП.	Бездымность работы факельных установок. Полная автоматизация процесса запуска и работы факельной установки без участия оператора. Универсальность дежурной горелки, возможность ее работы на любом составе и параметрах сбросного газа, используя его как топливный, в том числе, при большом содержании инертных (до 80% Азота). Обеспечена стабильность работы дежурной горелки без потухания пламени при боковом ветре до 25 м./сек.	Предоставление специальной инструкции по монтажу и подключению системы розжига факельной установки, с подробными фото и пояснениями по каждому этапу, с целью экономии средств Заказчика на ШМР и ПНР.

Продолжение таблицы 6

Компания	Специализация	Технологии	Примечание
РНГ-Инжиниринг (Республика Башкортостан, Стерлитамак) [19]	Проектирование, разработка, изготовление и поставка высокоэффективного современного блочного оборудования для нефтегазодобывающих, нефтегазоперерабатывающих и нефтехимических предприятий.	Использование передовых инженерных технологий и продукций, соответствующих современным критериям, технологий безопасности, качества, энергосбережения и экологии.	Поддерживает деловые связи со многими научно-исследовательскими и проектными институтами.
Нефтемаш-Уфа» (Республика Башкортостан, Уфа) [10]	Проектирование, изготовление, поставка технологического оборудования, строительномонтажные и пусконаладочные работы	Продукция изготавливается на основании типовых конструкторских решений, а также полностью уникальных, основанных на технических заданиях заказчика.	Осуществляет взаимодействие и партнерскую деятельность с крупнейшими научно-исследовательскими и проектными институтами РФ, заводами, и другой инжиниринговой деятельности.

Выводы: факельные системы играют ключевую роль в нефтегазовой и химической промышленности, обеспечивая безопасное сжигание избыточных или аварийных газовых выбросов. Теоретическое обоснование их безопасности базируется на междисциплинарном подходе, объединяющем физико-химические принципы, инженерные решения, нормативные требования и экологические аспекты. Факельные системы используют на нефтяных месторождениях при аварийном сбросе давления, на химических и нефтеперерабатывающих заводах для устранения избыточных газов после реакций, и, они являются критически важными системами для промышленной безопасности, но их использование требует баланса между технической необходимостью и экологической ответственностью. Конструкция факельных установок не имеет единого изобретателя, – это

результат эволюции технологий, связанной с развитием нефтяной, химической и газовой промышленности. Высота факельной установки определяется на основе моделирования теплового излучения и газодинамических расчетов для минимизации воздействия на персонал и инфраструктуру. Материалы конструкции должны быть устойчивы к высоким температурам, коррозии и термоударам (например, жаропрочные стали с керамическим покрытием).

Для обеспечения безопасности необходимо совершенствование системы автоматизация и контроля:

- системы мониторинга в реальном времени (датчики давления, температуры, состава газа) и автоматические отсекатели предотвращают переполнение факела или утечки;
- использование резервных систем зажигания (пилотные горелки, электроискровые устройства) гарантирует бесперебойное сжигание.

Современные тенденции таковы, что вместо сжигания всё чаще применяют технологии улавливания и повторного использования газов (например, для генерации энергии).

Таким образом, теоретические основы безопасности факельных систем интегрируют знания из термодинамики, химии, экологии и инженерии. Их практическая реализация требует строгого соблюдения нормативов, внедрения многоуровневых систем защиты и постоянного совершенствования технологий. Только комплексный подход обеспечивает минимизацию рисков для людей, оборудования и окружающей среды, соответствуя принципам устойчивого развития и промышленной безопасности.

2 Методы обеспечения безопасной эксплуатации

2.1 Особенности процесса обеспечения безопасной эксплуатации

Факельные системы различаются по конструкции, адаптируясь к требованиям безопасности, экологическим нормам и специфике технологических процессов. В таблице 7 приведем основные типы, применяемые в промышленности.

Таблица 7 – Основные типы ФУ, применяемые в промышленности

Тип ФУ	Конструкция	Применение	Особенности
Открытые факелы (Open Flare)	Вертикальная труба с открытой горелкой, где газ сжигается в атмосфере.	Нефтегазовая отрасль (аварийные сбросы на месторождениях). Химические заводы (сжигание неопасных газов).	Простота и низкая стоимость. Высокие выбросы CO ₂ , NO _x , шум и видимое пламя.
Закрытые (камерные) факелы (Enclosed Flare)	Горелка размещена внутри изолированной камеры с системой дожигания и подачи воздуха/пара	Переработка токсичных газов (например, содержащих H ₂ S). Утилизация летучих органических соединений (ЛОС) на НПЗ.	Снижение шума и видимости пламени. Высокая эффективность сжигания (>98%).
Высотные факелы (Elevated Flare)	Вертикальная труба высотой 30–100 м, поднятая над землей для рассеивания тепла и газов.	Крупные нефтехимические комплексы. Морские платформы (с защитой от ветра и волн).	Минимизация теплового воздействия на грунт. Требуется сложный монтаж и обслуживание.
Наземные (горизонтальные) факелы (Ground Flare)	Горизонтальные горелки, размещенные на уровне земли или в котловане.	Сжигание больших объемов газа (например, при аварийных остановках). Биогазовые установки.	Компактность и возможность скрытого монтажа. Риск теплового повреждения почвы.
Факелы с паровым/воздушным инжектированием (Steam/Assisted)	Система подачи пара или воздуха для смешивания с газом, что	Нефтеперерабатывающие заводы (сжигание тяжелых углеводородов). Установки с высокими	

Продолжение таблицы 7

Тип ФУ	Конструкция	Применение	Особенности
Flare)	обеспечивает полное сгорание и подавление дыма.	экологическими требованиями.	Дымление снижено на 90–95%. Высокое потребление пара/энергии.
Мобильные факельные установки	Переносные или передвижные системы на шасси или платформе.	Аварийные ситуации на трубопроводах. Разведка и добыча в удаленных районах.	Быстрое развертывание. Ограниченная производительность.

Существуют также специализированные факелы. Кислородные факелы для сжигания газов с высоким содержанием O_2 используются в металлургии для химического синтеза. Эти установки оснащены системами защиты от обратной вспышки. Биокаталитические факелы используют катализаторы для окисления газов при низких температурах. Их применяют в пищевой промышленности и очистных сооружениях. Плазменные факелы используют для уничтожения токсичных газов (например, фреонов) с помощью плазмы. Используются в электронной и фармацевтической отраслях.

В нефтегазовой промышленности часто используют высотные и паровые факелы для сжигания ПНГ и аварийных сбросов. На химических и нефтехимических предприятиях используют закрытые камерные системы для токсичных газов. В металлургии преобладают кислородные факелы для утилизации доменного газа. В энергетике в эксплуатации используют газотурбинные установки с рекуперацией тепла от факелов. Конструктивное разнообразие факельных установок позволяет адаптировать их под любые промышленные задачи – от аварийного сжигания до экологичной утилизации. Современные разработки делают упор на снижение выбросов, энергоэффективность и интеграцию с «зелеными» технологиями.

Модернизация факельных систем направлена на повышение их эффективности, безопасности и экологичности, а также на соответствие

актуальным нормативным требованиям. Ключевые задачи включают несколько аспектов.

Аспект снижения экологической нагрузки предусматривает минимизацию выбросов посредством использования технологий дожигания (каталитические системы, плазменные горелки) для снижения выбросов CO_2 , NO_x , SO_x и сажи. Устранение дымления возможно через оптимизацию подачи пара/воздуха. Утилизация тепла подразумевается через интеграцию систем рекуперации (генерация пара, электроэнергии) для использования тепловой энергии факела. Сокращение объёмов сжигания можно достичь разработкой и внедрением систем улавливания и возврата газов в производство (VRU, компрессоры).

Следующим аспектом является повышение безопасности. Безопасность можно достичь, заменив устаревшие струйные затворы на современные (например, с азотной завесой), что позволит предотвратить обратную тягу и взрывы. Безопасность можно также обеспечить посредством установки системы автоматического отключения (ESD) и датчиков контроля кислорода. Защиту от внешних факторов обеспечит модернизация ветрозащитных экранов и термоизоляции, а также внедрение молниезащиты и искробезопасного оборудования.

Еще один аспект модернизации – улучшение технологической эффективности. Улучшить технологическую эффективность можно оптимизировать горение посредством замены форсунок на энергоэффективные модели, автоматической регулировкой соотношения газ/пар/воздух. Расширение функциональности позволит расширить возможность работы с газами разного состава (кислые, высокосернистые, биогаз). Технологическую эффективность ФУ можно повысить также с помощью интеграции с цифровыми системами управления (SCADA, IoT).

Модернизация факельных установок решает комплекс задач, от экологии до цифровизации. Она позволяет предприятиям сократить

углеродный след, избежать штрафов, снизить риски аварий и повысить рентабельность за счет утилизации ресурсов.

Рассмотрим влияние технологического регламента на безопасность эксплуатации факельных установок.

Технологический регламент на производство продукции химических, нефтехимических и нефтегазоперерабатывающих производств является нормативным документом, регламентирующим все стадии производства, включая требования к оборудованию, персоналу и процессам. Его соблюдение напрямую влияет на безопасность факельных систем, обеспечивая их корректное проектирование, эксплуатацию и контроль.

Регламент устанавливает требования к проектированию и монтажу ФУ. К конструктивным параметрам ТР определяет допустимые материалы, диаметры труб, высоту факела, тип горелок и защитных барьеров (струйных затворов), чтобы исключить риски коррозии, перегрева или обратной тяги. Расчетные нормы в ТР указывают предельные значения давления, температуры и скорости потока газа, которые должны соблюдаться для предотвращения аварий.

Регламентация режимов эксплуатации определяет:

- допустимые параметры работы: ТР фиксирует диапазоны давления, состава газа и объемов сжигания, при которых факельная система считается безопасной;
- запреты на отклонения: например, запрещает сжигание газов с концентрацией кислорода выше 5% без дополнительных мер защиты.

Требования к системам контроля и автоматики ТР определяет обязательный мониторинг: в ТР прописаны параметры, которые необходимо отслеживать в реальном времени: уровень O_2 , давление, температура, наличие пламени, указывает условия для срабатывания систем ESD (аварийного отключения), например, при превышении давления или обнаружении утечки.

ТР также устанавливает периодичность осмотров, гидравлических испытаний, замены уплотнений и других критических компонентов, описывает процедуры ремонта, порядок остановки системы, продувки азотом, блокировки клапанов для безопасного проведения работ. ТР задает предельные концентрации CO_2 , NO_x , SO_x и сажи, что требует внедрения дожигающих систем или паровых инжекторов, регламентирует установку огнезащитных экранов, молниеотводов и систем пожаротушения вокруг факела.

Технический регламент определяет для факелов с H_2S обязательную установку датчиков сероводорода и аварийной вентиляции. При сжигании ПНГ – эффективность сжигания не менее 98%. Для морских платформ предусматривает защиту факела от обледенения и штормовых нагрузок.

Применение продувочного газа и сепараторных установок в факельных системах играют ключевую роль в обеспечении безопасности, стабильности работы и экологичности факельных систем. Рассмотрим их назначение, принципы работы и особенности применения.

Продувочный газ в факельных системах предназначен для предотвращения обратной тяги и взрывоопасных смесей, что исключает проникновение воздуха в систему, это особенно важно при остановке факела или снижении давления. Продувочный газ используется для защиты оборудования от коррозии посредством вытеснения агрессивных газов (например, сероводорода) инертным продувочным газом.

Типы продувочного газа:

- азот (N_2) наиболее распространен из-за химической инертности и доступности;
- природный газ используется при отсутствии азота, но требует контроля концентрации кислорода;
- сухой воздух используется в редких случаях, когда допустимо присутствие кислорода.

Способы применения:

- непрерывная продувка поддерживает положительное давление в системе для блокировки обратного потока воздуха (например, подача азота в струйный затвор);
- периодическая продувка осуществляется при остановке/запуске факела для удаления остаточных газов (например, продувка трубопроводов перед ремонтом).

Нормативные требования: концентрация кислорода в системе не должна превышать 2-5% (зависит от типа газа), расход продувочного газа рассчитывается исходя из объема системы и требуемой скорости потока.

Сепараторные установки в факельных системах предназначены для отделения жидкости от газа: нефть, конденсат или вода, попавшие в газовый поток, могут вызвать нестабильное горение, дымление и повреждение горелок. Сепараторные установки в ФУ также служат защитой оборудования посредством предотвращения гидроударов и коррозии трубопроводов.

Существуют следующие типы сепараторов:

- гравитационные сепараторы применяются для крупных капель жидкости в низкоскоростных потоках;
- центробежные сепараторы (циклоны) применяются для высокоскоростных потоков с мелкими каплями;
- коалесцентные сепараторы применяются для тонкой очистки газа перед сжиганием.

Сепараторы оснащаются предохранительными клапанами на случай переполнения. Продувочные линии имеют обратные клапаны для предотвращения обратного потока. Типовая схема работы: газ из процесса – сепаратор (удаление жидкости) – продувочный газ (азотная подушка) – факельная горелка.

Продувочный газ и сепараторы являются обязательными компонентами современных факельных систем. Они обеспечивают: безопасность (предотвращение взрывов, коррозии); стабильность горения (чистый газ без жидкости); соответствие экологическим стандартам (снижение выбросов);

оптимальный выбор технологий зависит от состава газа, производительности и условий эксплуатации.

Факельные системы различаются конструкцией, назначением и условиями эксплуатации. Каждый тип имеет уникальные характеристики, которые определяют его применение в различных отраслях промышленности. Сравнительная таблица особенностей ФУ представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Сравнительная таблица особенностей ФУ

Тип	Эффективность	Экологичность	Стоимость	Сложность обслуживания
Открытые	Низкая	Низкая	Низкая	Простое
Закрытые	Высокая	Высокая	Высокая	Сложное
Высотные	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя
Плазменные	Очень высокая	Очень высокая	Очень высокая	Очень сложная

Рассмотрим сущность и составные элементы факельных установок, с точки зрения промышленной и экологической безопасности, которые следует дополнительно подвергнуть разнообразным инновационным модификационным усовершенствованиям, или альтернативным замещениям по применению более прогрессивных технических решений, позволяющих улучшить безопасные и экологические показатели рассматриваемого объекта разработки в целом. Факельная установка предназначена для утилизации горючих паров или газов, также используется для сброса и последующего сжигания углеводородов, получаемых при нарушении технологического режима. Нарушения могут быть обусловлены отказами электроснабжения, неисправностью оборудования или возникновением пожара.

ФУ применяются в следующих отраслях: нефтегазодобывающей, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, химической и других отраслях промышленности. Разновидность факельных установок:

- общезаводские, в которых сжигают близкие по составу газовые выбросы (например, углеводороды) с различных производств предприятия;
- специальные (в составе отдельных технологических установок или производств).

В технологическом процессе участвуют факельные установки закрытого и открытого типа.

Открытая факельная система подразумевает прямолинейный проход газа через факельный ствол, установленный вертикально и имеющий высоту не менее 4 метров [9].

Закрытые факельные системы (называемые также наземными факелами, факелами для густонаселённых районов или «факелами термического окисления») изготавливаются мобильными (на трейлерах), на треногах, горизонтальными и редко - высотными. Закрытые факельные установки получили еще одно название: «наземные» [8].

В связи с тем, что предприятия нефтехимической отрасли, как правило, расположены вблизи населённых пунктов или непосредственно в населённых пунктах, то чаще всего в технологическом процессе применяются закрытые факелы.

Преимущества закрытых факельных систем:

- отсутствие дыма, пара, видимого пламени, запаха;
- низкий уровень шума;
- небольшие и контролируемые выбросы;
- отсутствие теплового шлейфа;
- простая система управления с легким доступом ко всем управляющим органам;
- удобство обслуживания всех узлов с земли (например, дежурные горелки могут быть сняты без остановки всей системы);
- отсутствие теплового излучения (нет необходимости сооружать специальный тепловой экран);

- безопасное и надежное уничтожение любых жидких и газообразных отходов.

Тип и конструкция ФУ выбираются проектной организацией в зависимости от условий ее эксплуатации, организации сбросов, свойств и состава сбрасываемых газов и обосновываются в проектной документации.

Эксплуатация факельных установок осуществляется:

- в соответствии с инструкциями по безопасной эксплуатации факельных установок и их техническому обслуживанию, утвержденными на предприятии в установленном порядке;
- производственным персоналом требуемой квалификации, аттестованным или прошедшим проверку знаний по вопросам промышленной безопасности;
- при наличии плана локализации и ликвидации аварий на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах, в котором предусматриваются действия персонала по локализации, ликвидации и предупреждению аварий, а в случае их возникновения – по локализации и максимальному снижению тяжести последствий.

При необходимости внесения дополнений в инструкции, а также в случае изменений в схеме или режиме работы факельных систем инструкции рекомендуется пересмотреть до истечения срока их действия.

Работа факельной установки может представлять определенную опасность для экологии, поскольку она является источником выбросов вредных веществ в атмосферу. К основным экологическим рискам можно отнести:

- выбросы загрязняющих веществ (факельные установки используются для сжигания различных газов и жидкостей, что приводит к выбросам в атмосферу вредных веществ, таких как диоксид углерода, оксиды азота и серы, углеводороды и твердые частицы; эти выбросы могут негативно сказаться на качестве

воздуха и привести к образованию парниковых газов, что, в свою очередь, может способствовать глобальному потеплению и изменению климата);

- шум (факельная установка может создавать шум, который может негативно сказаться на здоровье людей и животных, а также на экосистеме в целом);
- угроза для биоразнообразия (выбросы от факела могут содержать токсичные вещества, которые могут нанести вред растениям, животным и микроорганизмам) [2].

При организации сбросов из факельной установки в атмосферу руководствуются типовыми расчетами концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, и санитарными нормами.

С точки зрения промышленной безопасности, эксплуатация факельных установок также является источником рисков:

- пожароопасность (факелы представляют собой источник открытого огня, что повышает риск возникновения пожаров; в случае утечки или неправильной эксплуатации факельной системы это может привести к серьезным последствиям, включая пожары на больших территориях);
- возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с авариями и инцидентами при эксплуатации, обслуживанием и ремонтом факельных установок.

При эксплуатации факельных установок промышленной следует соблюдать следующие требования:

- проектирование и строительство факельных установок в соответствии с действующими нормами и правилами промышленной безопасности;

- обеспечение надежной и безопасной эксплуатации оборудования, включая контроль за состоянием трубопроводов, арматуры, горелок и других элементов установки;
- регулярное проведение технического обслуживания и ремонта факельных установок для предотвращения аварийных ситуаций;
- разработка и внедрение систем контроля и мониторинга за работой факельных установок, позволяющих оперативно реагировать на возможные аварийные ситуации;
- обучение и аттестация персонала, работающего с факельными системами, с учетом специфики их работы и возможных рисков;
- проведение периодических проверок и инспекций факельных установок с целью выявления возможных нарушений и принятия мер по их устранению;
- соблюдение требований экологической безопасности при эксплуатации факельных установок и контроль за выбросами вредных веществ в окружающую среду.

Современные методы обеспечения промышленной и экологической безопасности при эксплуатации факельных систем представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Современные методы обеспечения промышленной и экологической безопасности при эксплуатации факельных систем

Наименование метода	Аспект промышленной безопасности	Аспект экологической безопасности
Метод дистанционного автоматизированного розжига	Повышение надежности розжига рабочего факела и обеспечение оперативного его восстановления в случае погасания в период пробной эксплуатации, освоения и аварийных ситуаций на промышленных объектах и удаленных промысловых участках	Автоматическая система контроля выбросов в атмосферу
Метод «бездымного факела» закрытого типа	В системах автоматизации закрытых факельных систем применены самые современные технические решения и	Закрытые факела имеют лучший показатель в мире по сокращению выбросов диоксида серы (SO ₂),

Продолжение таблицы 9

Наименование метода	Аспект промышленной безопасности	Аспект экологической безопасности
	разработки. Сочетание автоматических функций обеспечения безопасности, охваченных схемами взаимоблокировки, обеспечивает надежную и безопасную работу горелок. Температура поверхности не превышает 60 градусов по Цельсию, а значит, позволяет сотрудникам безопасно проводить работы в условиях плотной компоновки комплекса.	окислов азота (NO _x) и других веществ, эффективность удаления продуктов сгорания газообразных и жидких сдувок для факельных систем термического окисления превышает 99,9%. Системы закрытого типа имеют более низкий уровень шума, не выделяют никакого запаха и полностью исключают горение открытого пламени в воздухе.
Метод сепарации	Для соблюдения требований безопасности обязательна установка факельного сепаратора, который должен обеспечивать не только сбор аварийных сбросов технологических, в том числе жидких сред, но и отделение и удержание капельной жидкости, содержащейся в газе.	Повышение эффективности очистки факельного газа от капельной жидкости, при обеспечении безопасной эксплуатации факельной системы, выражающейся в обеспечении приема, удержания и отвода залповых аварийных сбросов жидких сред, что способствует: сокращению потерь углеводородов при сжигании газа на факеле; снижению дымности горения пламени факела; уменьшению углеродного следа в рамках декарбонизации производства; сокращению вредных выбросов от продуктов сгорания.

Метод дистанционного автоматизированного розжига используют такие предприятия, как: ПАО «Татнефть», НГДУ «Киенгоп» ОАО «Удмуртнефть». Метод эффективен с точки зрения безопасности для обслуживающего персонала. Анализ мероприятий по обеспечению необходимого уровня безопасности выявил, что важно для дистанционного поджига использовать оборудование, которое позволяет зажигать факел с высокой степенью надежности, если он погас на безопасном для оператора

расстоянии. Дистанционный розжиг предполагает автоматическое управление: регулируемый временной интервал горения запальника, розжиг запальника факела при превышении давления в емкости, блокировка запальника при понижении давления в емкости, выключение запальника при появлении пламени, контроль и управление дежурной горелкой, дистанционное управление и контроль горения факела из операторной, систему световой и звуковой сигнализации [2].

СИБУР использует метод бездымного факела. Закрытые факела имеют лучший показатель в мире по сокращению выбросов диоксида серы (SO_2), окислов азота (NO_x) и других веществ, эффективность удаления продуктов сгорания газообразных и жидких сдувок для факельных систем термического окисления превышает 99,9%. Системы закрытого типа имеют более низкий уровень шума, не выделяют никакого запаха и полностью исключают горение открытого пламени в воздухе. Закрытый факел является безопасной конструкцией с долгим сроком эксплуатации, удобен для обслуживания и эксплуатации. Температура поверхности не превышает 60 градусов по Цельсию, а значит, позволяет сотрудникам безопасно проводить работы в условиях плотной компоновки комплекса [10].

Использование метода сепарации предполагает наличие устройства факельного сепаратора. Устройство обеспечивает повышение эффективности очистки факельного газа от капельной жидкости при обеспечении безопасной эксплуатации факельной системы. Таким образом, в разделе обозначены ведущие современные методы обеспечения промышленной и экологической безопасности эксплуатации факельных установок.

Проанализируем метод дистанционного розжига. Системы дистанционного зажигания факела предназначены для обеспечения зажигания сбросных газов факела на предприятиях нефтеперерабатывающей, химической и нефтехимической, газовой и других отраслей промышленности, имеющих факельные установки. Зажигание сбросных газов факела обеспечивается за счет постоянного горения дежурных горелок,

входящих в комплект поставки систем зажигания газов факела, установленных на факельных оголовках. Дежурные горелки: выполнены из жаропрочной стали для предотвращения разрушительного действия сильного перегрева, имеют устройства ветрозащиты и термоэлектрические преобразователи для контроля наличия пламени дежурных горелок.

Патентный поиск дистанционных автоматизированных систем розжига показал, что существующие изобретения, направлены на снижение объема непроизводительного использования топливного газа при термической утилизации аварийных, периодических и постоянных сбросов токсичных продуктов производства и обеспечения безопасных условий добычи и переработки углеводородов путем сокращения потребляемой мощности и времени процесса розжига газовых горелок факельных установок. Подобные устройства подробно описаны в работах Климова Е.В., Рыжакова Н.Ю., Головач В.В., Хайруллина И.А., Абдуллиной Е.З. [26].

Предложения автоматизированных систем розжига, направленных на обеспечение промышленной и экологической безопасности, предлагают компании по проектированию и изготовлению факельных систем, такие как: «Нефтегазстром», «Промышленные эко-системы НПП», «ТПП Нефтеавтоматика» [25].

Система автоматизации розжига и контроля пламени, предназначена для розжига дежурных горелок факельных установок в ручном и автоматическом режиме, контроля наличия пламени дежурных горелок и изготавливается в соответствии с Техническими условиями ТУ 28.99.39-002-67421254-2020.

Работа автоматических дистанционных систем розжига факельных установок основывается на физических свойствах горения газозвушной смеси и регламентируется требованиями нормативной документации:

- «Приказ Ростехнадзора от 22.12.2021 № 450 «Об утверждении Руководства по безопасности факельных систем» [17];

- ГОСТ Р 53681-2009 «Нефтяная и газовая промышленность. Детали факельных устройств для общих работ на нефтеперерабатывающих предприятиях. Общие технические требования» [1];
- ANSI/API STANDARD 537 «Flare Details for Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries» [34].

Схематично система автоматизации розжига и контроля пламени представлена на рисунке 1.

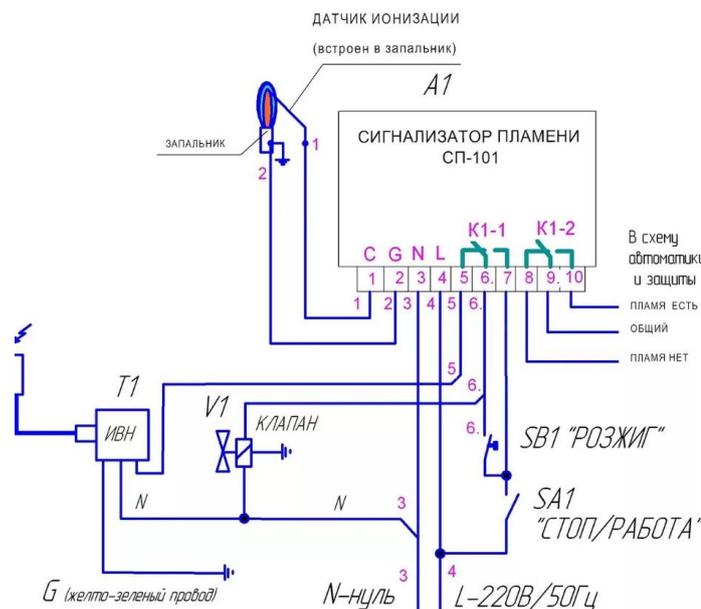


Рисунок 1 – Схема системы автоматизации розжига и контроля пламени факельной установки [26]

Система автоматизации розжига и контроля пламени (САРКП) должна:

- обеспечивать розжиг дежурных горелок в автоматическом и ручном режимах;
- обеспечивать постоянное и стабильное горение всех дежурных горелок;
- обеспечивать необходимое давление топливного газа, поступающего на дежурные горелки;
- определять наличие пламени в дежурных горелках;

- выдавать световые сигналы наличия пламени и давления топливного газа;
- выдавать сигналы наличия пламени и аварийные сигналы в систему автоматического управления верхнего уровня.

САРКП выдает сигнал «Отсутствия топливного газа в системе» в случае, погасания всех дежурных горелок. При потере пламени в одной из дежурных горелок САРКП должна выполнить розжиг данной горелки в автоматическом режиме [22].

Система автоматизации розжига и контроля пламени факельной установки САРКП с обратной связью по давлению топливного газа и контролю пламени факельной установки, с программируемой циклограммой автоматического пуска факельной установки без участия оператора, выполняют неограниченную многократность запуска при непрерывном режиме контроля пламени с выводом информации на ПК и на визуальную сигнализацию.

САРКП предназначена для управления факельной установкой в автоматизированном и ручном режиме, а также для выдачи аварийных сигналов на пульт оператора.

Ручной режим используется при проведении ПНР и регламентных работах. В автоматизированном режиме - автоматический розжиг без участия оператора; автоматизированный контроль пламени дежурных горелок; автоматический розжиг в случае погасания пламени дежурной горелки в течение всей продолжительности работы факельной установки; выдача сигналов на индикаторы визуального наблюдения, а также дистанционная передача информации по коммуникационному протоколу Modbus/RTU через интерфейс RS-485 и через «сухие» контакты реле [26].

Розжиг электроискровой, бегущий огонь, либо совмещенный по обоим принципам – дублирующий способ розжига.

Контроль пламени, основанный на ионизационном методе регистрации пламени, использование термопары для контроля наличия пламени на

дежурной горелке, а также совмещенный способ контроля пламени, позволяющим исключить недостатки каждого метода обнаружения отсутствия пламени на дежурной горелке.

Система автоматизации розжига и контроля пламени, в общем случае, включает в себя: блок автоматического розжига и контроля пламени (БАРКП), блок запорно-регулирующий (БЗР), дежурные горелки (ДГ), тоководы (ТВ), высоковольтный блок (БВВ), пульта управления различных типов, модификаций, исполнения.

Блок автоматического розжига и контроля пламени должен обеспечивать управление розжигом и контроль пламени дежурных горелок непосредственно на факельной площадке за обваловкой. На внешней панели блока управления должны располагаться необходимые органы управления и световые индикаторы. Блок запорно-регулирующий (БЗР) предназначен для подготовки топливного газа, подаваемого на дежурные горелки. БЗР выполняет поддержание заданного давления топливного газа, а также его автоматическую подачу и отсечку в соответствии с управляющими сигналами наличия (отсутствия) давления топливного газа. БЗР представляет собой систему агрегатов и газопроводов, размещённых в шкафу. Дежурная горелка должна обеспечивать подготовку топливовоздушной смеси и её надёжное воспламенение. После воспламенения топливовоздушной смеси дежурная горелка должна обеспечивать стабильное, безотрывное горение, а также возможность контроля пламени на дежурной горелке. Пульт управления постоянно контролирует наличие пламени дежурной горелки. При погасании горелок пульт управления производит розжиг автоматически.

Таким образом, можно отметить, что дистанционная автоматизированная система розжига и контроля пламени факельной установки обеспечивает промышленную безопасность в части предотвращения инцидентов и аварийных ситуаций.

Проведем анализ метода «бездымного факела» закрытого типа. Факельная система позволяет предприятиям нефтепереработки и нефтехимии

проводить безопасные операции по утилизации углеводородов при остановке, пуске или значительном изменении режима работы. Дело в том, что все аппараты, трубопроводы, резервуары и другие производственные объекты на нефтехимических предприятиях образуют единый герметичный контур. При значительном изменении режима работы какой-то установки (например, при её пуске) необходимо, чтобы давление во всех частях системы не менялось. Задачу выравнивания давления в рабочих средах, находящихся в системе, решает факел. С помощью него быстро и безопасно удаляются излишки углеводородов. Факельная система закрытого типа делает работу факела максимально безопасной и экологичной. В отличие от обычного мачтового факела, в закрытом подача и утилизация факельных газов осуществляются не одним потоком, а множеством мелких. Каждый из них лучше обтекается воздухом, что позволяет максимизировать процесс утилизации углеводородных остатков, что обеспечивает хорошие экологические показатели для предприятия.

Отметим, что бездымный метод, в первую очередь, направлен на обеспечение экологической безопасности. По результатам патентного поиска, был выбран патент «Факельная установка бездымная Парфенова», автора Парфенова Л.Н., опубликованный 10.09.2015 в бюл. № 25 [27].

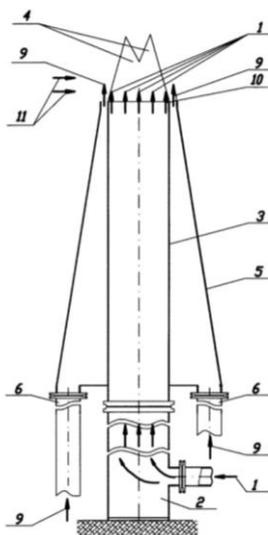
Изобретение относится к устройству факельных установок и может быть использовано в нефтегазовой, нефтехимической, химической, коксохимической и других отраслях промышленности для полного сжигания сбросов факельных горючих газов. Оголовок бездымной факельной установки снабжен дополнительной обечайкой вокруг или/и внутри оголовка, в пространство между которыми принудительно подают воздух с его выходом сверху для ограждения оголовка от наложения ветром пламени горящих газов на оголовок, и для охлаждения их теплонапряженных поверхностей, и для обеспечения бездымного сжигания сбросов газов, при этом воздух подают от вентиляторов снаружи факельных стволов факельных установок или подают сжатый воздух со стороны или от воздуходувок.

Изобретение позволяет обеспечить длительное сжигание всех видов сбросных газов, повысить сроки эксплуатации между ремонтами [27].

Факельные установки (ФУ) представляют собой сооружения различных типов: вертикальные, горизонтальные, наземные закрытые, коаксиальные и другие для сжигания сбросов горючих газов или горючих примесей (в сточных водах) окружающим воздухом.

В факельных установках самыми уязвимыми являются оголовки, называемые также факельными горелками (оголовками). Из оголовков большинства ФУ сбросные газы выходят со скоростью прямо пропорциональной их объемному расходу. Недостатком таких ФУ является то, что при низкой скорости выхлопа газов, что происходит 99% времени эксплуатации, факел пламени с температурой 800-2200°C от ветра накрывает обечайку оголовка. Аустенитный металл оголовков, допускаемый для кратковременной работы при температуре до 1000-1100°C, не выдерживает длительно высокую температуру, т.е. конструкции оголовков теряют устойчивость с деформацией формы и коррозией. При длительной меньшей температуре происходит высокотемпературная коррозия, которая через несколько месяцев повреждает оголовки с необходимостью ремонта или замены. Футеровка оголовков жаростойким бетоном не решает проблемы ресурса работы, так как бетон не выдерживает резких изменений температур при увеличении сбросов, охлаждения от осадков или изменений направления ветра. Существуют ФУ с принудительной подачей воздуха в оголовки воздуходувками, установленными у основания ФУ. Воздух от воздуходувки поступает в оголовки по вертикальной трубе факельного ствола. Температура горения газов от таких оголовков бывает также выше критической для применяемых материалов, поэтому и они работают незначительное время между ремонтами. Стоимость таких сооружений в разы превосходит стоимость типовых ФУ, они распространены в развитых странах, в России их всего несколько единиц [27].

Наиболее близким по технической сущности представленного патента Парфенова Л.Н., является оголовок по патенту США №5846068, цель которого – защита оголовков от разрушений при горении газов внутри и улучшение сжигания подачей воздуха в газы на выходе из оголовка. На рисунке 2 представлен пример принципиальной конструкции оголовка предлагаемой вертикальной ФУ – факела вертикального (рисунок 2) [27].



1 – факельная система, 2 – факельный ствол, 3 – оголовок, 4 – горение газа в атмосферном воздухе, 5 – обечайка, 6 – воздухопроводы, 7 – вентиляторы, 8 – обратные клапаны, 9 – воздух, 10 – щелевой зазор.

Рисунок 2 – Схема принципиальной конструкции оголовка предлагаемой вертикальной ФУ «бездымного метода» [27]

Для улучшения горения сбросов увеличением подачи воздуха указывают размеры проходов для воздуха, в несколько раз превышающие размеры проходов для газов, а воздух подают внутрь выхлопов газов. Такая организация полного сжигания создает возможность любой температуры до 2200°С включительно с разрушением оголовка. В патенте США №5846068 критикуют прототип без принудительной подачи воздуха указанием возможности сгорания газов внутри оголовка. Это обоснование надуманно, т.к. атмосферный воздух, случайно и в каком-то незначительном количестве

поступивший в оголовок, сжигает в 16 раз меньшее количество газов, практически не повреждает оголовок. По патенту №5846068 выполняется сжигание газов в принудительно подаваемом воздухе непосредственно над оголовком, в зоне горения создается температура выше температуры в мартеновской печи, плавящей все металлы, кроме вольфрама.

Парфенов Л.Н. предлагает существующие оголовки коаксиальных ФУ с воздуходувками можно реконструировать, чтобы направлять воздух не внутрь оголовков, а для отвода вверх газов и охлаждения поверхности реконструируемых оголовков. Обечайки для прохода воздуха рядом с прочной частью оголовков могут быть снаружи или/и изнутри оголовков. Устройство работает следующим образом: сбросы газов 1 из факельной системы поступают через факельный ствол 2 в оголовок 3, на выходе из которого происходит горение 4 газа 1 в атмосферном воздухе. Снаружи вокруг оголовка 3 выполнена обечайка 5, в пространство между которыми через воздуховоды 6 нагнетают воздух 9, откуда воздух 9 выходит с необходимой скоростью через щелевой зазор 10, отклоняя газы 1 от оголовка 3. С увеличением расхода сбросов газов влияние ветра 11 на форму пламени уменьшается, пламя само стабилизируется вертикально от оголовка. При этом устраняется конвекционный нагрев оголовка, одновременно охлаждаемого изнутри повышенным расходом сбросного газа. Тепловое излучение пламени 4 газов во все стороны составляет 13-30% от всей энергии сгорания, а малый угол падения теплового излучения на обечайки 5 и оголовок 3 уменьшает поглощение тепла и нагрев металла оголовка» [27].

Таким образом, представленный метод обеспечивает экологическую безопасность. Бездымная факельная установка, предложенная Парфеновым Л.Н, снабжена дополнительной обечайкой вокруг или/и внутри оголовка, в пространство между которыми принудительно подают воздух с его выходом сверху для ограждения оголовка от наложения ветром пламени горящих газов на оголовок, и для охлаждения их теплонапряженных поверхностей, и для обеспечения бездымного сжигания сбросов газов, при этом воздух

подают от вентиляторов снаружи факельных стволов факельных установок или подают сжатый воздух со стороны или от воздуходувок. Работа факела не превышает нормативных показателей, это подтверждается замерами аккредитованных лабораторий, в том числе и независимых [27].

Рассмотрим метод сепарации. В пунктах 56-58 Приказа Ростехнадзора от 22.12.2021 № 450 «Об утверждении Руководства по безопасности факельных систем», указано, что [17]:

- с целью исключения содержания жидкой фазы и твердых частиц в газах и парах, сбрасываемых в общую и отдельную факельные системы, в границах технологического объекта рекомендуется устанавливать сепараторы;
- с целью недопущения попадания конденсата из факельного коллектора в факельный ствол рекомендуется на входе в факельную установку предусматривать установку факельного сепаратора» [17].

При наличии в сбросных газах твердых или смолистых осадков рекомендуется устанавливать два параллельных сепаратора. При малом содержании примесей сепаратор рекомендуется оснащать байпасной линией с системой заблокированных задвижек «закрыто-открыто» и быстросъемными заглушками, обеспечивающими постоянный проток сбросов на факел и возможность очистки сепаратора.

Таким образом, для соблюдения требований безопасности обязательна установка факельного сепаратора, который должен обеспечивать не только сбор аварийных сбросов технологических, в том числе жидких сред, но и отделение и удержание капельной жидкости, содержащейся в газе.

Сепарационным аппаратам, предназначенным для улавливания аэрозольных и мелкодисперсных жидких частиц из газового потока в факельных системах, и может быть использовано в нефтегазовой, нефтегазоперерабатывающей, нефтегазохимической и других отраслях промышленности. Факельная система предназначена для сброса и последующего сжигания горючих газов и паров при срабатывании устройств

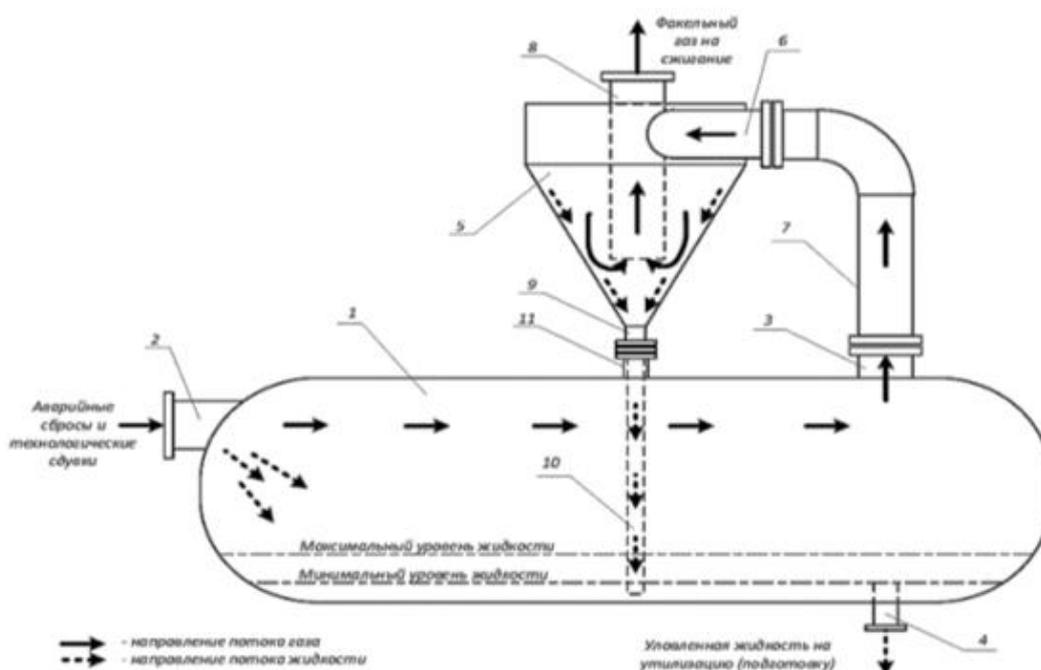
аварийного сброса (предохранительных клапанов, гидрозатворов и др.), а также при постоянных, предусмотренных технологическим регламентом на производство сдувок [28].

Устройства аварийного сброса предусмотрены для технологического оборудования, работающего под давлением газообразных и жидких сред. Из уровня техники известны горизонтальные сепарационные аппараты и емкости, применяемые в качестве факельных сепараторов и конденсатосборников и работающие на принципе гравитационного разделения разных по плотности фаз. Недостатком устройства является неполная сепарация газа при наличии мелкодисперсной жидкой фазы, находящейся в потоке газа в виде аэрозоля. В таких условиях гравитационные сепараторы малоэффективны, а для достижения приемлемой эффективности требуют гораздо больший объем, так как в соответствии с расчетом гравитационных сепараторов, эффективность отделения капель находится в зависимости от его линейных размеров.

Для повышения эффективности разделения дисперсных систем в виде аэрозолей также используются циклонные установки, где разделение более плотного компонента: жидкой фазы осуществляется за счет действия центробежной силы, которая по величине может быть в несколько раз больше силы тяжести, используемой в гравитационных сепараторах. Циклонные устройства нашли широкое применение в сепарационной технике, в т.ч. для улавливания капельной жидкости из потока газа. Разработано множество конструкций и компоновок циклонов для различных условий работы, в т.ч. батарейные (мульти-) циклоны. Недостатком известных циклонных устройств является ограничение их использования в факельной системе в виду того, что функцией факельного сепаратора является сбор и отвод аварийных сбросов, в том числе жидких сред, а при поступлении жидкости в центробежное сепарационное устройство, рассчитанное на работу с газом, нарушается нормальный режим работы как циклона, так и всей факельной системы [28].

По итогу патентного поиска, выявлен патент на изобретение «Факельный сепаратор с циклонным каплеуловителем» автора Казарцева Е.В., опубликованные 15.06.2023 в бюл. № 17. Изобретение относится к газовым сепарационным аппаратам, предназначенным для улавливания аэрозольных и мелкодисперсных жидких частиц из газового потока в факельных системах, и может быть использовано в нефтегазовой, нефтегазоперерабатывающей, нефтегазохимической и других отраслях промышленности [28].

Устройство обеспечивает повышение эффективности очистки факельного газа от капельной жидкости при обеспечении безопасной эксплуатации факельной системы (рисунок 3) [28].



1 – факельная горизонтальная емкость, 2 – патрубок входа газа, 3 – патрубок выхода газа, 4 – патрубок отвода жидкости, 5 – выносной циклон, 6 – входной патрубок, 7 – трубопровод, 8 – выходной патрубок, 9 – дренажный патрубок, 10 – дренажная линия, 11 – патрубок горизонтальной емкости.

Рисунок 3 – Устройство факельного сепаратора с циклонным каплеуловителем [28]

Факельный сепаратор с циклонным каплеуловителем состоит из горизонтальной емкости, имеющей патрубки входа и выхода газа, патрубков отвода жидкости и внешний выносной циклон, последовательно подключенный к горизонтальной емкости, соединенный своим входным патрубком к патрубку выхода газа горизонтальной емкости через трубопровод. Для отвода конденсата из циклона имеются дренажный патрубок и дренажная линия, которая устанавливается через патрубок горизонтальной емкости и опускается ниже минимального уровня заполнения горизонтальной емкости. Обязательным условием исключения недопустимого перепада давления на устройстве является равная пропускная способность каналов для потока газа через всю конструкцию заявленного изобретения.

Техническое противоречие между задачей повышения эффективности сепарации газа от капельной жидкости и задачей обеспечения безопасной эксплуатации факельной системы в части улавливания аварийных залповых сбросов жидкости решено за счет включения внешнего выносного циклона (циклонов) в компоновку факельного сепаратора, причем входной патрубок внешнего выносного циклона (циклонов) соединен с патрубком выхода газа из факельной емкости, что позволяет беспрепятственно проводить сбор аварийных сбросов технологических жидкостей и образующегося конденсата непосредственно в факельной емкости, тем самым обеспечивая выполнение требования правил безопасности [28].

Для оптимального включения внешних выносных циклонных элементов в компоновку факельного сепаратора может применяться принцип разделения единого потока газа на отдельные потоки с батареей внешних выносных циклонов, т.е. использования мультициклонной установки, что позволит достичь необходимую эффективность отделения капель без образования недопустимого перепада давления.

Совмещение высокоэффективных циклонных сепарационных элементов снаружи факельной емкости, в сравнении с внутренним

размещением циклонов, не занимает полезное рабочее пространство сепаратора и позволяет снизить потери легких фракций продукта (нефти) и вовлечь их в производство, сократить выброс и сжигание парниковых газов, снизить углеродный след производства. Изобретение можно применять как при проектировании новых, так и при модернизации существующих факельных сепараторов. Суть технического решения заключается в объединении в одном узле двух сепарационных устройств:

- горизонтальной емкости, назначение которой - улавливание аварийных залповых объемов жидкости, а также накопление конденсата за счет гравитационного отделения капель жидкости из потока газожидкостной смеси;
- внешнего выносного циклона, назначение которого - эффективное улавливание капель жидкости из факельного газа за счет центробежного отделения [28].

Подключение указанных сепарационных устройств выполняется последовательно с поэтапным прохождением газожидкостного потока сначала через горизонтальную емкость, где отделяются крупные капли и свободная жидкая фаза в т.ч. жидкостные пробки, а затем через внешний выносной циклон, где на его внутренней поверхности за счет центробежного отделения улавливается мелкодисперсная фаза и под действием силы тяжести стекает в горизонтальную факельную емкость.

Факельный сепаратор с циклонным каплеуловителем состоит из горизонтальной емкости 1, имеющей патрубок входа газа 2, патрубок выхода газа 3 и патрубок отвода жидкости 4. Горизонтальная емкость 1 может быть оборудована дополнительными внутренними конструктивными элементами, повышающими эффективность сепарации газа от капель конденсата. Последовательно к горизонтальной емкости 1 подключается внешний выносной циклон 5, соединяясь своим входным патрубком 6 с патрубком выхода газа 3 горизонтальной емкости 1 через трубопровод 7. Поток газа, содержащий мелкие капли, раскручивается в тангенциальном

завихрителе внешнего выносного циклона 5 и из-за возникновения центроостремительного ускорения происходит выпадение мелких капель на внутреннюю поверхность конуса и их стекание в нижнюю часть внешнего выносного циклона 5. Очищенный от капельной жидкости газ отводится из внешнего выносного циклона 5 через выходной патрубок 8. Для отвода конденсата из внешнего выносного циклона 5 имеются дренажный патрубок 9 и дренажная линия 10, которая устанавливается через патрубок 11 горизонтальной емкости 1 и опускается ниже минимального уровня заполнения емкости 1, и по которой свободно стекают отделяемая капельная влага из внешнего выносного циклона 5 и накапливается в емкости 1.

Минимальный уровень заполнения емкости 1 поддерживается постоянно за счет устройства среза патрубка отвода жидкости 4 на уровне выше среза дренажной линии 10 на величину, определяемую расчетом из условия исключения прорыва потока газа во внешний выносной циклон 5 обратным током через дренажную линию 10. Сепарационные устройства: факельная емкость 1 и внешний выносной циклон 5 могут иметь отсекающую и регулирующую арматуру, а также приборы контроля расхода газа, уровня жидкости и давления в линиях и аппаратах, обеспечивающих эффективность и безопасность процесса» [28].

Для применения устройства к существующим факельным сепараторам и емкостям их модернизация выполняется включением в существующую компоновку внешнего выносного циклона согласно описанию конструкции изобретения, с возможностью установки внешнего выносного циклона как непосредственно на горизонтальную емкость, так и на отдельном основании при выполнении условия свободного дренирования капель конденсата самотеком по дренажной линии 6, для подключения которой используется подходящий патрубок или люк-лаз горизонтальной емкости 1.

Обязательным условием для исключения недопустимого перепада давления на устройстве является равная пропускная способность каналов для потока газа через всю конструкцию заявленного изобретения, а именно,

площадь поперечного сечения каналов для потока газ устройства должна быть не меньше площади поперечного сечения подводящего трубопровода. Новым является то, что в компоновке факельного сепаратора последовательно используются внешний выносной циклон или батарея циклонов, повышающие эффективное улавливание капельной жидкости из потока газа после прохождения факельной горизонтальной емкости, обеспечивающей безопасность эксплуатации факельной системы за счет приема, удержания и отвода залповых аварийных сбросов жидких сред. Новым также является то, что исключение недопустимого перепада давления на устройстве обеспечивается за счет организации равной пропускной способности каналов устройства для потока факельного газа через всю конструкцию заявленного изобретения. Для накопления и дегазации конденсат дренируется в горизонтальную емкость самотеком под уровень минимального заполнения горизонтальной емкости, что не требует использования дополнительных емкости и насоса [28].

Устройство факельной сепарации не требует серьезных вмешательств в существующее и действующее оборудование, может быть адаптировано к действующим процессам и применено на действующих факельных установках. Совокупность признаков осуществления заявляемого факельного сепаратора с циклонным каплеуловителем повышает эффективность отделения капельной жидкости из потока газа, сохраняя безопасность эксплуатации факельной системы. В результате использования факельного устройства сепарации повышается экологическая безопасность производства за счет эффективности очистки факельного газа от капельной жидкости, при обеспечении безопасной эксплуатации факельной системы, выражающейся в обеспечении приема, удержания и отвода залповых аварийных сбросов жидких сред, что способствует:

- сокращению потерь углеводородов при сжигании газа на факеле;
- снижение дымности горения пламени факела;

- уменьшение углеродного следа в рамках декарбонизации производства;
- сокращение вредных выбросов от продуктов сгорания [28].

Подводя итог, можно сделать вывод, что метод сепарации и «бездымный метод» обеспечивают, в первую очередь, снижение негативного влияния выбросов на атмосферу. Автоматический метод системы розжига факельной установки нацелен на обеспечение промышленной безопасности и предотвращения инцидентов и аварийных ситуаций.

В связи с высоким темпом научно-технического прогресса, необходима адаптация к технологическим изменениям и предусмотреть гибкость системы и возможность интеграции цифровых технологий:

- возможность перестройки параметров работы факела при изменении состава сырья (например, при переходе на сжигание попутного нефтяного газа с высоким содержанием серы);
- внедрение IoT-датчиков для мониторинга состояния оборудования в реальном времени и AI-алгоритмов для прогнозирования аномалий (например, риск затухания пламени).

Таким образом, особенности безопасной эксплуатации факельных систем связаны с необходимостью балансировать между технологической эффективностью, экологическими ограничениями и требованиями промышленной безопасности. Комплексный учет этих особенностей позволяет предотвратить аварии, снизить эксплуатационные затраты и обеспечить соответствие принципам устойчивого развития.

2.2 Аварии на факельных установках

Определим возможные сценарии возникновения и развития аварий на факельных системах (таблица 10).

Таблица 10 – Возможные сценарии возникновения и развития аварий на факельных системах

Вероятный сценарий	Причины	Вероятное развитие
Погасание факельного пламени	Сильный ветер, изменение состава газа (низкая теплотворная способность), неисправность пилотной горелки, механические повреждения	Накопление горючих газов – образование взрывоопасной смеси – воспламенение от случайного источника (искры, статическое электричество) – взрыв или пожар.
Неполное сгорание	Недостаток кислорода, высокая скорость потока газа, низкая температура горения, неподходящий состав газа	Выброс токсичных веществ (СО, Н ₂ S) или несгоревших углеводородов → загрязнение атмосферы, риск отравления персонала, образование смога.
Перегрузка системы и избыточное давление	Аварийный сброс больших объемов газа (например, при остановке установки), засорение линии, отказ клапанов	Разрыв трубопроводов/резервуаров – утечка газа – пожар или взрыв. Возможен каскадный отказ смежных систем.
Обратная тяга и попадание кислорода	Ошибки в проектировании, резкие перепады давления, неисправность запорной арматуры	Проникновение воздуха в систему – образование взрывоопасной смеси внутри оборудования – внутренний взрыв.
Отказ оборудования	На факельной головке – коррозия/засорение. На сепараторе – накопление жидкости, попадание жидкости в факел. В трубопроводах – утечка из-за коррозии или вибрации	Нарушение горения. Хлопки, нестабильное горение. Образование взрывоопасной смеси внутри оборудования – внутренний взрыв.
Человеческий фактор	Ошибки при обслуживании, несанкционированное изменение режимов работы, нарушение процедур блокировки/маркировки	Неправильное отключение пилотной горелки – погасание факела – накопление газа – авария
Внешние воздействия	Молнии (воспламенение вне факела), ураганы (механические повреждения), землетрясения	Падение оборудования, столкновение с техникой
Выброс токсичных газов	Отказ факела при сбросе сероводорода (Н ₂ S) или других токсинов	Образование ядовитого облака – риск для здоровья персонала и населения, экологический ущерб
Проблемы с системой зажигания	Отказ автоматики, разрядников, задержка воспламенения	Сброс газа без горения – накопление → последующее воспламенение с детонацией
Ошибки	Недостаточная высота факела (тепловое излучение на оборудование),	Постепенная деградация системы – внезапный отказ при пиковой нагрузке

Продолжение таблицы 10

Вероятный сценарий	Причины	Вероятное развитие
проектирования/монтажа	неправильный выбор материалов (коррозия), неучтенные нагрузки	

Рассмотренные сценарии аварий вызывают внутренние и внешние причины. Внешние воздействия на факельные системы, которые также могут вызывать негативные инциденты, это природные и техногенные факторы. К природным факторам относятся: молнии (воспламенение вне факела), ураганы (механические повреждения), землетрясения (разрушение опор). К техногенным внешним факторам: падение оборудования, столкновение с техникой, выброс токсичных газов

Кроме того, вероятные комбинированные и каскадные сценарии возможных аварий. Например, комбинированные аварии, возникают вследствие отказа сепаратора и перегрузки факела происходит выброс жидкости и газа вследствие чего возникает пожар с распространением на объекты.

Каскадные сценарии аварий предусматривает ряд последовательных негативных сценариев. Так, например, авария на факеле влечет за собой остановку производства и неконтролируемые выбросы на других узлах факельных систем.

Для предотвращения возникновения аварийных ситуаций рекомендуется: регулярный мониторинг, резервирование систем (двойные пилотные горелки), автоматические системы диагностики, расчеты на пиковые нагрузки и обучение персонала с использованием современных методов и технологий. В случае возникновения аварий необходимо производить расследование на выявление причин возникновения. Порядок проведения технического расследования причин аварий, инцидентов и случаев утраты взрывчатых материалов промышленного назначения регламентирован Приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 503 [15].

Этапы расследования аварий на факельных системах:

- первичный осмотр и обеспечение безопасности;
- сбор данных и документации;
- техническая экспертиза оборудования;
- реконструкция событий;
- определение корневой причины;
- составление отчета и рекомендаций.

Рассмотрим подробно проведение каждого этапа.

В рамках проведения первого этапа «Первичный осмотр и обеспечение безопасности», в-первую очередь, необходимо осуществить изоляцию зоны аварии: отключить подачу газа, заблокировать клапаны и эвакуировать персонала. Далее необходимо провести первичную оценку рисков: проверить наличие возможных утечек, токсичных газов, остаточного горения и зафиксировать документально ситуацию с помощью фото- и видеосъемки. Зарегистрировать видимые повреждения, положения оборудования, следы горения/взрыва.

Следующим этапом необходимо произвести сбор данных и документации. Провести анализ технической документации: проектных схем, журналов обслуживания, протоколов последних проверок. Опросить операторов, свидетелей аварии на предмет – что происходило в момент до и во время инцидента, какие действия персонала могли повлечь за собой возникновение аварии. Также необходимо зафиксировать данные автоматики: извлечь данных с систем контроля (SCADA, датчики давления, температуры, расходомеры).

Далее необходимо провести техническую экспертизу оборудования:

- провести визуальный осмотр: выявить факты коррозии, трещин, деформаций факельной головки, трубопроводов, сепараторов;
- провести лабораторный анализ, исследование материалов на износ, химический состав газа/жидкости в момент аварии;

- проверить системы безопасности, осуществить тестирование клапанов, систем зажигания, сигнализаторов загазованности.

Для того чтобы понять причины, в результате которых произошла аварийная ситуация, необходима реконструкция событий с помощью моделирования и хронологии событий. Моделирование осуществляют с помощью специализированных программ, например, ANSYS Fluent, для анализа распределения газа, теплового излучения, взрывоопасных зон. Хронологию событий можно провести с помощью построения временной шкалы на основе данных автоматики и показаний свидетелей.

Определение корневой причины, как правило осуществляют с помощью методов анализа, таких как: «5 Why (5 Почему)» - последовательное выявление причинно-следственных связей, диаграмма Исикавы – классификация факторов (оборудование, персонал, процессы, среда), FMEA (Анализ видов и последствий отказов) для оценки рисков и уязвимостей системы.

Приведем пример использования метода «5 Почему» для аварии на факельной системе. Сценарий аварии: произошел взрыв в факельной системе после сброса газа. Факел погас, газ скопился в системе и воспламенился от случайной искры.

Применение метода «5 Почему»:

- почему произошел взрыв – накопившаяся горючая газовая смесь воспламенилась;
- почему газ скопился в системе – факельное пламя погасло, и газ не сжигался;
- почему погас факел – пилотная горелка, которая поддерживает горение, отключилась;
- почему отключилась пилотная горелка – закончилось топливо для пилотной горелки (пропан/газ);

- почему не было топлива – клапан подачи топлива был случайно закрыт во время планового обслуживания, а после завершения работ его не открыли.

Таким образом, корневой причиной является ошибка персонала при восстановлении работы системы после обслуживания (клапан остался закрытым).

Кроме того, наблюдается отсутствие контроля за состоянием пилотной горелки перед запуском. В качестве рекомендации для устранения можно предложить следующие мероприятия: внедрить процедуру двойной проверки клапанов после ТО (блокировка/маркировка), установить датчики контроля подачи топлива к пилотной горелке с сигнализацией, провести обучение персонала по процедурам запуска факела после обслуживания.

В некоторых случаях цепочка «5 Почему» может потребовать больше или меньше шагов. Например, если бы клапан закрылся из-за коррозии, потребовалось бы углубиться в причины коррозии (материал, условия эксплуатации).

Отметим, что метод эффективен только при достоверных данных. Если на 3-м шаге предположить, что факел погас из-за ветра, а не отказа горелки, коренная причина будет другой.

Приведем пример использования метода Исикавы. Сценарий аварии: при сбросе газа на факельную установку произошел хлопок с разрушением сепаратора (Knockout Drum). Причина неочевидна.

Определим основные категории: оборудование, персонал, процессы/методы, материалы, среда, измерения/контроль.

Проведем детализацию причин по категориям:

- оборудование (коррозия стенок сепаратора, засорение сливной линии сепаратора (жидкость не удаляется). неисправность предохранительного клапана, износ факельной головки (нарушение стабильности горения);

- персонал (ошибка оператора: несвоевременный слив жидкости из сепаратора, недостаточная квалификация: персонал не проверил уровень жидкости перед сбросом, нарушение процедуры блокировки/маркировки при ремонте);
- процессы/Методы (отсутствие регламента по регулярной очистке сепаратора, неправильная настройка автоматики управления сбросом газа, пропуск планового ТО оборудования);
- материалы (попадание абразивных частиц в газовый поток (повреждение сепаратора), использование несовместимых материалов при ремонте (коррозия), высокое содержание сероводорода ($H_2 S$) в газе ускоренная коррозия);
- среда (экстремальные температуры – термические деформации оборудования, высокая влажность – коррозия металла, ветровая нагрузка – колебания факела, нарушение горения);
- измерения/Контроль (неисправность датчика уровня жидкости в сепараторе, отсутствие контроля за составом газа (например, содержание $H_2 O$ или $H_2 S$), погрешности в показаниях манометров давления).

Визуализация метода представлена на рисунке 4.

Анализ и определение корневой причины. После группировки факторов выяснилось, что основными проблемами стали:

- засорение сливной линии сепаратора (оборудование) – жидкость не удалялась;
- неисправность датчика уровня (измерения) → персонал не получал данные о переполнении;
- отсутствие регламента очистки (процессы) – жидкость накапливалась месяцами.

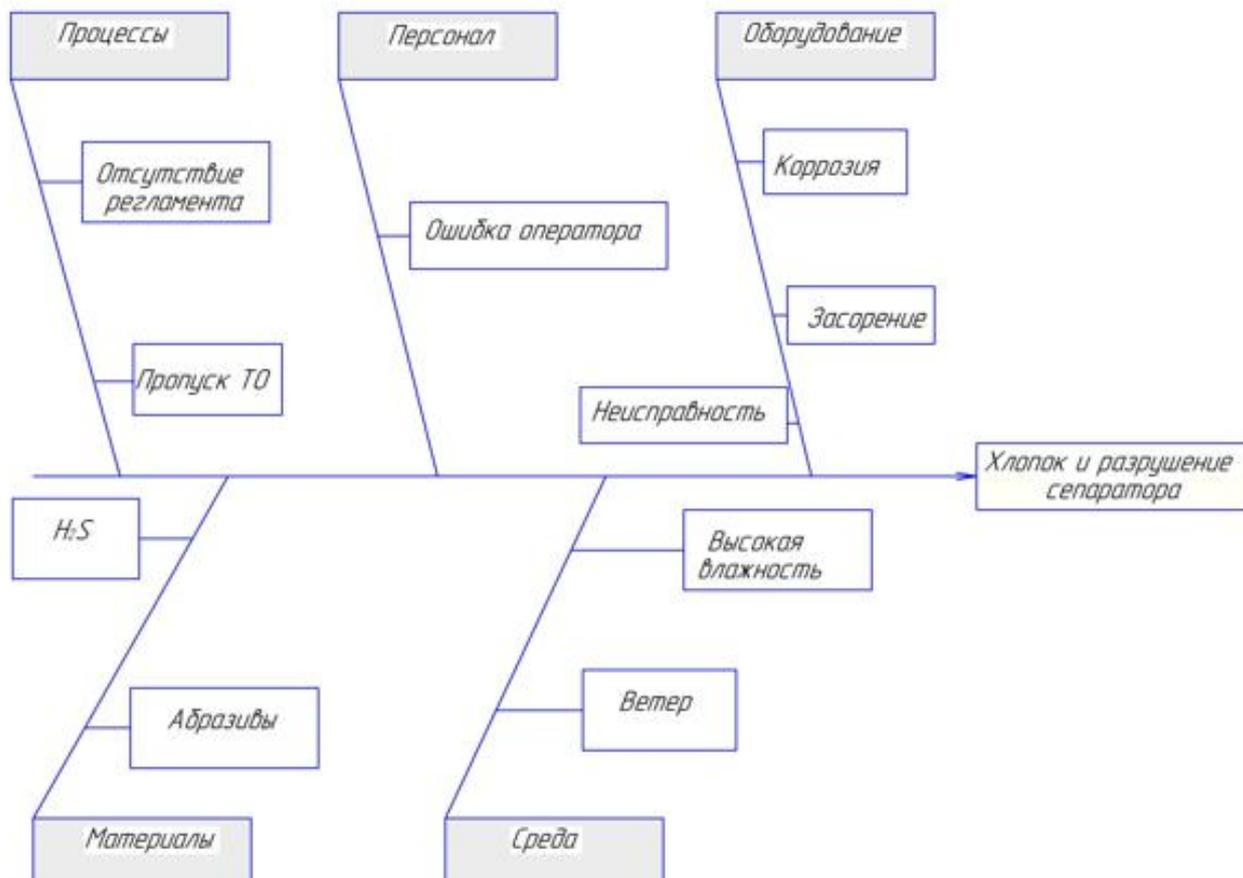


Рисунок 4 – Визуализация метода Исикавы для поиска корневой причины возникновения аварийной ситуации

Таким образом, корневой причиной является системная ошибка управления — отсутствие процедур мониторинга уровня жидкости и технического обслуживания сепаратора. В качестве рекомендаций можно внедрить автоматическую систему контроля уровня жидкости с аварийной сигнализацией, разработать график профилактической очистки сепаратора, провести обучение персонала по работе с датчиками и интерпретации данных, установить фильтры для улавливания абразивных частиц в газовом потоке.

Преимущества метода: позволяет структурировать все возможные причины по категориям, выявляет не только технические, но и организационные недостатки (например, пропуск ТО), наглядно демонстрирует взаимосвязь факторов, которые привели к аварии.

Приведем пример использования метода FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) для расследования аварии на факельной системе. Сценарий аварии: после аварийного сброса газа факел погас, что привело к накоплению горючей смеси и взрыву. Требуется выявить корневую причину и улучшить систему.

Шаги анализа FMEA

- определение компонентов системы и их функций: пилотная горелка (поддержка горения факела), клапан подачи топлива к горелке, система автоматического зажигания, датчик наличия пламени, сепаратор (удаление жидкости из газа).
- выявление возможных отказов (Failure Modes). Для каждого компонента определяются: вид отказа (например, клапан не открывается), причины отказа (коррозия, человеческая ошибка), последствия (погасание факела, взрыв) [5].

Составим таблицу FMEA для ключевых компонентов (таблица 11).

Таблица 11 – Таблица FMEA для ключевых компонентов

Компонент	Вид отказа	Причины	Последствия	S O D	RP N	Существующие меры контроля	Рекомендации
Пилотная горелка	Отключение горелки	Закончил ось топливо	Погасание факела – накопление газа	9 3 4	10 8	Визуальный контроль раз в смену	Установить датчик уровня топлива с алармом
Клапан подачи	Не открывается после ТО	Ошибка персонала (клапан закрыт)	Нет подачи топлива – горелка не	8 4 6	19 2	Процедура двойной проверки	Внедрить блокировку/маркировку (LOTO)
Датчик пламени	Ложное срабатывание	Загрязнение оптического элемента	Система не реагирует на погасание	9 2 5	90	Еженедельная очистка	Автоматическая самотестирование датчика

Продолжение таблицы 11

Компоне нт	Вид отказа	Причин ы	Последств ия	S O D	RP N	Существующ ие меры контроля	Рекомендац ии
Сепарато р	Переполен ие жидкостью	Засорени е сливной линии	Попадание жидкости в факел – хлопки	7 3 3	63	Ручной контроль уровня раз в сутки	Ручной контроль уровня раз в сутки

Критерии:

- S (Severity) – серьезность последствий (1–10);
- (Occurrence) – вероятность возникновения отказа (1–10);
- D (Detection) – вероятность обнаружения отказа до аварии (1–10);
- RPN (Risk Priority Number) = $S \times O \times D$.

Анализируя результаты, выявлено, что наибольший риск (RPN=192): отказ клапана подачи топлива из-за человеческой ошибки. Корневая причина: Отсутствие системы блокировки/маркировки (LOTO) при обслуживании.

Критичные последствия (S=9): погасание факела и взрыв из-за отказа пилотной горелки или датчика пламени.

Рекомендации на основе FMEA:

- для клапана подачи топлива: внедрить процедуру LOTO (Lockout-Tagout) для предотвращения случайного закрытия клапана, установить электронную сигнализацию статуса клапана в SCADA-систему.
- для пилотной горелки добавить резервный источник топлива с автоматическим переключением.
- для датчика пламени внедрить систему автоматической продувки оптики раз в 12 часов;

- для сепаратора интегрировать датчики уровня жидкости с автоматическим отсечением подачи газа при переполнении.

FMEA помогает в расследовании аварии для выявления системных уязвимостей. Например, отсутствие автоматики для контроля уровня жидкости в сепараторе. Приоритезация рисков: высокий RPN клапана указывает на необходимость срочных изменений.

Данные FMEA дополняют диаграмму Ишикавы (например, категория «персонал» для ошибки закрытия клапана).

Таким образом, FMEA не только помогает найти корневую причину аварии (например, человеческий фактор при работе с клапаном), но и предлагает конкретные решения для снижения рисков. Метод особенно эффективен в сочетании с данными расследования (журналы ТО, показания датчиков).

Экспертиза систем управления применяется:

- для проверки логики АСУ ТП на корректность срабатывания аварийных отсечных клапанов;
- для калибровки датчиков, как подтверждение точности измерений давления, температуры.

Приведем примеры практических действий. Для сценария «погасание факела» необходимо выполнить следующие действия:

- проверить журналы обслуживания пилотных горелок;
- проанализировать данные ветровой нагрузки и состав газа за последние 24 часа.

Для сценария «разрыв трубопровода» необходимо выполнить следующие действия:

- исследовать металл на усталостные трещины;
- смоделировать гидроудар при аварийном сбросе.

Профилактические меры после расследования: установка резервных систем зажигания, регулярная очистка сепараторов от жидкости, внедрение автоматического мониторинга состава газа. Проведем анализ опасных

факторов, коррозионных процессов и обстоятельств, способствующих авариям на факельных системах. Опасные вещества, влияющие на нормальную эксплуатацию: факельные системы работают с горючими газами и жидкостями, которые могут содержать сероводород ($H_2 S$), в результате чего вероятно коррозия металлов (сульфидное растрескивание). Например, накопление $H_2 S$ в сепараторе ведет к коррозии стенок и последующей разгерметизации. Воздействие диоксида углерода (CO_2) возникает, так называемая, «сладкая» коррозия, которая возникает при контакте с водой (происходит образование угольной кислоты). Воздействие кислорода (O_2) приводит к окислению металлов, образованию взрывоопасной смеси (при концентрации $>5\%$). Органические кислоты (например, уксусная) приводит к риску появления коррозии трубопроводов и факельных головок. Воздействие абразивных частиц (песок, окалина) приводит к риску возникновения эрозия внутренних поверхностей оборудования. Коррозионные процессы в факельных системах представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Коррозионные процессы в факельных системах

Тип коррозии	Причины и последствия
Сульфидное растрескивание	Взаимодействие $H_2 S$ с железом – образование FeS + выделение водорода – трещины в металле.
Углекислотная коррозия	$CO_2 + H_2 O \rightarrow H_2 CO_3$ – разрушение стальных труб (особенно при высоких температурах).
Кислородная коррозия	Попадание O_2 в систему – окисление металла – ржавчина и точечные пробоины.
Эрозия-коррозия	Комбинация абразивных частиц и высокой скорости потока газа – истончение стенок.
Микробиологическая коррозия	Деятельность сульфатвосстанавливающих бактерий (SRB) – образование $H_2 S$ и локальные язвы.

Обстоятельства, способствующие авариям в результате коррозии, представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Обстоятельства, способствующие авариям в результате коррозии

Факторы	Обстоятельства
Технические факторы	Накопление жидкости в сепараторе приводит к гидроударам, выносу жидкости в факел, хлопки и нестабильное горение. Перегрев или переохлаждение оборудования: термические деформации – трещины в сварных швах. Засорение факельной головки: нарушение аэродинамики пламени – погасание факела
Эксплуатационные ошибки	Нарушение режимов сброса газа: резкое увеличение нагрузки – превышение проектной пропускной способности. Игнорирование контроля состава газа: неучет повышенной концентрации $H_2 S$ или CO_2 - ускоренная коррозия.
Внешние условия	Высокая влажность и агрессивная среда: ускоряет коррозию, особенно в прибрежных зонах или на нефтехимических заводах. Ветровые нагрузки: колебания факела – механические повреждения опорных конструкций.
Проектные недоточеты	Недостаточная защита от коррозии: отсутствие ингибиторов коррозии, неправильный выбор материала (например, углеродистая сталь вместо нержавеющей). Отсутствие резервирования систем: нет дублирующих пилотных горелок или датчиков контроля.

Рассмотрим пример аварии, связанной с коррозией и опасными веществами. Сценарий: в факельной системе произошел разрыв трубопровода из-за коррозии. Причинами являются:

- высокое содержание $H_2 S$ в газе + влага – сульфидное растрескивание;
- отсутствие ингибиторов коррозии в системе;
- пропуск плановой замены участка трубопровода.

Последствия: утечка газа – воспламенение – пожар. Меры предотвращения аварийных ситуаций на ФУ представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Меры предотвращения аварийных ситуаций на ФУ

Риск	Меры минимизации
Коррозия	Использование коррозионностойких материалов (например, сплавы с Cr/Ni). Введение ингибиторов коррозии в газовый поток. Регулярная ультразвуковая дефектоскопия.
Накопление жидкости	Автоматический дренаж сепараторов. Установка датчиков уровня с аварийной сигнализацией.
Токсичные	Мониторинг $H_2 S$ и CO с помощью газоанализаторов.

Продолжение таблицы 14

Риск	Меры минимизации
газы	- Использование систем нейтрализации (скрубберы).
Эрозия	Фильтрация газа от абразивных частиц. - Уменьшение скорости потока в уязвимых участках.
Человеческий фактор	Обучение персонала по работе с агрессивными средами. - Внедрение процедур LOTO (Lockout-Tagout).

Помимо коррозии, крупномасштабный турбулентный перенос смешивающих сред также часто является фактором аварий на факельных системах. Крупномасштабная турбулентность в ФУ возникает при нестабильном движении газовых потоков, сопровождающемся хаотичными вихрями и перемешиванием сред с разными физико-химическими свойствами. Это явление может стать критическим фактором аварий, особенно при сбросах горючих, токсичных или реакционноспособных веществ. Нестабильному горению факела способствует турбулентность, поскольку нарушает аэродинамику пламени и ведет к погасанию факела из-за отрыва пламени от горелки (например, при сильных порывах ветра) или обратному воспламенению, когда пламя распространяется вверх по потоку в зону с горючей смесью. Турбулентность также может являться причиной формирования взрывоопасных зон, она ускоряет смешивание газа с воздухом, создавая области с концентрацией горючего вещества в пределах взрывоопасных пределов.

Кроме того, турбулентные потоки разносят опасные газы (H_2 , S, CO) за пределы расчетной зоны сжигания, повышая риски для персонала и экологии, создают гидродинамические удары и вибрации посредством колебания давления в трубопроводах, что приводит к механическим повреждениям сварных швов, и резонансу в опорных конструкциях.

Факторы, усиливающие риски турбулентного переноса представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Факторы, усиливающие риски турбулентного переноса

Фактор	Влияние
Высокая скорость потока	Усиливает вихреобразование, затрудняет прогнозирование зон смешивания.
Неоднородный состав газа	Разная плотность и реакционная способность компонентов → хаотичное горение.
Сложный рельеф местности	Препятствия (здания, техника) создают зоны повышенной турбулентности.
Резкие изменения давления	Формируют ударные волны и нестационарные потоки.

Стоит отметить, что турбулентный перенос часто усугубляет последствия: воздействие коррозии влияет на неравномерное распределение агрессивных сред ускоряет износ оборудования; человеческий фактор влияет на ошибки в управлении потоком при турбулентности (например, ручное увеличение сброса); проектные ошибки влекут за собой неучет турбулентности при выборе высоты факела или расположения оборудования.

Предложим методы минимизации рисков:

- оптимизация аэродинамики факела. Использование стабилизаторов пламени (например, керамические элементы в горелке), проектирование ветрозащитных экранов для снижения влияния бокового ветра;
- контроль параметров потока. Ограничение скорости сброса газа для предотвращения перехода ламинарного потока в турбулентный, установка демпферов колебаний в трубопроводах;
- системы мониторинга и автоматизации. Датчики контроля скорости ветра, направления потока и состава газа в реальном времени, автоматическое отключение сброса при превышении критических параметров;
- расчетное моделирование. CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics) для прогнозирования зон турбулентности и взрывоопасных концентраций, анализ сценариев при разных погодных условиях (шторм, штиль);

- резервирование систем безопасности. Дублирующие пилотные горелки с защитой от ветра, аварийные факелы для экстренного сжигания газа при отказе основной системы.

Таким образом, крупномасштабная турбулентность является сложным многокомпонентным фактором, требующий комплексного подхода: от инженерных решений до цифрового моделирования. Её игнорирование повышает риски катастрофических аварий, особенно на объектах с высоким содержанием токсичных или взрывоопасных веществ.

Сценарии аварий на факельных системах вызывают как внутренние и внешние причины. Кроме того, вероятные комбинированные и каскадные сценарии возможных аварий. Расследование аварий на факельных системах требует междисциплинарного подхода, сочетающего инженерный анализ, работу с данными и оценку человеческого фактора. Коррозия и опасные вещества являются ключевыми факторами риска в факельных системах. Их контроль требует комплексного подхода: от правильного выбора материалов до автоматизации мониторинга и обучения персонала.

2.3 Изучение методов безопасной эксплуатации

Факельные системы являются критически важными объектами в нефтегазовой и химической промышленности. Их безопасная эксплуатация требует учета уникальных технических, экологических и организационных аспектов. Рассмотрим ключевые особенности этого процесса.

Повышенное внимание безопасности и надежности факельных установок необходимо обеспечивать на предприятиях нефтегазового хозяйства независимо от типа системы. Надежное и безопасное использование установки напрямую зависит от конструкции и эксплуатационных особенностей используемых горелок, надежность встроенной автоматики. В своей работе мы рассмотрим методы, касающиеся аспектов промышленной, экологической безопасности и охраны труда.

Рассмотрим метод неразрушающего контроля. Физический износ оборудования ставит под угрозу нормальное функционирование всего предприятия и может привести к локальным аварийным ситуациям. Применение системы комплексного диагностического мониторинга (СКДМ) позволяет проводить оценку технического состояния и определять срок безопасной эксплуатации факельных установок без вывода их из эксплуатации, что позволяет значительно увеличить срок непрерывной эксплуатации сепарационного оборудования (с 2 до 8 лет), при этом на данных объектах обеспечивается достаточный уровень безопасности, соответствующий требованиям действующей нормативно-технической документации в области промышленной безопасности [29].

По результатам выполненного при проведении технического диагностирования оборудования под давлением (в пределах его срока службы) неразрушающего и разрушающего контроля оформляют (на каждый метод контроля) первичные документы (протоколы, отчеты, заключения) по форме, установленной в специализированной организации, которые подписывают специалисты, выполнившие указанные работы.

На основании первичных документов составляется акт (технический отчет) о проведении технического диагностирования, неразрушающего и разрушающего контроля с приложением к нему документов по неразрушающему и разрушающему контролю. Акт (технический отчет) о проведении технического диагностирования, неразрушающего и разрушающего контроля подписывается руководителем проводившей их организации и прикладывается к паспорту оборудования под давлением. Сведения о результатах и причинах проведения технического диагностирования, неразрушающего и разрушающего контроля записывает в паспорт оборудования уполномоченный представитель организации, их проводившей, или специалист эксплуатирующей организации, ответственный за исправное состояние и безопасную эксплуатацию оборудования [18].

Проведем анализ и изучение современных технологий, методов и средств для решения задач магистерской диссертации. Тема магистерской диссертации «Исследование и разработка эффективных методов обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем».

Метод имитационного моделирования, является инструментом обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем, поскольку с помощью построения полей, можно определить потенциальный территориальный риск [29]. Имитационное моделирование как общий универсальный метод обладает следующими преимуществами:

- дает возможность решать более сложные задачи;
- позволяет произвести исследование особенностей функционирования реальной системы в различных условиях, включающих критические и аварийные;
- значительно сокращает стоимость и продолжительность испытаний по сравнению с реальным экспериментом, с физическим моделированием;
- дает возможность включать результаты реальных испытаний компонентов реальной системы;
- позволяет достичь лучшие решения за счет гибкости и легкости варьирования структуры, алгоритмов и параметров;
- является единственным практически реализуемым методом, предназначенным для исследования сложных систем с целью обеспечения безопасности.

Методы анализа риска. Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах, в том числе, нефтегазового хозяйства, как руководство по обеспечению промышленной безопасности утверждены Приказом Ростехнадзора № 387 от 03.11.2022 [16]. В документе описаны этапы проведения анализа риска аварий, общая схема анализа опасностей и оценки риска аварий на ОПО, основные

рекомендуемые способы установления степени опасности аварий на ОПО и определения наиболее аварийно-опасных составных частей ОПО и т.п.

Оценить риск можно с помощью метода построения деревьев событий, метод «события - последствия», метод «деревьев отказов», методы индексов опасности и т.п. [42].

Рассмотрим методы и средства автоматизации. Безопасная эксплуатация факельных систем на нынешнем уровне невозможна без применения элементов автоматизированного управления с подключением датчиков и промышленных контроллеров. При этом не исключается и ручной режим управления – как минимум он предусматривается в качестве опционального. Операторские пульта все еще несут большую ответственность в процессах регуляции работы факельных установок, отслеживая их параметры и диагностические показатели. Вместе с этим совершенствуются и конструкции горелок со стволами, образующими факельную инфраструктуру. Изготовители применяют все более надежные материалы с жаростойкими покрытиями и высокой механической стойкостью. Все это позволяет оптимизировать общие процессы работы нефтегазовых предприятий на должном уровне безопасности и защиты окружающей среды.

Объектом управления является факельный сепаратор, в сепараторе осуществляется замер уровня нефти, температуры, давления, а в трубопроводах – давления на всасывании насосного агрегата, расход на всасывающем и нагнетающем коллекторе, исполнительными устройствами являются клапаны с электроприводом. Таким образом, для обеспечения безопасной эксплуатации, необходима система автоматизированного управления факельными системами. Специфика каждой конкретной системы управления определяется используемой на каждом уровне программно-аппаратной платформой.

Проведем анализ современных производственных технологий и методов обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем.

Факельные системы остаются неотъемлемой частью нефтегазовой и химической промышленности, но их проектирование и эксплуатация постоянно эволюционируют под влиянием экологических требований, цифровизации и новых технических решений.

Повышенное внимание безопасности и надежности факельных установок необходимо обеспечивать на предприятиях нефтегазового хозяйства независимо от типа системы. Современные производственные технологии обеспечения безопасной эксплуатации ФУ представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Современные производственные технологии обеспечения безопасной эксплуатации ФУ в аспекте промышленной и экологической безопасности

Технология	Описание
Закрытые (камерные) факельные системы	Принцип работы: газы сжигаются в изолированной камере с принудительной подачей воздуха, что снижает тепловое и шумовое воздействие. Преимущества технологии заключается в минимизации выбросов сажи и токсичных газов (NOx, CO) и в возможности рекуперации тепла для генерации энергии. Данные технологии используют компании Zeeco (США), John Zink (Германия) [24].
Системы рекуперации факельных газов	Принцип работы: преобразование газа в электроэнергию, сжижение газов, технологии LNG для попутного нефтяного газа (ПНГ). Преимущества заключаются в снижении объёмов сжигания на 30–50%, соответствие принципам ESG.
Термические окислители	Применяют для дожигания токсичных газов (например, сероводорода). Особенности: использование каталитических слоёв для снижения температуры реакции, автоматический контроль подачи воздуха.
Гибридные системы	Принцип работы: комбинация открытых факелов с системами улавливания газа, позволяющая переключаться между режимами в зависимости от нагрузки.

Рассмотрим методы обеспечения безопасности эксплуатации ФУ (таблица 17).

Таблица 17 – Методы обеспечения безопасности эксплуатации ФУ

Метод	Описание способов и средств
Автоматизация и цифровизация	IoT-датчики. Осуществляют мониторинг параметров (давление, температура, состав газа) в реальном времени (например, системы Emerson Rosemount Flare Gas Analyzer) [18].
	AI-алгоритмы. Осуществляют прогнозирование затухания пламени или обратного удара на основе анализа исторических данных. Использование цифровых двойников для моделирования аварийных сценариев.
Усовершенствованные системы защиты	Пламегасители нового поколения: многослойные металлокерамические конструкции, устойчивые к высоким давлениям.
	Гидрозатворы с автоматическим дренажем предотвращают замерзания жидкости в зимний период.
Экологически ориентированные решения	Впрыск пара/азота: снижение образования сажи на 40–60% (технология Steam-Assisted Flaring) [21].
	Каталитические нейтрализаторы. Окисление несгоревших углеводородов до CO ₂ и воды.
Управление рисками	HAZOP-анализ позволяет выявлять уязвимости на этапе проектирования [6].
	FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) позволяет оценивать последствия отказов оборудования (например, поломка пилотной горелки) [4].

Проблематика внедрения технологий по безопасной эксплуатации факельных систем заключается в технических сложностях: высокая стоимость внедрения рекуперационных систем (CAPEX до 5 млн долларов за установку), коррозия материалов в агрессивных средах (например, при сжигании сернистых газов), а также недостаточная подготовка персонала [43].

Таким образом, современные технологии и методы обеспечения безопасности факельных систем направлены на:

- минимизацию экологического ущерба через рекуперацию газов и каталитическое дожигание;
- повышение надёжности за счёт цифровизации и новых материалов;
- снижение эксплуатационных рисков благодаря предиктивной аналитике и дублированию критических узлов.

Рассмотрим анализ современных производственных технологий и методов обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем с точки зрения охраны труда и производственной безопасности

Факельные системы представляют значительные риски для персонала: тепловое излучение, шум, выбросы токсичных веществ, взрывоопасные ситуации [8]. Современные технологии и методы направлены не только на минимизацию экологического ущерба, но и на защиту здоровья работников. Рассмотрим ключевые аспекты через призму охраны труда (ОТ) и производственной безопасности (таблица 18).

Таблица 18 – Современные производственные технологии обеспечения безопасной эксплуатации ФУ в аспекте охраны труда и производственной безопасности

Технология	Описание эффекта
Закрытые (камерные) факельные системы	Снижение теплового излучения: изоляция пламени внутри камеры уменьшает тепловую нагрузку на персонал, работающий вблизи установки.
	Защита от шума: конструкция поглощает акустические колебания, снижая уровень шума до 20–30 дБ (предел по ГОСТ 12.1.003-83) [20].
Системы рекуперации газов	Устранение контакта с вредными веществами: улавливание и переработка газов вместо сжигания сокращает выбросы сероводорода, бензола и других токсинов.
	Экономия СИЗ: меньшая потребность в респираторах и защитных костюмах при обслуживании.
Автоматизированные системы мониторинга	IoT-датчики: контроль параметров (CO, H ₂ S, уровень радиации) в режиме реального времени предупреждает персонал о превышении ПДК.
	Дроны и роботы: обследование опасных зон без присутствия человека (например, проверка целостности факельного ствола).

Рассмотрим методы обеспечения безопасности персонала (таблица 19).

Таблица 19 – Методы обеспечения безопасности персонала

Технология	Описание
Инженерные решения	Теплоэкраны и барьеры (установка отражающих экранов из композитных материалов для защиты от теплового излучения)

Продолжение таблицы 19

Технология	Описание
	зонирование территории. Разделение на зоны с разным уровнем опасности: красная зона: запрет на нахождение персонала без спецдопуска; желтая зона: ограниченный доступ с СИЗ.
Средства индивидуальной защиты (СИЗ)	Термостойкая экипировка (спецодежда из материалов, выдерживающих температуру до 500°C).
	Аппараты ИВЛ и газоанализаторы для работы в условиях возможных утечек токсичных газов.
Противопожарные меры	Системы автоматического пожаротушения: водяные или пенные установки, активируемые при загорании.
	Пламегасители и гидрозатворы исключают распространение пламени в технологические линии.
Организационные решения	Обучение и подготовка персонала: отработка действий при авариях (например, затухание факела); курсы по первой помощи (обучение оказанию помощи при ожогах, отравлениях газом).
	Разработка и соблюдение регламентов и инструкции: оформление журналов допуска (фиксация времени нахождения работников в опасных зонах; аварийные процедуры (разработка четких алгоритмов эвакуации и отключения системы (например, при срабатывании датчика H ₂ S).
	Медицинский контроль: проведение регулярных медосмотров с целью выявления ранних признаков профессиональных заболеваний (по Приказу Минздрава № 29н) [14]; мониторинг состояния здоровья (использование носимых устройств (фитнес-трекеров) для отслеживания пульса и уровня стресса)

Опыт применения рассмотренных технологий и методов показывает их эффективность в обеспечении производственной безопасности. Например, в Компании BP (Великобритания) внедрение дронов для инспекции факелов на платформе Thunder Horse сократило риск травм при высотных работах на 70%. ПАО «Лукойл» (Россия) при осуществлении работ на Приобском месторождении использовали термостойкие костюмы торговой марки DuPont ProShield для работников, что снизило количество ожогов среди персонала. В Saudi Aramco (Саудовская Аравия) была внедрена система AI-предупреждений о превышении ПДК NOx уменьшила случаи отравлений на 40%.

Однако, не смотря на внедряемые мероприятия существует ряд проблем: термостойкие костюмы могут вызывать перегрев организма при

длительном использовании; наличие человеческого фактора, например нарушение инструкций (снятие респиратора для «быстрой проверки»); работа в экстремальных температурах повышает риск тепловых ударов и обморожений. В этой связи, перспективными могут быть следующие направления:

- биометрический мониторинг (датчики в касках и спецодежде, отслеживающие утомляемость и уровень стресса);
- искусственный интеллект может прогнозировать аварийные ситуации на основе анализа данных (например, риск обрушения конструкции);
- роботизация (полная замена персонала на роботов-операторов в красных зонах).

Безопасная эксплуатация технических систем, в том числе, ФУ, требует комплексного подхода, объединяющего прогнозирование рисков, мониторинг состояния оборудования и управление чрезвычайными ситуациями. В настоящее время, в отрасли, ориентир на увеличение сложности систем, ужесточение экологических норм, необходимость минимизации человеческого фактора – все это обуславливает потребность в инновационных технологиях. Рассмотрим обоснование предлагаемых методов и технологий по теме диссертации «Исследование и разработка эффективных методов обеспечения безопасной эксплуатации».

Проведем обоснование технологии применения закрытых (камерных) факельных систем. Закрытые (камерные) факельные системы – это инженерные решения, в которых процесс сжигания избыточных или опасных газов происходит в изолированной камере, а не в открытой атмосфере. Их применение обосновано рядом технологических, экологических и экономических преимуществ, особенно в условиях ужесточения экологических норм и требований к промышленной безопасности. Рассмотрим ключевые аргументы в пользу их использования. Во-первых, это экологический аспект безопасности:

- контроль выбросов;
- снижение вредных веществ, закрытая камера обеспечивает полное сгорание газов благодаря контролируемым условиям (температура, подача кислорода), что минимизирует образование токсичных продуктов неполного сгорания (СО, сажи, диоксинов);
- подавление шума и света, камера поглощает шум и экранирует пламя, снижая световое и акустическое загрязнение, что критично для предприятий вблизи населенных пунктов;
- сокращение углеродного следа, оптимизация процесса горения уменьшает выбросы CO₂ и метана, способствуя выполнению целей ESG (Environmental, Social, Governance).

Например, на нефтехимическом заводе в Германии, внедрение камерной системы снизило выбросы NO_x на 40% по сравнению с открытым факелом.

Следующим аспектом, являющимся обоснованием применения закрытых факельных систем, является повышение промышленной безопасности:

- изоляция пламени, ограничение горения внутри камеры исключает риск распространения огня на соседние объекты, что критично для предприятий с высокой пожароопасностью (нефтепереработка, химическая промышленность);
- защита от внешних факторов. Камера предотвращает попадание дождя, ветра или посторонних предметов, которые могут нарушить процесс горения в открытых системах.
- снижение риска взрывов – контроль над смесеобразованием и температурой минимизирует вероятность обратной вспышки (flashback) или детонации.

Кроме того, применение технологии закрытых факельных систем обеспечивает технологическую эффективность; высокий КПД утилизации, поскольку камерные системы обеспечивают сжигание 99,9% газов за счет

принудительной подачи воздуха/пара и многоступенчатого горения; гибкость работы, возможность обработки газов с переменным составом и низкой теплотворной способностью, которые сложно сжигать в открытых факелах; интеграция с системами мониторинга (датчики внутри камеры передают данные в режиме реального времени для анализа (например, через цифровые двойники), что позволяет оперативно корректировать процесс).

Закрытые факельные системы соответствуют требованиям директив ЕС (например, IED – Industrial Emissions Directive), стандартам EPA (США) и ГОСТ Р (Россия) по предельно допустимым выбросам, на основании Постановления Правительства РФ от 22.01.2024 № 39 [11], Приказа Ростехнадзора от 22.12.2021 № 450 [17], Приказа Росприроднадзора от 20.08.2024 № 427 [13], Приказа Минприроды России от 05.08.2013 № 274 [12].

Таким образом, закрытые факельные системы – это современное решение для промышленных предприятий, ориентированных на устойчивое развитие, безопасность и соблюдение экологических норм. Их применение не только снижает риски аварий и негативное воздействие на окружающую среду, но и повышает экономическую эффективность за счет оптимизации ресурсов и сокращения издержек. В условиях глобального перехода к «зеленой» экономике такие системы становятся не просто предпочтительными, а обязательными для ответственных игроков рынка.

Приведем обоснование применения системы рекуперации факельных систем. Система рекуперации – это технология улавливания и повторного использования газов, которые традиционно сжигаются в факелах. Внедрение таких систем обосновано необходимостью минимизировать экологический ущерб, повысить экономическую эффективность производства и соответствовать глобальным трендам устойчивого развития. Рассмотрим ключевые аргументы в пользу их применения.

Экологические преимущества технологии:

- сокращение выбросов парниковых газов;

- устранение сжигания на факелах, рекуперация предотвращает выбросы CO_2 , метана (CH_4) и сажи, которые образуются при горении газов. Например, факелы в нефтегазовой отрасли ежегодно выбрасывают свыше 400 млн тонн CO_2 -эквивалента;
- снижение углеродного следа, переработка газов вместо их уничтожения позволяет предприятиям сократить углеродный след на 60–90%;
- минимизация токсичных выбросов. Рекуперация исключает образование побочных продуктов неполного сгорания: оксидов азота (NO_x), серы (SO_x) и летучих органических соединений (ЛОС), опасных для здоровья человека и экосистем.

Экономическая эффективность применения технологии рекуперации заключается в возврате ресурсов в производственный цикл, использование газа как сырья или топлива (попутный нефтяной газ (ПНГ) может быть направлен на генерацию электроэнергии для нужд предприятия). Продажа продуктов переработки: сжиженный природный газ (СПГ), сухой газ или газовый конденсат становятся дополнительным источником дохода. Кроме того, экономический эффект, позволяет сокращать затраты, экономить на штрафах и избегать санкций за превышение квот на выбросы (например, в рамках системы EU ETS), а утилизация ПНГ предотвращает потерю до 30% добываемых углеводородов.

Таким образом, технология рекуперации факельных газов – это не просто экологическая необходимость, но и стратегический инструмент повышения рентабельности предприятий. Они позволяют трансформировать отходы в ресурсы, сократить операционные расходы и укрепить репутацию компании как ответственного участника глобального рынка. В условиях ужесточения климатической политики и роста цен на энергоносители инвестиции в рекуперацию становятся обязательным элементом долгосрочной конкурентоспособности.

Проведем обоснование применения гибридных систем в факельных установках для обеспечения безопасности. Гибридные системы в факельных установках – это интеграция различных технологий (например, закрытого сжигания, рекуперации газов, цифровых двойников и систем автоматизации), направленная на повышение безопасности, экологичности и экономической эффективности. Их использование особенно актуально в условиях ужесточения экологических норм, роста требований к промышленной безопасности и необходимости оптимизации ресурсов. Рассмотрим ключевые аргументы в пользу гибридных решений.

Во-первых, данная технология позволяет обеспечивать комплексное обеспечение безопасности:

- сочетание методов контроля рисков: закрытое сжигание + рекуперация: газы, которые нельзя утилизировать, безопасно сжигаются в изолированной камере, предотвращая утечки и возгорания, а часть газов возвращается в производственный цикл (например, для генерации энергии), снижая объемы сжигания;
- цифровые двойники + IoT-датчики позволяют проводить мониторинг параметров (температура, давление, состав газов) в режиме реального времени и прогнозировать аномалии (утечки, риск обратной вспышки) и автоматическое переключение между режимами работы.

Также, гибридные системы адаптируются к изменениям объемов и состава газов (например, при запуске/остановке оборудования, аварийных сбросах) и позволяют осуществлять автоматическое перераспределение потоков: при пиковых нагрузках избыток газов сжигается в закрытой камере, а в штатном режиме утилизируется.

Гибридные технологии интегрируются с системами управления. Совместимость с SCADA, ERP и системами предиктивной аналитики для оптимизации работы в реальном времени. Например, в НПЗ в Техасе гибридная система автоматически переключается между рекуперацией и

факелом в зависимости от содержания сероводорода (H_2S), предотвращая коррозию оборудования.

Современные технологии и методы обеспечения безопасности факельных систем с точки зрения охраны труда направлены на исключение прямого контакта персонала с опасными факторами (тепло, газ, пламя); снижение профессиональных рисков через автоматизацию и использование СИЗ нового поколения; повышение культуры безопасности за счет обучения и цифровых инструментов контроля.

Таким образом обоснование технологии базируется на сочетании теоретической глубины (моделирование, алгоритмы) и практической ориентированности (внедрение в промышленность, тестирование на реальных объектах).

Проведем анализ проектных методов и решений по обеспечению безопасной эксплуатации факельных систем. Проектирование факельных систем является ключевым этапом, определяющий их надежность, экологичность и безопасность. Современные методы и решения направлены на минимизацию рисков аварий, защиту персонала и окружающей среды. Рассмотрим основные подходы и инновации.

Основными принципами проектирования являются соблюдение нормативных и технических требований к системам, а также применение риск-ориентированного подхода. На этапе проектирования необходимо осуществлять анализ рисков с целью выявления потенциальных угроз (например, обратный удар пламени, накопление жидкости) и их последствий, а также для расчета вероятности аварий и масштаба ущерба для определения приоритетных мер защиты.

Метод HAZOP (Hazard and Operability Study) описан в ГОСТ Р 27.012-2019 (МЭК 61882:2016), это метод исследования опасности и работоспособности [7]. HAZOP применяется для повышения уровня безопасности при эксплуатации промышленного объекта. По своей сути метод HAZOP – это исследование степени устойчивости объекта к

искусственно смоделированным отклонениям. Под отклонениями подразумеваются все мыслимые отклонения характеристик от номинальных. Они позволяют моделировать системные сбои, работу в аварийных эксплуатационных режимах, нежелательные действия и т. п. Задачи метода HAZOP:

- провести раннюю идентификацию возможных отклонений как источников потенциальных опасностей и обеспечить возможность своевременно реагировать на них;
- определить причины и последствия отклонений, масштабов и зон воздействия опасностей, связанных с ними;
- выявить неясности и неточности в инструкциях по безопасности и способствовать их улучшению;
- выработать рекомендации по недопущению отклонений, а при их появлении смягчить последствия путём внесения в проект необходимых корректировок;
- убедиться в полном отсутствии остаточных рисков на финальной стадии создания проекта [7].

Метод HAZOP выполняется группой специалистов под руководством лидера, который гарантирует всесторонний анализ системы на основе логических и аналитических заключений. QRA (Quantitative Risk Assessment) описан в Приказе Ростехнадзора от 03.11.2022 № 387 [16]. Это систематический метод анализа рисков, основанный на численных расчетах вероятности возникновения опасных событий и масштаба их последствий. Он применяется в промышленности (нефтегаз, химия, энергетика) для принятия обоснованных решений по управлению безопасностью. Основные этапы QRA:

- идентификация опасностей. Выявление потенциальных угроз (например, разгерметизация трубопровода, взрыв факела);
- оценка частоты событий. Расчет вероятности возникновения аварии на основе статистики, моделирования или экспертных оценок;

- анализ последствий. Моделирование сценариев (тепловое излучение, выброс токсичных газов, взрывная волна) с помощью инструментов (CFD (Computational Fluid Dynamics) для газодинамики, DNV Phast или ALOHA для оценки зон поражения);
- расчет риска. Интеграция частоты и последствий (индивидуальный риск: вероятность гибели человека в год (например, 1×10^{-6} смертей/год); социальный риск: F-N кривые, показывающие зависимость частоты событий от числа пострадавших);
- сравнение с критериями приемлемости. Использование нормативов (например, ГОСТ Р 51901.23-2012) для определения допустимого уровня риска [4].

В случае возникновения аварий необходимо производить расследование на выявление причин возникновения. Порядок проведения технического расследования причин аварий, инцидентов и случаев утраты взрывчатых материалов промышленного назначения регламентирован Приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 503 [15].

Этапы расследования аварий на факельных системах:

- первичный осмотр и обеспечение безопасности;
- сбор данных и документации;
- техническая экспертиза оборудования;
- реконструкция событий;
- определение корневой причины;
- составление отчета и рекомендаций.

Рассмотрим подробно проведение каждого этапа.

В рамках проведения первого этапа «Первичный осмотр и обеспечение безопасности», в-первую очередь, необходимо осуществить изоляцию зоны аварии: отключить подачу газа, заблокировать клапаны и эвакуировать персонала. Далее необходимо провести первичную оценку рисков: проверить наличие возможных утечек, токсичных газов, остаточного горения и зафиксировать документально ситуацию с помощью фото- и видеосъемки.

Зарегистрировать видимые повреждения, положения оборудования, следы горения/взрыва.

Следующим этапом необходимо произвести сбор данных и документации. Провести анализ технической документации: проектных схем, журналов обслуживания, протоколов последних проверок. Опросить операторов, свидетелей аварии на предмет – что происходило в момент до и во время инцидента, какие действия персонала могли повлечь за собой возникновение аварии. Также необходимо зафиксировать данные автоматики: извлечь данных с систем контроля (SCADA, датчики давления, температуры, расходомеры).

Далее необходимо провести техническую экспертизу оборудования:

- провести визуальный осмотр: выявить факты коррозии, трещин, деформаций факельной головки, трубопроводов, сепараторов;
- провести лабораторный анализ, исследование материалов на износ, химический состав газа/жидкости в момент аварии;
- проверить системы безопасности, осуществить тестирование клапанов, систем зажигания, сигнализаторов загазованности.

Для того чтобы понять причины, в результате которых произошла аварийная ситуация, необходима реконструкция событий с помощью моделирования и хронологии событий. Моделирование осуществляют с помощью специализированных программ, например, ANSYS Fluent, для анализа распределения газа, теплового излучения, взрывоопасных зон. Хронологию событий можно провести с помощью построения временной шкалы на основе данных автоматики и показаний свидетелей.

Определение корневой причины, как правило осуществляют с помощью методов анализа, таких как: «5 Why (5 Почему)» - последовательное выявление причинно-следственных связей, диаграмма Исикавы – классификация факторов (оборудование, персонал, процессы, среда), FMEA (Анализ видов и последствий отказов) для оценки рисков и уязвимостей системы. Преимущества методов: позволяют структурировать

все возможные причины по категориям, выявляет не только технические, но и организационные недостатки (например, пропуск ТО), наглядно демонстрирует взаимосвязь факторов, которые привели к аварии.

Данные FMEA дополняют диаграмму Исикавы (например, категория «персонал» для ошибки закрытия клапана). Таким образом, FMEA не только помогает найти корневую причину аварии (например, человеческий фактор при работе с клапаном), но и предлагает конкретные решения для снижения рисков. Метод особенно эффективен в сочетании с данными расследования (журналы ТО, показания датчиков).

После выявления корневой причины, необходимо составить отчет и рекомендации, задокументировать результаты расследования в соответствии с Приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 503 [15]: оформить акт расследования для регуляторов (Ростехнадзор, экологические службы).

При расследовании инцидентов, связанных с авариями на факельных системах, применяют различные способы и инструменты выявления причин.

К методам неразрушающего контроля (НК) относятся:

- ультразвуковая дефектоскопия для обнаружения микротрещин в трубопроводах;
- термография для выявления перегревов или холодных зон в факельной системе;
- визуальный и эндоскопический осмотр для проверки внутренних поверхностей оборудования.

Для определения состава газа в момент аварии (наличие примесей, кислорода) применяют химико-аналитические исследования, газовую хроматографию. Для анализа отложений изучают продукты коррозии или коксования в факельной головке.

Метод имитационного моделирования применяют для расчета аэродинамики факела, зон воспламенения (CFD -моделирование) и оценки последствий детонации скопившегося газа (взрывозащитный анализ). Аудит процессов и человеческого фактора применяют для проверки соблюдения

регламентов: соответствуют ли действия персонала инструкциям (например, процедуры запуска/остановки), выявления системных проблем (недостаток обучения, игнорирование предупреждений).

К ключевым проектным решениям относят инженерные технические решения, применение систем автоматизации, цифровое, модульное проектирование (таблица 20).

Таблица 20 – Ключевые проектные решения

Проектные решения	Описание
Инженерные решения	Выбор материалов. Жаропрочные стали (например, AISI 310S) с керамическим покрытием для факельных стволов. Коррозионностойкие сплавы (Hastelloy) для газов с высоким содержанием сероводорода.
	Конструктивные особенности. Пламегасители: Многослойные сетки или кассетные конструкции для гашения пламени. Гидрозатворы: Предотвращение проскока огня в трубопроводы, автоматический дренаж жидкости.
	Высота факела: Расчет по формуле $H = 0.6\sqrt{Q}$, где Q – тепловая мощность (в МВт), для снижения теплового воздействия.
Системы автоматизации	SCADA-системы. Управление клапанами, мониторинг давления и температуры в режиме реального времени.
	Резервирование критических узлов. Дублирование пилотных горелок, датчиков пламени и источников питания.
Экологическая оптимизация	Рекуперация газов [23]. Интеграция систем улавливания для повторного использования ПНГ.
	Технологии дожигания. Впрыск пара или азота для снижения выбросов NOx и сажи.
Цифровое моделирование	CFD-анализ (Computational Fluid Dynamics). Моделирование газодинамики факела для оптимизации рассеивания выбросов.
Цифровые двойники	Виртуальные копии системы для тестирования аварийных сценариев (например, обрыв факельного ствола).
Модульное проектирование	Префабрикованные установки. Сборка факельных систем из стандартных модулей, что сокращает сроки монтажа и ошибки.
Адаптивные решения	Гибридные факелы. Комбинация открытых и закрытых систем для работы с переменным составом газов.

Современные проектные методы и решения для факельных систем направлены на:

- предупреждение аварий через анализ рисков и резервирование систем;

- снижение экологического ущерба с помощью рекуперации газов и дожигания;
- повышение адаптивности к изменяющимся условиям эксплуатации.

Проведем обоснование проектных методов и решений по обеспечению безопасной эксплуатации факельных систем. Метод системного анализа и моделирования предусматривает диагностику и прогнозирование отказов: Использование машинного обучения для анализа данных с датчиков в режиме реального времени, например, нейросетевые модели для предсказания износа узлов оборудования факельных систем, на основе вибрации, температуры и нагрузок, позволит предотвратить аварийные ситуации.

Метод системного анализа и моделирования предусматривает моделирование рисков: применение методов анализа деревьев отказов (FTA – ГОСТ Р 27.302-2009) [6] и событий (ETA – ГОСТ Р МЭК 62502-2014), для оценки вероятности аварийных сценариев [3].

Дерево отказов является дедуктивным методом анализа, направленным на выявление причин конкретного нежелательного события (вершины дерева). Он использует логические операции («И, ИЛИ») для моделирования комбинаций отказов компонентов, ошибок или внешних факторов, которые могут привести к критическому сбою. Основное событие отказа (например, «возгорание факельных систем»):

- «И» – все нижележащие события должны произойти одновременно;
- «ИЛИ» – достаточно возникновения одного из событий;
- базовые события – нераскладываемые причины (например, «отказ датчика»);
- промежуточные события – комбинации базовых событий через логические вентили.

Дерево событий является индуктивным методом, анализирующим возможные последствия исходного события (например, аварии). Оно моделирует различные сценарии развития ситуации, учитывая

последовательность решений, реакций системы или внешних условий.

Например, исходное событие – «разрыв трубопровода»:

- ветвь 1 – сработал аварийный клапан – утечка остановлена;
- ветвь 2 – клапан не сработал – возгорание – взрыв.

Применение технологии системного анализа и моделирования рисков предусматривает: оценку эффективности систем безопасности факельных систем, прогнозирование масштабов последствий.

Рассмотрим ключевые различия методов анализа деревьев отказов и событий (таблица 21).

Таблица 21 – Ключевые различия методов анализа деревьев отказов и событий

Критерий	Дерево отказов	Дерево событий
Направление	Дедуктивное (от события к причинам)	Индуктивное (от события к последствиям)
Цель	Поиск причин отказа	Анализ развития сценариев
Логика	Обратная (почему произошло?)	Прямая (что произойдет дальше?)
Временная ось	Статическая (причины не упорядочены)	Динамическая (последовательность шагов)

Преимущества методов:

- FTA позволяет выявить скрытые уязвимости системы, оптимизировать резервирование компонентов;
- ETA помогает разработать планы действий в ЧС, оценить ресурсы для ликвидации последствий.

FТА и ЕТА часто используются вместе. Например, FТА определяет вероятность исходного события, а ЕТА моделирует его последствия, что дает полную картину рисков. Эти методы являются ключевыми инструментами в инженерии безопасности, управлении проектами и оценке рисков для сложных технических систем.

Технология цифровых двойников заключается в создании виртуальных копий физических объектов для тестирования сценариев эксплуатации,

оптимизации режимов работы и оценки последствий внештатных ситуаций. Применение цифровых двойников в факельных системах позволяет обеспечивать следующие аспекты безопасности:

- мониторинг в реальном времени, сбор данных (датчики на факельных установках передают информацию о температуре, давлении, составе газов, скорости горения и состоянии оборудования), визуализацию (цифровой двойник отображает текущие параметры работы системы, включая аномалии (например, утечки, неполное сгорание));
- предиктивная аналитика и прогнозирование позволяет прогнозировать отказы. Алгоритмы на основе исторических данных и текущих показателей предсказывают износ компонентов (например, форсунок, горелок) или риск засорения;
- оптимизация процессов позволяет управлять эффективностью горения (анализ состава газовой смеси и корректировка параметров для минимизации вредных выбросов (NO_x, SO_x));
- обеспечение энергоэффективности посредством автоматической настройки подачи пара или воздуха для полного сгорания газов;
- обучение персонала и отработка ЧС. Тренажеры на основе цифрового двойника: Сотрудники обучаются управлять факельной системой в виртуальной среде, моделируя аварии (например, утечка газа, отказ клапанов);
- симуляция аварийных сценариев, отработка действий при пожарах, взрывах или выбросах токсичных веществ.

Современные технологии управления направлены на минимизацию человеческого фактора, прогнозирование аварий и оперативное реагирование.

Рассмотрим ключевые решения и их особенности (таблица 22).

Таблица 22 – Ключевые решения технологий управления по обеспечению безопасной эксплуатации факельных установок и их особенности

Технологии управления	Описание
Автоматизированные системы контроля	SCADA-системы (Supervisory Control and Data Acquisition). Функционал: управление клапанами, горелками, системами подачи пара/воздуха; сбор данных с датчиков (давление, температура, состав газа) в режиме реального времени.
	Предиктивная аналитика: AI-алгоритмы (прогнозирование износа оборудования на основе анализа вибраций, температурных аномалий); цифровые двойники: Моделирование сценариев (например, перегрузка факела) для оптимизации управления.
	Системы аварийного отключения. Принцип работы: автоматическое прекращение подачи газа при критических отклонениях (падение давления, утечка).
Технологии мониторинга	Дистанционные датчики: лазерные газоанализаторы (TDLAS): Обнаружение CH ₄ , H ₂ S на расстоянии до 500 м; тепловизоры: контроль целостности факельного ствола и распределения температуры.
	Дроны и робототехника: инспекция высотных конструкций без риска для персонала; отбор проб газа в опасных зонах.
	IoT-платформы. Интеграция данных: передача информации с датчиков в облачные системы (например, Microsoft Azure IoT); генерация уведомлений о превышении ПДК или температурных порогов.
Организационные технологии управления	Обучение персонала.
	Управление документацией. Цифровые платформы: система для ведения журналов ТО, сертификатов оборудования; учет инцидентов и анализ их причин.

У представленных технологий управления имеются недостатки, к ним можно отнести следующее:

- уязвимость автоматизированных систем к кибератакам (например, взлом SCADA);
- сложность подключения старых факелов к современным IoT-платформам;
- ошибки операторов при переопределении автоматических решений.

Перспективными являются направления: блокчейн для аудита (прозрачная фиксация данных мониторинга и действий персонала); автономные роботы (роботы-ремонтники для устранения утечек без участия человека (например, Boston Dynamics Spot); квантовые вычисления

(ускорение обработки данных с тысяч датчиков для мгновенного принятия решений).

Таким образом, современные технологии управления безопасностью факельных установок включают: автоматизацию (SCADA, ESD) для минимизации ручного вмешательства; предиктивную аналитику на базе AI и цифровых двойников; дистанционный мониторинг с использованием дронов и IoT.

К ключевым трендам в данной области можно отнести переход от реактивного к проактивному управлению, где риски устраняются до их реализации. Эффективное управление безопасностью снижает эксплуатационные риски, повышает производственную, промышленную и экологическую безопасность.

Технология адаптивных систем управления позволяет внедрять алгоритмы автоматического регулирования параметров системы (например, давления, скорости) с учетом текущего состояния оборудования и внешних условий.

Формирования единой аналитической среды как средства управления, решает технология объединения данных из разнородных источников (IoT-датчики, ERP-системы, метеоданные) с применением Big Data-платформ. Ключевыми инновациями в данных аспектах являются:

- гибридные алгоритмы, комбинация физических моделей (например, уравнений термодинамики) с ML для повышения точности прогнозирования;
- обработка данных на периферийных устройствах (без передачи в облако) для сокращения задержек при критических отказах;
- квантовые методы оптимизации, применение квантовых алгоритмов для решения задач распределения ресурсов в условиях неопределенности.

Единая аналитическая среда как средство управления позволяет снижать аварийность на нефтеперерабатывающих заводах, уменьшать

количество внеплановых остановок на 30% и повышать безопасность оборудования.

Адаптивная система управления воздушно-топливным соотношением в факельных системах позволяет снижать сажеобразование на 50%, КПД сжигания 99.8% против 85% в традиционных системах.

Сравнительный анализ традиционных технологий управления и адаптивной системы управления (AI-управление) воздушно-топливным соотношением в факельных системах представлен в таблице 23.

Таблица 23 – Сравнительный анализ традиционных технологий управления и адаптивной системы управления воздушно-топливным соотношением

Критерий	Ручное управления	AI-контроллер
КПД сжигания	85%	99,8%
Выбросы сажи (г/м ³)	50	25
Энергопотребление	Высокое	Низкое

Управление безопасностью эксплуатации факельных систем посредством обучения и повышения квалификации персонала с помощью традиционных методов управления предусматривает теоретическое обучение и редкие учения на реальном оборудовании и высокий риск ошибок при реальных ЧС.

Обучение с помощью VR-тренажеров позволит:

- отработать более 20 аварийных сценариев без риска для оборудования;
- сократить время реакции персонала на 40%;
- снизить количество ошибок на 60%.

Сравнительный анализ традиционных методов и с помощью VR-тренажеров представлено в таблице 24.

Таблица 24 – Сравнительный анализ традиционных методов и с помощью VR-тренажеров

Критерий	Традиционное обучение	VR-тренажеры
Время реакции	10 минут	6 минут
Успешность действий	70%	95%

В качестве примера можно привести практику применения обучения персонала с помощью VR-тренажеров на платформе в Северном море, где VR-тренировки сократили количество аварий по вине персонала на 50%.

Итоговый сравнительный анализ эффективности решений представлен в таблице 25. Данные взяты из открытых источников интернет.

Таблица 25 – Итоговый сравнительный анализ эффективности инновационных решений

Решение	Снижение выбросов	Сокращение аварий	Окупаемость
IoT, цифровые двойники	25%	30%	2 года
Гибридные, комплексные системы	70%	45%	3 года
AI-управление	40%	20%	2,5 года
VR-тренажеры	-	50%	1 год

Предложенные решения демонстрируют преимущества перед традиционными методами по всем ключевым параметрам. С точки зрения экологии – снижение выбросов CO₂ на 25–70%, NO_x на 50%. С точки зрения безопасности – происходит уменьшение вероятности аварий на 30–90%. Экономическая выгода заключается в относительно быстрой окупаемости – около 1–4 года за счет сокращения штрафов, ремонтов и возврата ресурсов.

Комплексное внедрение всех решений обеспечит синергетический эффект. Например, интеграция IoT с гибридной системой и VR-тренажерами повысит безопасность на 80% и окупится за 3–5 лет [31]. Данный метод является дорогостоящим и относится к организационным мероприятиям. Рассмотрим инженерные решения.

Метод обеспечения безопасной эксплуатации ФУ с использованием струйного затвора. Струйный затвор (гидрозатвор) применяется для предотвращения выбросов газа, жидкости или пыли при эксплуатации технологического оборудования, трубопроводов, резервуаров и других объектов. Он обеспечивает безопасность за счет создания водяной или иной жидкостной преграды, блокирующей распространение опасных веществ.

Принцип работы струйного затвора заключается в следующем: затвор создает динамическую или статическую водяную завесу, которая: поглощает или нейтрализует вредные вещества (газы, аэрозоли); охлаждает и снижает давление в аварийных ситуациях; предотвращает воспламенение горючих сред.

Установка струйного затвора монтируется на выходе потенциально опасных потоков (газоходы, аварийные клапаны), подключается к системе подачи воды или нейтрализующей жидкости. Предусмотрено два режима работы:

- постоянный – непрерывное создание завесы, например, в зонах с постоянной опасностью выбросов;
- аварийный – автоматическое включение при срабатывании датчиков, например, при загазованности или повышении температуры.

Датчики давления, температуры и состава среды активируют затвор, возможна интеграция с АСУ. Преимущества метода:

- быстрое реагирование на аварийные ситуации;
- эффективное подавление взрывоопасных и токсичных сред;
- отсутствие механических изнашиваемых элементов;
- простота обслуживания.

Для обеспечения безопасной эксплуатации необходима регулярная проверка форсунок и системы подачи жидкости, контроль давления и расхода воды, защита от замерзания (для наружных установок). Таким образом, использование струйного затвора повышает уровень

промышленной безопасности, минимизируя риски аварийных выбросов. Метод особенно эффективен в сочетании с другими средствами защиты (предохранительные клапаны, газоанализаторы). Для внедрения необходимо учитывать специфику объекта и проводить расчет параметров затвора (расход жидкости, давление, высота завесы).

Выводы: особенности безопасной эксплуатации факельных систем связаны с необходимостью балансировать между технологической эффективностью, экологическими ограничениями и требованиями промышленной безопасности. Ключевыми элементами являются: непрерывный контроль параметров горения, применение специализированных инженерных решений, строгое соблюдение нормативов и проактивное управление рисками, внедрение инноваций для минимизации экологического ущерба. Модернизация факельных установок решает комплекс задач — от экологии до цифровизации. Она позволяет предприятиям сократить углеродный след, избежать штрафов, снизить риски аварий и повысить рентабельность за счет утилизации ресурсов.

Сценарии аварий на факельных системах вызывают как внутренние и внешние причины. Расследование аварий на факельных системах требует междисциплинарного подхода, сочетающего инженерный анализ, работу с данными и оценку человеческого фактора. Обеспечение безопасной эксплуатации факельных систем снижает вероятность возникновения непредвиденных ситуаций и аварийных ситуаций, что ведет к минимизации рисков для окружающей среды и здоровья людей. Анализ методов показал, что наиболее оптимальным является метод обеспечения безопасной эксплуатации ФУ с использованием струйного затвора.

3 Анализ и оценка эффективности внедрения метода обеспечения безопасной эксплуатации с использованием струйного затвора

3.1 Анализ факельной системы

Факельные системы открытого типа обеспечивают безопасное и стабильное горение в широком интервале расходов газов и паров. Уникальная конструкция факельных оголовков со струйным затвором препятствует попаданию атмосферного воздуха внутрь факельного ствола и коллектора исключая внутреннее горение.

Бездымная утилизация факельных газов обеспечивается, как правило, для постоянных и периодических сбросов за счет применения специальной конструкции факельных оголовков, а также благодаря использованию дополнительных сред (принудительная подача воздуха, пара, вспомогательного газа). В зависимости от конструкции оголовка факельные системы делятся на следующие типы: бездымные с подачей воздуха, пара или вспомогательного газа, высокого/низкого давления, со скоростным оголовком, со специальными факельными оголовками со струйным затвором.

Для обеспечения безопасной и эффективной работы факельной системы со струйным затвором необходимо контролировать следующие параметры (таблица 26).

Таблица 26 – Контролируемые параметры

Параметры	Аспекты
Параметры газа	Давление газа на входе (до и после сепараторов): контроль для предотвращения превышения допустимых значений.
	Расход газа: обеспечение соответствия проектной нагрузке.
	Состав газа: содержание сероводорода ($H_2 S$), углеводородов, инертных компонентов.
	Температура газа: предотвращение конденсации или перегрева.
Параметры струйного затвора	Давление струйной среды (пара, газа, воды): поддержание уровня, необходимого для создания газодинамического барьера (обычно 8–15 бар для пара).

Продолжение таблицы 26

Параметры	Аспекты
	Расход струйной среды: оптимизация для минимизации энергозатрат и обеспечения защиты.
	Температура струйной среды: контроль перегрева пара или охлаждения воды.
	Состояние сопел: мониторинг засорения, коррозии или износа (косвенно через падение давления).
Параметры горения	Температура в зоне горения: поддержание 800–1200°C для полного сгорания.
	Состав дымовых газов: концентрация O ₂ , CO, NO _x , SO ₂ , несгоревших углеводородов.
	Видимость пламени: отсутствие дыма (индикатор неполного сгорания).
	Стабильность пламени: контроль пульсаций или затухания.
Параметры безопасности	Давление в факельном стволе: предотвращение обратной тяги или взрывов.
	Срабатывание аварийных клапанов: время закрытия (<2 сек), положение заслонок.
	Уровень жидкости в сепараторах: предотвращение попадания жидкости в факел.
	Состояние огнеупорной изоляции: тепловизионный контроль перегревов или повреждений.
Система управления и автоматизация	Работоспособность датчиков: датчики давления, температуры, газоанализаторы.
	Состояние PLC-контроллера: отслеживание ошибок в программном обеспечении.
	Резервирование систем: давление в резервных баллонах с инертным газом, готовность дублирующих насосов.
Внешние условия	Скорость ветра влияет на стабильность пламени и рассеивание выбросов.
	Температура окружающей среды: корректировка режима работы при экстремальных значениях.
	Влажность воздуха: учет при использовании парового затвора.
Энергетические параметры	Энергопотребление системы: расход электроэнергии, пара, воды.
	КПД сжигания: расчет на основе соотношения входного газа и выбросов.
Механические параметры	Вибрация факельной мачты: контроль для предотвращения усталостных разрушений.
	Состояние материалов: коррозия, термические деформации (визуальный или ультразвуковой контроль).

Регулярный мониторинг этих параметров позволяет минимизировать риски аварий, обеспечить экологическую безопасность и повысить энергоэффективность системы. Ключевые параметры (давление,

температура, состав газов) часто дублируются и интегрируются с системами аварийного отключения.

Оператор факельной установки со струйным затвором несет ответственность за безопасную и эффективную работу системы. Его обязанности включают следующие ключевые аспекты (таблица 27).

Таблица 27 – Обязанности оператора факельной установки

Функция	Аспекты	Показатели/действия
Контроль рабочих параметров	Мониторинг показателей в реальном времени	Давление, температура и расход газа на входе/выходе. Давление и расход струйной среды (пара, инертного газа или воды). Концентрация O ₂ , CO, NO _x и других компонентов в дымовых газах.
	Проверка стабильности пламени:	Отсутствие затухания, дыма или пульсаций.
	Контроль состояния оборудования:	Работоспособность датчиков, клапанов, системы ESD.
Управление системой	Запуск и остановка установки:	Включение пилотной горелки и основного факела. Переключение между резервными линиями подачи струйной среды.
	Регулировка параметров:	Настройка давления струйного затвора в зависимости от нагрузки. Корректировка соотношения газ/воздух для полного сгорания.
	Реакция на аварийные ситуации:	Активация аварийного отключения (ESD) при превышении критических значений (например, обратная тяга, утечка). Перекрытие клапанов, остановка подачи газа.
Техническое обслуживание	Ежедневный осмотр:	Проверка целостности факельной мачты, изоляции, креплений. Контроль уровня жидкости в сепараторах и дренажных системах.
	Очистка компонентов:	Удаление сажи, нагара с факельной головки. Прочистка сопел струйного затвора от засорений.
	Замена расходных элементов:	Фильтров, изношенных прокладок, термопар.
Документация и отчетность	Ведение журналов:	Фиксация параметров работы (давление, температура, аварийные события). Запись данных о техническом обслуживании и ремонтах.
	Составление отчетов:	Анализ эффективности сжигания, энергопотребления. Доклады о неисправностях и мероприятиях по их

Продолжение таблицы 27

Функция	Аспекты	Показатели
		устранению
Соблюдение норм безопасности	Выполнение инструкций:	Следование требованиям стандартов (API 537, ISO 25457, ГОСТ). Использование СИЗ (огнеупорная одежда, противогаз, каска).
	Участие в учениях:	Тренировки по действиям при утечках, пожарах, выбросах.
	Контроль зоны безопасности:	Предотвращение доступа посторонних лиц к факельной установке.
Взаимодействие с другими службами	Координация с лабораторией	Передача проб дымовых газов для анализа.
	Связь с ремонтными бригадами:	Организация планового ремонта или устранения аварий.
	Информирование руководства:	Доклад о критических отклонениях или необходимости модернизации оборудования.
Обучение и повышение квалификации	Изучение новых технологий:	Освоение обновлений в системе управления (SCADA, PLC).
	Аттестация	Подтверждение знаний норм безопасности и процедур эксплуатации.
Экологический контроль	Минимизация выбросов	Оптимизация режима горения для снижения эмиссии CO и сажи.
	Мониторинг окружающей среды	Проверка отсутствия токсичных веществ в воздухе рабочей зоны

Оператор факельной установки при эксплуатации системы должен обеспечивать безопасность и экологичность процесса. Он сочетает навыки работы с автоматизированными системами, знание технических стандартов и умение оперативно реагировать на нештатные ситуации. Нарушение обязанностей может привести к авариям, поэтому строгое соблюдение регламентов и постоянный контроль параметров являются обязательными.

Факельные установки (или факельные системы) являются инженерными сооружениями для безопасного сжигания, утилизации сбросных горючих газов. Под сбросными горючими газами понимают побочные газообразные продукты промышленных процессов (например, нефтедобычи, нефтепереработки, химического производства), которые не могут быть повторно использованы или переработаны. Они содержат горючие компоненты, такие как метан, пропан, бутан, и часто примеси сероводорода или других веществ. Эти газы образуются при аварийных

ситуациях, плановых остановках оборудования, избыточном давлении в системах или неполной переработке сырья.

Факельные установки состоят из: факельной головки (горелки), где происходит горение; системы сбора и транспортировки газов (трубопроводы, сепараторы для удаления жидкости); системы управления (контроль подачи газа, зажигание, мониторинг безопасности) (рисунок 5) [8].

Факельные установки служат для утилизации сбросных горючих газов, решая две ключевые задачи:

- предотвращение взрывов или пожаров, которые могут возникнуть при накоплении горючих газов;
- снижение выбросов вредных веществ (например, метана, который является сильным парниковым газом) путём их преобразования в менее опасные соединения (CO_2 , водяной пар).

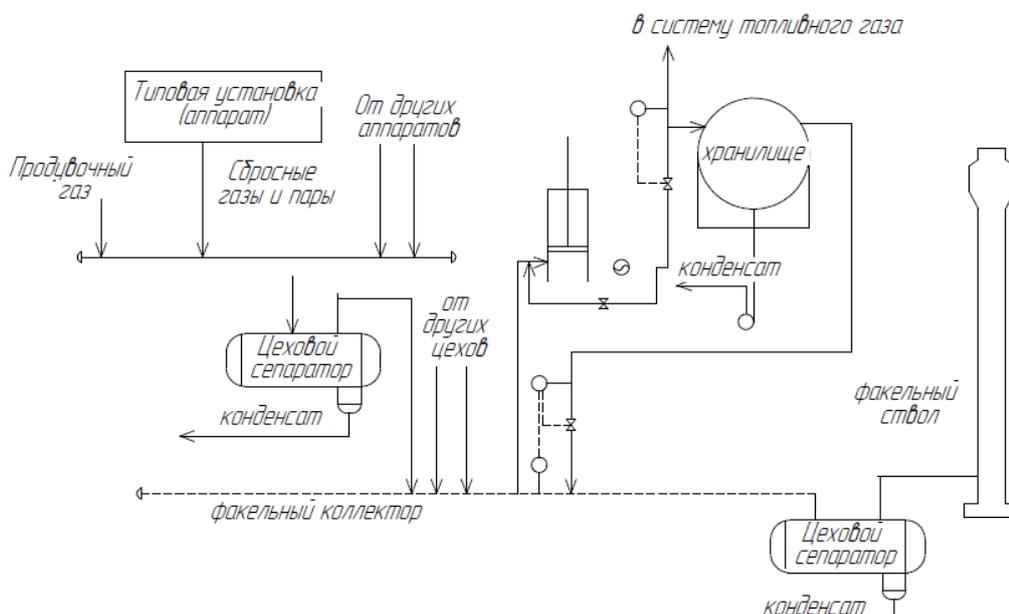


Рисунок 5 – Схема факельной системы [8]

Конструкция ФУ включает несколько ключевых элементов, обеспечивающих безопасное и эффективное сжигание газов. Ниже приведено детальное описание ее компонентов и их взаимодействия.

Система состоит из:

- факельной мачты/ствола: вертикальная или горизонтальная конструкция, по которой газ подается к факельной головке. Изготавливается из жаропрочных сплавов (например, инконель 625) с антикоррозионным покрытием;
- струйного затвора: располагается в основании факельной головки или на входе в факел. Создает газодинамический барьер для изоляции системы;
- факельной головки: зона сжигания, где происходит смешивание газа с воздухом и горение.
- вспомогательных систем: трубопроводы, компрессоры, клапаны, системы контроля.

Струйный затвор – это инженерный узел, предотвращающий обратную тягу и взрывы. Его основные элементы:

- сопла (форсунки) располагаются кольцеобразно вокруг газового потока. Направлены под углом 30–60° к оси факела для создания встречных или тангенциальных струй;
- камера подачи струйной среды обеспечивает равномерное распределение рабочей среды (газ, пар, вода) к соплам;
- регулировочные клапаны управляют расходом и давлением струйной среды (например, паровая завеса при давлении 8-12 бар).

Рабочая среда: пар или инертный газ (N_2 , CO_2) – для взрывоопасных сред, вода – для охлаждения и подавления сажи.

Принцип работы: струи создают зону повышенного давления, которая блокирует попадание кислорода внутрь системы и предотвращает распространение пламени в обратном направлении.

Особенности монтажа:

- высота мачты рассчитывается исходя из рассеивания тепла и токсичности газов (обычно 30–100 м);

- фундамент имеет железобетонное основание с виброгасящими элементами;
- дренажная система представляет собой каналы для отвода конденсата и дождевой воды.

Факельная головка ФУ со струйным затвором имеет следующие особенности:

- смесительные каналы: спиральные или радиальные каналы для завихрения газа и воздуха, улучшающие горение;
- стабилизаторы пламени: перфорированные кольца или решетки, поддерживающие устойчивое горение при переменных нагрузках;
- система дожигания: дополнительные сопла для подачи воздуха/пара, снижающие выбросы СО и сажи.

Рассмотрим элементы, функции и особенности конструкции факельных систем. Основной элемент, где происходит сжигание газов – факельная головка (горелка). Факельная головка – это горелка с форсунками, система сбора включает трубы и сепараторы для удаления жидкостей [1]. Представим их конструктивные особенности:

- форсунки распыляют газ для смешивания с воздухом и полного сгорания;
- система стабилизации пламени (кольца, перегородки или завихрители для поддержания стабильного горения даже при переменном расходе газа);
- защитный кожух из жаропрочных материалов (например, нержавеющей сталь, керамика).

Факельная головка бывает нескольких типов:

- открытые факелы – это простые конструкции для наземного или надземного монтажа;
- закрытые (бездымные) факелы – с камерами дожига для снижения выбросов дыма и токсичных веществ.

Следующий элемент – система сбора и транспортировки газов. Она обеспечивает доставку газов к факелу. Конструкция системы состоит из следующих элементов:

- трубопроводы (выполняют из коррозионностойких материалов (например, углеродистая сталь с покрытием, титан для агрессивных сред);
- сепараторы. Предназначены для удаления жидкости (нефть, конденсат) и твёрдых частиц перед подачей газа в факел;
- накопленную жидкость для предотвращения гидроударов отводят дренажные системы.

Элемент системы зажигания и поддержания пламени предназначен для надёжного воспламенения и непрерывного горения [1]. Состоит из следующих компонентов:

- пилотные горелки. Представляют собой постоянно горящие небольшие пламени для поджига основного потока;
- электроискровые системы. Представляют собой автоматические устройства для розжига (например, пьезоэлектрические или высоковольтные) [22];
- ветрозащитные экраны (предотвращают задувание пламени).

Система управления и контроля обеспечивает безопасность и автоматизацию процессов. Состоит из следующих элементов:

- датчики, которые мониторят давление, температуру, состав газа, наличие пламени;
- клапаны и регуляторы управляют подачей газа, перекрывают поток в аварийных ситуациях;
- SCADA-системы – программное обеспечение для удалённого контроля и анализа данных.

Система дожигания и очистки, является составной частью ФУ. Снижает вредные выбросы (в современных установках). Для осуществления процесса применяют следующие технологии:

- применение термических окислителей – дожигают CO и несгоревшие углеводороды;
- скрубберы – улавливают кислотные газы (например, сероводород) с помощью щелочных растворов;
- каталитические нейтрализаторы – разлагают токсичные вещества при низких температурах.

В конструкции факельной системы имеются опоры и инфраструктура, представляют собой высотную мачту или ферму. Поднимают факел на безопасную высоту (до 100+ метров) для рассеивания тепла и продуктов сгорания [1].

Фундамент ФУ рассчитан на вибрации, ветровые и температурные нагрузки. В конструкции имеется молниезащит, цель которой заземление и громоотводы для предотвращения ударов молнии. В конструкции имеются системы безопасности, такие как свечи аварийного сброса и искрогасители. Свечи аварийного сброса отводят газ в обход факела при перегрузках. Искрогасители предотвращают выброс горящих частиц. Системы подачи пара или азота снижают образование сажи и дыма (например, пар смешивается с газом для улучшения горения).

В качестве системы и контроля безопасности в конструкции ФС имеются следующие устройства (таблица 28).

Таблица 28 – Система контроля и безопасности ФУ со струйным затвором

Системы	Устройства
Датчики	Термопары для мониторинга температуры в зоне горения. Датчики давления на входе/выходе затвора. Анализаторы состава дымовых газов (O ₂ , CO, NOx).
Аварийные клапаны	Быстродействующие заслонки (время срабатывания < 2 сек) для перекрытия потока при отклонениях.
PLC-контроллер	Автоматизирует управление струйным затвором и регулирует расход среды в реальном времени.

Таким образом, конструкция факельной системы со струйным затвором сочетает инновационные инженерные решения и надежные материалы. Ключевые преимущества это отсутствие механического износа, адаптивность к переменным условиям и высокая степень безопасности. Состав факельной установки со струйным затвором требует тщательного подбора материалов, точной настройки компонентов и многоуровневой системы безопасности. Ключевая роль отводится струйному затвору, который предотвращает обратную тягу и взрывы, а также обеспечивает стабильность горения. Все элементы системы проектируются с учетом коррозионной и термической стойкости, а также требований экологических стандартов. Для эффективной работы критически важны точный расчет геометрии сопел, выбор рабочей среды и резервирование критических узлов.

3.2 Применение факельного оголовка со струйным затвором с целью повышения безопасной эксплуатации факельной системы

Существует риск проникновения воздуха внутрь ствола факельной системы. Оценка риска проникновения воздуха внутрь ствола факельной системы со струйным затвором требует анализа потенциальных причин, последствий и мер по их предотвращению.

Опасности, связанные с проникновением воздуха:

- формирование взрывоопасной смеси. Воздух (кислород) в сочетании с горючими газами (например, метаном, пропаном) может привести к образованию взрывоопасной среды внутри ствола факела. Последствия – взрыв или дефлаграция при контакте с источником воспламенения (например, искрой, горячим факелом);
- коррозия оборудования. Кислород и влага из воздуха ускоряют коррозию металлических элементов системы. Последствие – снижение прочности конструкции, риск разгерметизации;

- нарушение работы факела. Воздух может нарушить стабильность горения, вызвать обратную тягу или погасание пламени. Последствие – неконтролируемый выброс газов в атмосферу.

Факторов, способствующих проникновению воздуха несколько. Одним из них является отрицательное давление в системе, которое возникает при резком охлаждении газов, остановке компрессоров или утечках.

К еще одному фактору относится неисправность струйного затвора: износ уплотнений, засорение сопла, коррозия клапана.

Фактором, способствующему проникновению воздуха могут служить ошибки при эксплуатации, неправильный запуск/останов системы, несоблюдение процедур продувки.

Конструкционные недостатки, также могут являться негативными факторами, к ним относятся недостаточная скорость потока газа через затвор и отсутствие резервных барьеров.

В закрытых камерных факелах горючие газы сжигаются в изолированном пространстве, что снижает выбросы и шум. Внутреннее горение – это процесс окисления топлива или горючих веществ, происходящий внутри замкнутой системы или устройства.

Условия внутреннего горения: наличие горючего вещества, окислителя (обычно кислород) и источника воспламенения, поддержание температуры выше точки воспламенения.

Типы реакций:

- полное горение: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (при избытке кислорода);
- неполное горение: CO , сажа (при недостатке кислорода).

Эффективность и безопасность внутреннего горения зависят от контроля параметров (температура, состав смеси) и внедрения современных технологий.

Для минимизации рисков, связанных с обратной тягой, взрывоопасными смесями и утечками, предлагаем комплексный подход, основанный на интеграции струйного затвора с современными системами

контроля и организационными мерами. Предлагаем метод обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем с использованием струйного затвора.

Струйный затвор является критически важным элементом для предотвращения обратной тяги, взрывоопасных смесей и утечек в факельных системах. В случае использования струйного затвора его конструкция включает:

- горелку – форсунки для распыления газа и создания стабильного пламени;
- систему стабилизации – паровые/воздушные инжекторы для подавления дыма и улучшения горения;
- струйный затвор служит динамическим барьером из азота или пара, предотвращающий обратный поток воздуха.

Струйный затвор интегрирован в основание оголовка и выполняет следующие функции: барьер от обратной тяги за счет создания зоны повышенного давления за счет подачи азота/пара, блокируя проникновение воздуха в систему; поддерживает скорость потока газа >0.3 Маха для предотвращения смешивания с кислородом; исключает образование горючих комбинаций (например, $\text{CH}_4 + \text{O}_2$, $\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2$), что предотвращает вероятные взрывы и пожары на предприятии; обеспечивает равномерное горение, снижая риск затухания и выброса несгоревших газов, то есть происходит стабилизация пламени.

Предлагаемый метод включает инженерные решения, автоматизацию и организационные меры. Рассмотрим каждый этап реализации.

- разработка конструкции и описание принципа работы струйного затвора;
- определение технических параметров и проведение расчетов;
- интеграция с системами автоматики;
- описание процедуры запуска и останова системы;
- регламент технического обслуживания.

Назначение предлагаемой конструкции – создание динамического барьера из газа (азота) или пара, блокирующего проникновение воздуха в систему. Схема конструкции представлена в Приложении А.

Конструктивные элементы:

- основание, состоящее из корпуса, изготовленного из нержавеющей стали AISI 316 (устойчивость к коррозии и температурам до 800°C). Диаметр соответствует диаметру факельного ствола (например, DN 300–600 мм);
- факельный ствол диаметром DN 300–600 мм;
- горелка дежурная со струйным оголовком. Сопла имеют регулируемые форсунки для подачи газа/пара, угол распыления 30–45° для создания равномерного потока;
- система подачи рабочей среды.

Принцип работы: при нормальной работе факела газовый поток создает зону пониженного давления, предотвращая обратную тягу. При остановке системы или падении давления автоматически активируется подача азота/пара через сопла, формируя барьер.

Представим технические параметры и расчеты. Скорость потока через затвор с минимальной скоростью: 0,3 Маха (≈ 100 м/с при 20°C). Рассчитаем расход газа:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V, \quad (1)$$

где, Q – расход газа (м³/с);

D - диаметр трубы (м)

V - скорость потока (м/с).

Рассчитаем для трубы DN 400 мм ($D = 0.4$ м) и скорости 100 м/с:

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} \cdot 100 \approx 12,56 \text{ м}^3/\text{с} \text{ (} 45,216 \text{ м}^3/\text{ч)}$$

Давление азота поддерживается на 10–15% выше атмосферного (1,1-1,15 бар), расход азота: 5-10 м³/ч (для стандартных систем). Далее необходима интеграция с системами автоматики. Схема подключения представлена на рисунке 6.

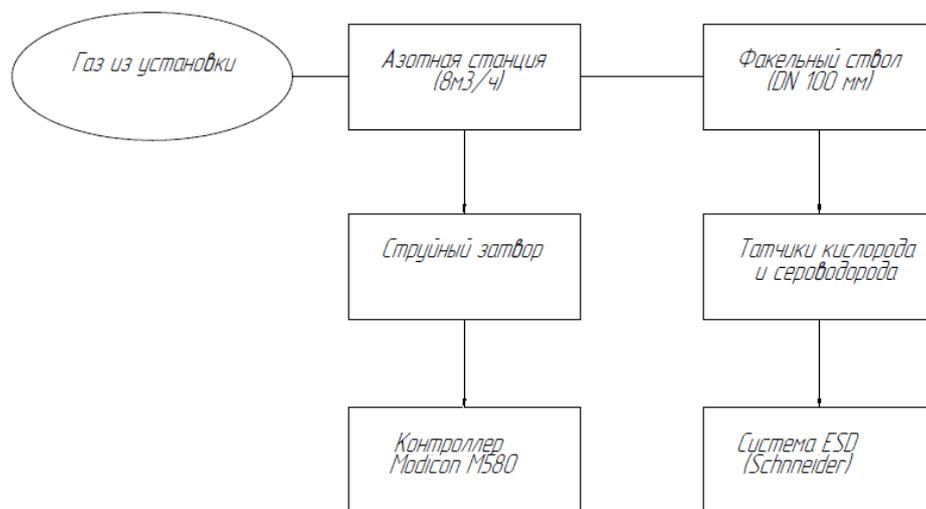


Рисунок 6 – Схема подключения

Выбираем датчики и контроллеры.

Датчики кислорода (O₂):

- тип: электрохимические или лазерные (например, Siemens SITRANS SL);
- установка в зоне затвора и на выходе факела;
- порог срабатывания: >2% O₂.

Датчики давления и температуры: контроль параметров газа в реальном времени.

Система ESD (аварийного отключения) [21]:

- при превышении O₂ >2% → остановка подачи газа, активация азотной продувки.
- при падении давления ниже 0.9 бар → сигнализация и блокировка клапанов.

Программируемый логический контроллер (PLC):

Платформа: Siemens SIMATIC S7 или Allen-Bradley ControlLogix.

Алгоритмы работы контроллера:

- регулировка расхода азота в зависимости от давления в системе;
- автоматический запуск продувки при простое >1 часа.

Опишем процедуру запуска и останова системы (таблица 29).

Таблица 29 – Процедура запуска и останова системы

Запуск/останов	Этапы действий
Запуск факела	1. Продувка азотом в течение 10 минут для удаления воздуха
	2. Постепенный запуск газового потока с контролем скорости (≥ 0.3 Маха).
	3. Активация пилотной горелки и переход на основной режим.
Остановка факела	1. Постепенное снижение подачи газа
	2. Активация азотной продувки на 30–60 минут.
	3. Закрытие задвижек и блокировка системы.

Разработаем график технического обслуживания факельных систем с использованием струйного затвора для обеспечения безопасной эксплуатации (таблица 30). Форма акта проверки факельной системы со струйным оголовком в соответствии с графиком ТО представлена в Приложении Б.

Таблица 30 – График технического обслуживания ФУ с использованием струйного затвора для обеспечения безопасной эксплуатации

Процедура	Периодичность	Методика
Визуальный осмотр сопел	Ежесменно	Проверка на засоры, коррозию.
Калибровка датчиков O ₂	Ежемесячно	Использование калибровочного газа
Гидравлические испытания	1 раз в 2 года	Давление 1.5× рабочего (по ГОСТ 356-80).
Замена уплотнений	1 раз в 6 месяцев	Установка колец из Viton или Kalrez.

Рассмотрим экспериментальные исследования по реализации предложенного метода обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем с использованием струйного затвора.

Объект: нефтеперерабатывающий завод, факельная система для сжигания сероводородсодержащих ($H_2 S$) газов.

Проблемы:

- риск обратной тяги, приводящей к проникновению воздуха в систему и образованию взрывоопасной смеси ($H_2 S + O_2$).
- коррозия оборудования из-за агрессивного сероводорода.

Примеры аварий из-за дефектов оголовка

- на НПЗ отсутствие струйного затвора привело к обратной тяге и взрыву. Результат: повреждение оборудования, экологический штраф;
- коррозия оголовка из-за неподходящего материала вызвала утечку $H_2 S$.

Решение:

- применение метода обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем с использованием струйного затвора;
- использование комплексного подхода, основанного на интеграции струйного затвора с современными системами контроля и организационными мерами.

В соответствии с предложенным решением устанавливаем струйный затвор с азотной продувкой (расход азота – 8 м³/час) (Приложение А) и производим интеграцию с датчиками O_2 (Honeywell XNX) и системой ESD Emerson (рисунок 6). Внедряем график ТО: ежедневные проверки, замена уплотнений каждые 6 месяцев (таблица 30).

На рисунке 7 представлена диаграмма причин аварийных инцидентов на факельных системах за два года до и после установки факельного оголовка со струйным затвором в АО «СНПЗ».

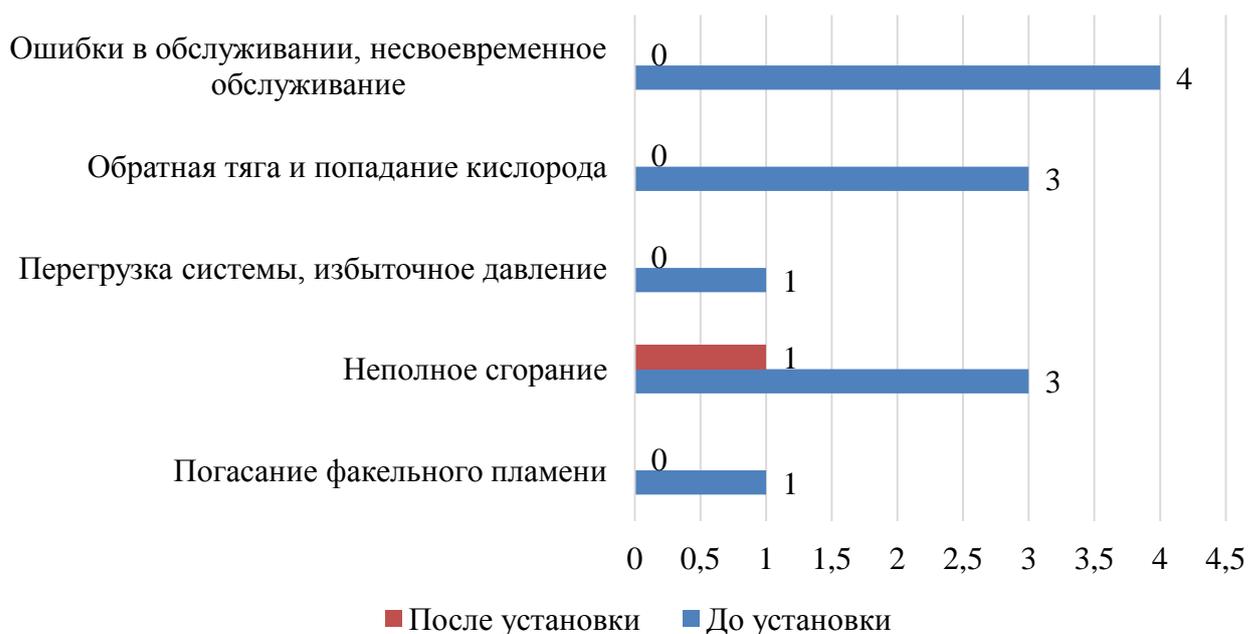


Рисунок 7 – Количество аварийных инцидентов на факельных системах за два года до и после установки факельного оголовка со струйным затвором на АО «СНПЗ»

Результатом применения за 2 года эксплуатации ФУ с использованием струйного затвора наблюдалось отсутствие инцидентов с обратной тягой. С экологической точки зрения обеспечения безопасности концентрация O_2 в системе снизилась до 0,5%.

Таким образом, внедрение струйного затвора с азотной продувкой на НПЗ позволило: исключить риск взрывов из-за обратной тяги, снизить экологическую нагрузку за счет полного сжигания $H_2 S$ и оптимизировать эксплуатационные расходы за счет своевременного ТО.

3.3 Анализ и оценка эффективности предлагаемых мероприятий по обеспечению техносферной безопасности в организации

Для расчета показателей необходимо предварительно составить план финансового обеспечения и смету. План представлен в таблице 31.

Таблица 31 – План финансового обеспечения мероприятия

Наименование мероприятия	Основание	Стоимость, руб.	Срок реализации	Ответственный
Установка на факельный оголовок струйного затвора с азотной продувкой	План мероприятий по улучшению условий труда на 2025 год	1 000 000	3 квартал 2025 года	Технический директор
Интеграция струйного затвора с датчиками O ₂ (Honeywell XNX) и системой ESD Emerson		500 000	4 квартал 2025 года	Технический директор, IT-директор

Смета представлена в таблице 32.

Таблица 32 – Смета расходов на мероприятие

Наименование рабочей зоны	Струйный затвор с азотной продувкой	Датчики O ₂ (Honeywell XNX), система ESD Emerson	Итого
Стоимость устанавливаемого оборудования, руб.	750 000	200 000	950 000
Стоимость проектных работ, руб.	100 000	200 000	300 000
Стоимость монтажно-наладочных работ, руб.	150 000	100 000	250 000
Итоговая стоимость оснащения, руб.	1 000 000	500 000	1 500 000

Экономический эффект измеряется разностью между предотвращенным ущербом и расходами на осуществление мероприятия:

$$\mathcal{E}_r = Y - Z = 3\,000\,000 - 1\,500\,000 = 1\,500\,000 \text{ руб.}, \quad (2)$$

где \mathcal{E}_r – годовой экономический эффект, руб.;

Y – величина годового ущерба (выплаты за смертельный НС и профзаболевания по данным организации) руб.;

Z – затраты на реализацию мероприятия, руб.

Основной целью расчета экономического эффекта является определение эффективности.

$$\mathcal{E} = \frac{Y}{Z} = \frac{3\,000\,000}{1\,500\,000} = 2 \quad (3)$$

где \mathcal{E} – экономическая эффективность мероприятия.

Чистый доход рассчитывается по формуле:

$$\text{ЧЭЭ} = \sum \mathcal{E}_t - Z_t = 3\,000\,000 - 1\,500\,000 = 1\,500\,000 \text{руб.}, \quad (4)$$

где \mathcal{E}_t – предотвращенный ущерб, достигнутый на t -ом шаге расчета;

Z_t – затраты, осуществляемые на этом шаге, включая капитальные вложения.

Чистый дисконтированный доход ЧДД – это накопленный дисконтированный эффект за расчетный период:

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} &= \sum_{t=0}^T (\mathcal{E}_t - Z_t + A_t) \frac{1}{(1+E)^t} = \\ & (3\,000\,000 - 1\,500\,000 + 300\,000) \frac{1}{(1+10)^t} = 14\,876,03 \text{руб.}, \end{aligned} \quad (5)$$

где \mathcal{E}_t – предотвращенный ущерб, достигнутый на t -ом шаге расчета;

Z_t – затраты, осуществляемые на этом шаге;

A_t – амортизационные отчисления (20%);

T – горизонт расчета;

E – норма дисконта.

Срок окупаемости определяется по формуле:

$$T_{ок} = T - \frac{\text{ЧДД}_T}{\text{ЧДД}_{T+1} - \text{ЧДД}_T} = 1 - \frac{14816,03}{14876,03 - (-)114876,03} = 0,8 \text{ г.}, \quad (6)$$

где T – год, в котором значение чистого дисконтированного дохода последний раз отрицательное;

ЧДД_T – последнее отрицательное значение чистого дисконтированного дохода в период времени T ;

$ЧДД_{t+1}$ – первое положительное значение чистого дисконтированного дохода.

Индекс доходности ИД рассчитывается как:

$$ИД = \frac{\sum_{t=0}^T (\Delta_t + A_t)(1+E)^{t-1}}{\sum_{t=0}^T K_t(1+E)^{t-1}} = \frac{\sum_{t=0}^T (3\,000\,000 + 300\,000)(1+10)^{t-1}}{\sum_{t=0}^T 0,8(1+10)^{t-1}} = 4,1 \quad (6)$$

Расчет ЧЭЭ, ЧДД и срока окупаемости мероприятия представлен в таблице 33.

Таблица 33 – Интегральные показатели эффективности мероприятия

Наименование показателей	Значение показателей за 2025 г., тыс. д. е.
Капитальные вложения	950
Ежегодные затраты	1500
Амортизация	300
Эффект	1500
ЧЭЭ	1500
Коэффициент дисконтирования	10
ЧДД с нарастающим итогом	148,7
Ток	0,8
Дисконтированные капитальные вложения	95,0
Дисконтированный доход	14,87
Индекс доходности	4,1

Поскольку рассчитанный индекс доходности больше 1, можно сделать вывод, что установка струйного затвора с азотной продувкой (расход азота – 8 м³/час) и ее интеграция с датчиками O₂ (Honeywell XNX) и системой ESD Emerson имеет социально-экономический и материальный эффект.

Выводы: конструкция факельной системы со струйным затвором сочетает инновационные инженерные решения и надежные материалы. Ключевые преимущества это отсутствие механического износа, адаптивность к переменным условиям и высокая степень безопасности. Для эффективной работы критически важны точный расчет геометрии сопел, выбор рабочей

среды и резервирование критических узлов. В качестве оптимизирующего решения предлагается применить метод обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем с использованием струйного затвора и использовать комплексный подход, основанный на интеграции струйного затвора с современными системами контроля и организационными мерами.

В соответствии с решением предлагаем установить струйный затвор с азотной продувкой (расход азота – 8 м³/час) и произвести его интеграцию с датчиками O₂ (Honeywell XNX) и системой ESD Emerson. Кроме того, разработан график ТО и форма акта проверки факельной системы со струйным оголовком в соответствии с графиком ТО. Внедрение струйного затвора с азотной продувкой на НПЗ позволит: исключить риск взрывов из-за обратной тяги, снизить экологическую нагрузку за счет полного сжигания H₂ S, оптимизировать эксплуатационные расходы.

Заключение

Факельные системы используют на нефтяных месторождениях при аварийном сбросе давления, на химических и нефтеперерабатывающих заводах для устранения избыточных газов после реакций, и, они являются критически важными системами для промышленной безопасности. Это связано с тем, что сжигание в факелах неидеально, поскольку при неполном сгорании образуются токсичные вещества (СО, сажа, оксиды азота). СО₂, хотя и менее опасен, чем метан, всё же вносит негативный вклад в загрязнение атмосферы.

Особенности безопасной эксплуатации факельных систем связаны с необходимостью балансировать между технологической эффективностью, экологическими ограничениями и требованиями промышленной безопасности. Ключевыми элементами являются: непрерывный контроль параметров горения, применение специализированных инженерных решений, строгое соблюдение нормативов и проактивное управление рисками, внедрение инноваций для минимизации экологического ущерба. Модернизация факельных установок решает комплекс задач – от экологии до цифровизации. Она позволяет предприятиям сократить негативную нагрузку на биосферу, избежать штрафов, снизить риски аварий и повысить рентабельность за счет утилизации ресурсов.

Сценарии аварий на факельных системах вызывают как внутренние и внешние причины. Расследование аварий на факельных системах требует междисциплинарного подхода, сочетающего инженерный анализ, работу с данными и оценку человеческого фактора. Обеспечение безопасной эксплуатации факельных систем снижает вероятность возникновения непредвиденных ситуаций и аварийных ситуаций, что ведет к минимизации рисков для окружающей среды и здоровья людей. Анализ методов показал, что наиболее оптимальным является метод обеспечения безопасной эксплуатации ФУ с использованием струйного затвора.

Конструкция факельной системы со струйным затвором сочетает инновационные инженерные решения и надежные материалы. Ключевые преимущества это отсутствие механического износа, адаптивность к переменным условиям и высокая степень безопасности. Для эффективной работы критически важны точный расчет геометрии сопел, выбор рабочей среды и резервирование критических узлов. В качестве оптимизирующего решения предлагается применить метод обеспечения безопасной эксплуатации факельных систем с использованием струйного затвора и использовать комплексный подход, основанный на интеграции струйного затвора с современными системами контроля и организационными мерами.

В соответствии с решением предлагаем установить струйный затвор с азотной продувкой (расход азота – 8 м³/час) и произвести его интеграцию с датчиками O₂ (Honeywell XNX) и системой ESD Emerson. Кроме того, разработан график ТО и форма акта проверки факельной системы со струйным оголовком в соответствии с графиком ТО. Внедрение струйного затвора с азотной продувкой на НПЗ позволит: исключить риск взрывов из-за обратной тяги, снизить экологическую нагрузку за счет полного сжигания H₂ S, оптимизировать эксплуатационные расходы.

Анализ экономической эффективности показал, что рассчитанный индекс доходности больше 1, в этой связи, можно сделать вывод, что установка струйного затвора с азотной продувкой (расход азота – 8 м³/час) и ее интеграция с датчиками O₂ (Honeywell XNX) и системой ESD Emerson имеет социально-экономический и материальный эффект.

Список используемых источников

1. Детали факельных устройств для общих работ на нефтеперерабатывающих предприятиях. Общие технические требования [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 53681-2009. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200081446> (дата обращения 04.02.2025 года).
2. Калараш Р.А., Короткова Т.Г. Обзор научных исследований в области факельных систем // Научные труды КубГТУ. № 7. 2019. С. 296-313.
3. Менеджмент риска. Анализ дерева событий [Электронный ресурс] : ГОСТ Р МЭК 62502-2014. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://areliability.com/wp-content/uploads/2018/09/GOST-R-МЕК-62502-2014-Menedzhment-riska.-Analiz-dereva-sobytij.pdf?ysclid=m7uoxn3mca958136291> (дата обращения 02.03.2025 года).
4. Менеджмент риска. Реестр риска. Руководство по оценке риска опасных событий для включения в реестр риска [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 51901.23-2012 (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 29.11.2012 № 1285-ст). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100076> (дата обращения: 22.02.2025 года).
5. Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 27.303-2021 (МЭК 60812:2018) (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 21.09.2021 № 987-ст). URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://rosghosts.ru/file/gost/03/120/gost_r_27.303-2021.pdf (дата обращения: 22.02.2025 года).
6. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 27.302-2009 (утв. и введен в действие Приказом Ростехрегулирования от 15.12.2009 № 1249-ст). URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/50007/> (дата обращения 02.03.2025 года).
7. Надежность в технике. Анализ опасности и работоспособности (HAZOP) [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 27.012-2019 (МЭК 61882:2016)

(утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 30.10.2019 № 1227-ст).
URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200170007> (дата обращения: 22.02.2025 года).

8. Назаров А.А. Совершенствование факельных установок : специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» : диссертация на соискание кандидата технических наук / Назаров Антон Александрович ; Казанский государственный технологический университет. г. Казань. 2009. 124 с.

9. Назаров А.А. Факельные установки : монография / А.А. Назаров, С.И. Поникаров. Казань : Издательство КГТУ, 2010. 117 с.

10. Нефтемаш-Уфа» [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании. URL: <https://neftemash-ufa.ru/> (дата обращения 23.02.2025 года).

11. Об особенностях создания и эксплуатации систем автоматического контроля, указанных в Федеральном законе «Об охране окружающей среды», на квотируемых объектах в части контроля выбросов приоритетных загрязняющих веществ [Электронный ресурс] : Постановление Правительства РФ от 22.01.2024 № 39. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_467888/ (дата обращения 02.03.2025 года).

12. Об утверждении инструктивно-методических указаний по взиманию платы за выбросы загрязняющих веществ, образующихся при сжигании на факельных установках и (или) рассеивании попутного нефтяного газа [Электронный ресурс] : Приказ Минприроды России от 05.08.2013 № 274. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157165/ (дата обращения 02.03.2025 года).

13. Об утверждении методических рекомендаций по приему в эксплуатацию систем автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух [Электронный ресурс] : Приказ Росприроднадзора от 20.08.2024 № 427. URL:

https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_492507/ (дата обращения 02.03.2025 года).

14. Об утверждении порядка проведения обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров работников, предусмотренных частью четвертой статьи 213 Трудового кодекса Российской Федерации, перечня медицинских противопоказаний к осуществлению работ с вредными и (или) опасными производственными факторами, а также работам, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры [Электронный ресурс] : Приказ Минздрава России от 28.01.2021 № 29н (ред. от 01.02.2022) (Зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62277). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_375353/ (дата обращения: 22.02.2025 года).

15. Об утверждении порядка проведения технического расследования причин аварий, инцидентов и случаев утраты взрывчатых материалов промышленного назначения [Электронный ресурс] : Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 № 503 (ред. от 14.04.2022) Зарегистрировано в Минюсте России 24.12.2020 № 61765). URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/62605/> (дата обращения 06.03.2025 года).

16. Об утверждении руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» [Электронный ресурс] : Приказ Ростехнадзора от 03.11.2022 № 387. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_433652/ (дата обращения: 22.02.2025 года).

17. Об утверждении руководства по безопасности факельных систем [Электронный ресурс] : Приказ Ростехнадзора от 22.12.2021 № 450. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_405253/ (дата обращения 02.03.2025 года).

18. Правила безопасной эксплуатации и охраны труда для нефтеперерабатывающих производств [Электронный ресурс] : ПБЭ НП-2001 (утв. Минэнерго РФ 11.12.2000). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_81688/ (дата обращения: 04.02.2025 года).

19. РНГ-Инжиниринг [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании. URL: <https://www.rogeng.ru/> (дата обращения 23.02.2025 года).

20. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности [Электронный ресурс] : ГОСТ 12.1.003-83 (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 06.06.1983 N 2473) (ред. от 01.12.1988). URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4144277> (дата обращения: 22.02.2025 года).

21. Системы Emerson Rosemount Flare Gas Analyzer [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании «Горизонт» по продаже измерительного оборудования европейских и китайских брендов. URL: <https://gorizontllc.com/product/katalog-emerson-rosemount/?yclid=2749359160391106559> (дата обращения 22.02.2025 года).

22. Системы автоматизации розжига и контроля пламени [Электронный ресурс] : Техническое описание ООО «НПП «Промышленные экосистемы». URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://802122e4-892e-417b-a531-705114a2441b.filesusr.com/ugd/db4713_2265253e93ac486eb2a49af99e349fe9.pdf?index=true (дата обращения: 04.02.2025 года).

23. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению [Электронный ресурс] : ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Национальный стандарт Российской Федерации (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 29.04.2016 № 285-ст). URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/62605/> (дата обращения 02.03.2025 года).

24. Технология Steam-Assisted Flaring [Электронный ресурс] : Описание технологии. Официальный сайт Zeeco. URL:

<https://www.zeeco.com/resources/brochures/steam-assisted-flare-qfs-series> (дата обращения: 22.02.2025 года).

25. ТПП «Нефтеавтоматика» [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании. URL: <https://tpp-n.ru/> (дата обращения 23.02.2025 года).

26. Устройство дистанционного розжига факельных газов: пат. 205623 Рос. Федерация. № 203757764 / Климов Е.В., Рыжаков Н.Ю., Головач В.В., Хайруллин И.А., Абдуллина Е.З.; заявл. 21.04.2021 ; опубл. 23.07.2021, Бюл. №7. 6 с.

27. Факельная установка бездымная Парфенова : пат. 2562329 Рос. Федерация. № 21486763 / Парфенов Л.Н.; заявл. 01.06.2012 ; опубл. 10.09.2015, Бюл. №25. 9 с.

28. Факельный сепаратор с циклонным каплеуловителем пат. 2798104 Рос. Федерация. № 2023100445 / Казарцев Е.В.; заявл. 12.01.2023 ; опубл. 15.06.2023, Бюл. №17. 12 с.

29. Хазраткулова А.М., Баширова Э.М., Ибрагимов В.В., Казакбаев А.Ф. Повышение эффективности и безопасности эксплуатации факельных установок // Экономика: вчера, сегодня, завтра / А.М. Хазраткулова, Э.М. Баширова, В.В. Ибрагимов, А.Ф. Казакбаев, 2020, №10, С. 65-71.

30. AEREON [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://aereon.com/> (the date of access 23.02.2025).

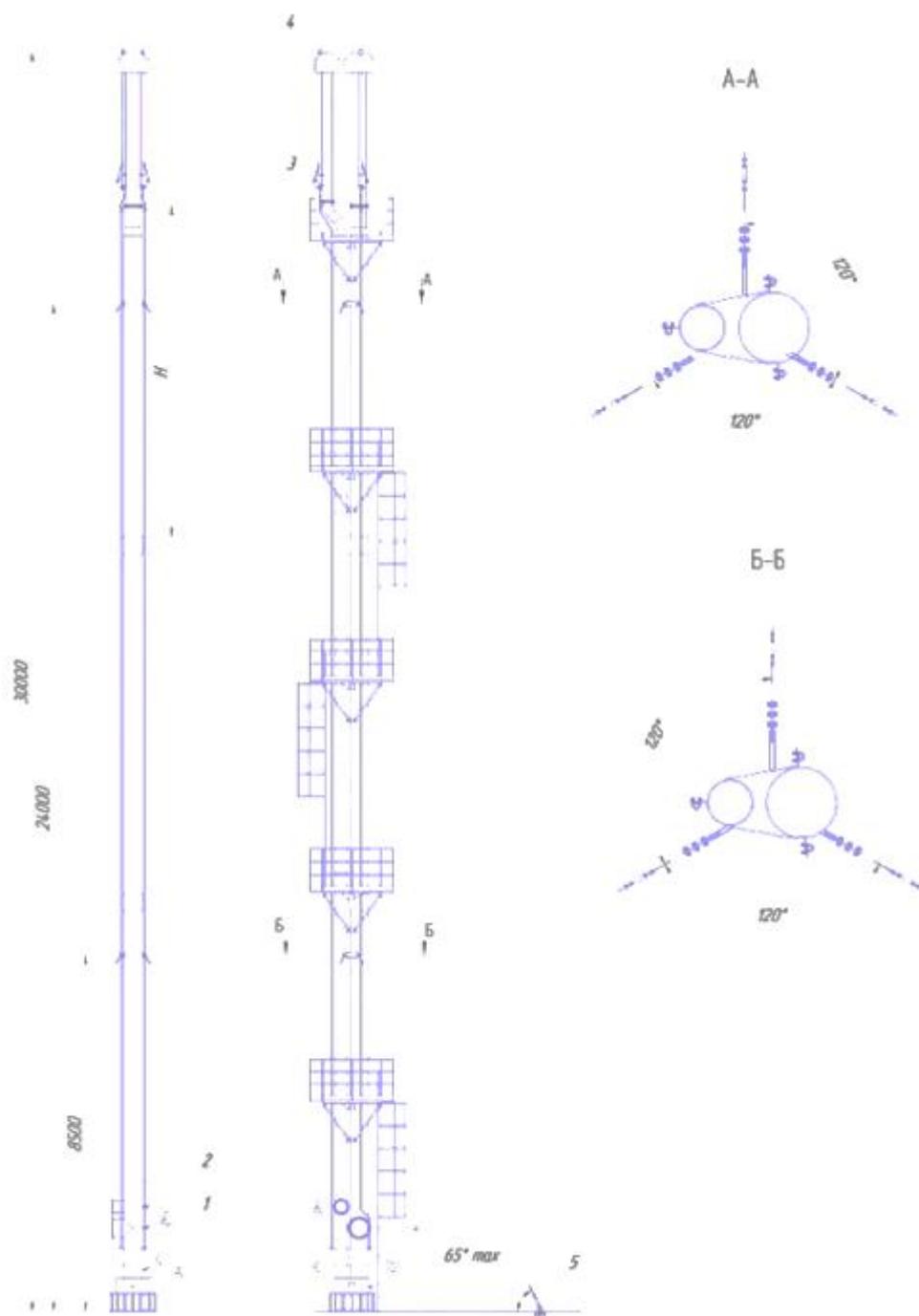
31. Alban Sirven, Julien Grosklod and Jeremy Saada Optimization of safety and flare systems // Invensys Operations Management, March 2021, P. 243-247

32. China Petroleum Technology & Development Corporation [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://www.cccme.cn/shop/cccme1058/index.aspx> (the date of access 23.02.2025).

33. CRA [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://www.canada.ca/en/revenue-agency.html> (the date of access 23.02.2025).

34. Flare Details for Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries [Electronic resource] : ANSI/API STANDARD URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_ora/20200926/API%20STD%20537-2017.pdf (date of request: 04.02.2025 года).
35. GEA Group [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://www.gea.com/ru/> (the date of access 23.02.2025).
36. John Zink Company [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://www.zeeco.com/> (the date of access 23.02.2025).
37. Kaldair (Великобритания) [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://unitedmarineservices.in/brands/kaldair-1.html> (the date of access 23.02.2025).
38. Petrojet [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://petrojet.com.eg/?lang=en> (the date of access 23.02.2025).
39. SAG [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://sag-rus.com/> (the date of access 23.02.2025).
40. Siemens Energy [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home.html> (the date of access 23.02.2025).
41. WSP [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://www.wsp.com/?ref=website-popularity&ref=website-popularity> (the date of access 23.02.2025).
42. Zadakbar O., Khan F., Imtiaz S., Development of Economic Consequence Methodology for Process Risk Analysis, Society for Risk Analysis, №35-4. 2015. P. 713-731.
43. Zeeco [Electronic resource] : The official website of the company. URL: <https://www.johnzink.com/ru> (the date of access 23.02.2025).

Приложение А
Схема конструкции факельной установки со струйным оголовком



1 – основание, 2 – ствол, 3 – горелка дежурная, 4 – оголовок струйный, 5 – канат

Рисунок А.1 – Схема конструкции факельной установки со струйным
ОГОЛОВКОМ

Приложение Б
**Форма акта проверки факельной системы со струйным оголовком
в соответствии с графиком ТО**

Таблица Б.1 – Форма акта проверки факельной системы со струйным оголовком в соответствии с графиком ТО

1. Общие сведения				
Наименование объекта:				
Адрес объекта:				
Номер факельной установки:		Тип оголовка:		
Дата проверки:		Периодичность ТО:		
Основание для проверки: График ТО № _____ от _____ (приложение к регламенту).				
2. Состав комиссии				
Должность	ФИО	Подпись		
Председатель комиссии				
Член комиссии				
Член комиссии				
3. Проверяемые узлы и параметры				
Проверяемый узел/параметр	Метод проверки	Нормативное значение	Соответствие (Да/Нет)	
Струйный затвор				
Герметичность соединений	Визуальный осмотр, течеискатель	Отсутствие утечек		
Скорость потока газа через затвор	Замер расходомером	≥ 0.3 Маха		
Давление азотной продувки	Манометр	1.1–1.15 бар		
Расход азота	Калиброванный расходомер	8 м ³ /час (по проекту)		
Оголовок факела				
Целостность форсунок	Визуальный осмотр	Отсутствие деформаций, засоров		
Работа паровых/воздушных инжекторов	Проверка подачи пара/воздуха	Стабильное пламя, отсутствие дыма		
Система автоматики и контроля				
Датчики O ₂ (концентрация)	Калибровка контрольным газом	<2% O ₂		
Датчики пламени (ИК/УФ)	Тестовое затухание	Мгновенное срабатывание ESD		

Продолжение Приложения Б

Продолжение таблицы Б.1

Система ESD	Имитация аварийного сигнала	Корректное отключение подачи газа		
Дополнительные элементы				
Молниезащита	Визуальный осмотр	Целостность заземления		
Термоизоляция оголовка	Тепловизор	Температура $\leq 150^{\circ}\text{C}$ (на поверхности)		
4. Выявленные замечания				
№	Описание замечания	Рекомендации по устранению	Срок устранения	Ответственный
5. Заключение комиссии				
<p>Факельная система со струйным оголовком: Соответствует требованиям безопасности и эксплуатации. Не соответствует (требует устранения замечаний до _____). Подписи членов комиссии: 1. _____ / _____ / 2. _____ / _____ / 3. _____ / _____ /</p>				
<p>Примечания:</p> <ol style="list-style-type: none"> Проверка проведена в соответствии с: Регламентом ТО № ___ от _____; Инструкцией по эксплуатации факельной системы. Акт составлен в двух экземплярах: один для архива предприятия, второй — для службы главного энергетика. 				