

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГОСУДАРСТВЕННОЙ
ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МЧС РОССИИ»

На правах рукописи

ЦОЙ

Анастасия Андреевна

«МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ
ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ФАКЕЛЬНОГО
УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЕНИЯ»

05.26.03 – пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор технических наук

Демехин Феликс Владимирович

Санкт-Петербург

2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследования	10
1.1. Аналитический обзор статистики по пожарам на объектах нефтегазовой отрасли.....	10
1.2. Пожарная опасность объектов нефтегазовой отрасли	15
1.3. Проблемы повышения огнестойкости стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли	20
1.4. Анализ существующих методов определения огнезащитной эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций	24
1.5. Формулировка научной задачи и методический замысел ее решения	38
Выводы по Главе 1	41
Глава 2. Разработка методики проведения исследований по определению эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций.....	45
2.1. Теоретические предпосылки и определение граничных условий	45
2.2. Обоснование конструкции и технических параметров испытательной установки по определению эффективности огнезащитных покрытий	51
2.3. Определение параметров высокотемпературного газового потока.....	57
2.4. Подготовка экспериментальных образцов	63
2.5. Исследование эффективности огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения	68
Выводы по Главе 2	79
Глава 3. Результаты экспериментов и их обработка	81
3.1. Анализ полученных экспериментальных данных	81
3.2. Определение доверительных границ результата измерений показателя эффективности огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения.....	90
3.3. Критерии применимости огнезащитных составов на объектах нефтегазовой отрасли.....	96

Выводы по Главе 3	99
Глава 4. Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения.....	100
4.1. Общие положения	100
4.2. Сущность метода.....	100
4.3. Оборудование для проведения испытаний.....	101
4.4. Условия проведения испытаний.....	102
4.5. Подготовка оборудования и образцов для проведения испытаний.....	102
4.6. Последовательность проведения испытания.....	104
4.7. Обработка и оценка результатов испытания.....	105
4.8. Оформление результатов испытаний.....	106
Приложение к методике	106
Выводы по Главе 4	108
Заключение	110
Список литературы	112
Список иллюстративного материала.....	125
Приложение.....	129

ВВЕДЕНИЕ

Повышение пожарной безопасности объектов нефтегазового комплекса является одной из важнейших составных частей обеспечения защиты населения от угроз техногенного характера. Пожары и взрывы на таких объектах опасны не только человеческими потерями, но и большими экономическими затратами, связанными с ликвидацией последствий разрушений и восстановлением работоспособности предприятий, которые приводят как к прямому, так и к косвенному ущербу. Одним из основных условий снижения необратимых последствий пожара на объектах нефтегазовой отрасли является сохранение несущей способности металлоконструкций технологических сооружений и коммуникаций. При пожаре такие конструкции быстро прогреваются и теряют несущую способность, что приводит к интенсивному развитию пожара за счет выхода в зону горения большого количества жидких и газообразных горючих веществ, в процессе эскалации аварии происходит нагрев и разрушение смежного оборудования, трубопроводов и технологических емкостей. Результатом развития становится неуправляемый процесс горения, зачастую приводящий к полной потере технологической установки, и даже предприятия.

Важную роль в системе обеспечения пожарной безопасности различных объектов играет огнезащита, которая используется для снижения пожарной опасности и обеспечения требуемой огнестойкости строительных конструкций.

К числу объектов, для которых проблема оптимальной огнезащиты имеет особенно большое значение, относятся [63]:

- строительные конструкции с нормируемыми пределами огнестойкости (колонны, балки, ригели, плиты перекрытий, рамные конструкции);
- огнестойкие воздухо- и газопроводы систем противоподымной защиты зданий и сооружений;
- кабельные коммуникации различных типов (силовые, осветительные, контрольные) и кабельные проходки через огнестойкие строительные конструкции;

– резервуары с нефтепродуктами и сжиженными газами и другие элементы нефтегазодобывающего и нефтехимического комплекса.

В условиях пожара перечисленные объекты подвергаются совместному действию силовых нагрузок и высокотемпературного нагрева [63].

Существующие нормы пожарной безопасности не всегда удовлетворяют возникающим потребностям. Например, испытания по оценке эффективности огнезащиты (в данной работе понятия «эффективность огнезащиты» и «огнезащитная эффективность» равносильны) и огнестойкости конструкций наиболее часто осуществляются в условиях так называемого стандартного температурного режима. Фактические температуры при пожарах, как правило, отличаются от стандартного температурного режима: в нефтехимической промышленности и на морских нефтяных платформах существует угроза возникновения интенсивных пожаров с высокой температурой и скоростью распространения (более 900 градусов в течение 5 минут) и сопровождающиеся тепловым ударом пламени по конструкциям.

Существующие потребности в способах определения эффективности огнезащитных покрытий накладывают ограничения на точность, скорость и общедоступность проведения алгоритма испытаний. В связи с чем, актуальной задачей является разработка экспресс-методики определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли в условиях близких к реальным, которая позволит быстро, точно и без дополнительных материальных затрат оценить огнезащитную эффективность покрытия.

Согласно приведенным в работе сведениям, испытание огнезащитного покрытия в условиях стандартного температурного режима не является достаточным основанием для применения его в качестве огнезащиты металлических конструкций объектов нефтегазовой отрасли. В большинстве случаев температурный режим пожаров, возникающих на объектах нефтегазовой отрасли, попадает под описание углеводородного температурного режима при

горении пролива нефтепродуктов. В случае струйного истечения горящих жидкостей и газов из аппаратов и трубопроводов под давлением возникает режим факельного углеводородного горения, понятие которого вводится в настоящей работе.

Изучение существующих методов оценки огнезащитной эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций показало, что на данный момент отсутствует экспресс-метод определения огнезащитной эффективности в условиях факельного углеводородного горения. В связи, с чем решение исследовательских задач в работе базируется на изучении поведения огнезащитных покрытий и создании экспресс-методики их испытаний в условиях факельного углеводородного горения.

Актуальность исследования выражена в необходимости разработки научно-обоснованной экспресс-методики, которую можно использовать в лабораторных и полевых условиях, для определения огнезащитной эффективности тонкослойных огнезащитных составов в условиях факельного углеводородного горения применительно к стальным конструкциям технологических сооружений предприятий нефтегазовой отрасли.

Цель исследования: разработать экспресс-методику определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения.

Достижение цели диссертационного исследования предполагает решение **научной задачи**, сущность которой заключается в создании научно-методического аппарата определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения.

Частные задачи исследования:

1. Разработать и установить основные параметры факельного углеводородного горения.
2. Обосновать конструкцию и технические параметры испытательной установки для определения показателя эффективности огнезащитных покрытий.

3. Разработать критерии применимости огнезащитных составов на стальных конструкциях объектов нефтегазовой отрасли.

Объект исследования: поведение огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения.

Предмет исследования: показатель эффективности огнезащитного покрытия в условиях факельного углеводородного горения.

Научная новизна диссертационного исследования определяется тем, что данная работа является первым комплексным исследованием в области определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли. Отличие разработанной экспресс-методики от известных состоит в возможности проведения испытаний по определению огнезащитной эффективности тонкослойных огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения, с учетом аэродинамического и температурного воздействия газового потока на огнезащиту. Проведение таких испытаний возможно в лабораторных и полевых условиях, достаточно быстро и без значительных материальных затрат, применительно для использования в исследовательских пожарных лабораториях, экспертных организациях, научно-исследовательских и учебных организациях пожарно-технического профиля и конечными пользователями. Предложен дифференцированный подход к проведению огнезащитной обработки стальных конструкций в зависимости от пожарной опасности находящегося вблизи оборудования.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Основные параметры факельного углеводородного горения.
2. Конструкция и технические параметры испытательной установки для определения показателя эффективности огнезащитных покрытий.
3. Критерии применимости огнезащитных составов для стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли.

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в:

- установление условий и параметров воздействия высокотемпературного газового потока на огнезащитные покрытия при пожарах на объектах нефтегазовой отрасли;

- научном обосновании условий проведения испытаний по определению эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли;

- выведении научно обоснованных критериев применимости огнезащитных составов на стальных конструкциях объектов нефтегазовой отрасли.

Практическая значимость полученных результатов диссертационного исследования заключается в:

- введении научно-обоснованного понятия «факельное углеводородное горение»;

- применении испытательной установки при разработке новых огнезащитных составов и контроле качества существующих в процессе их применения и эксплуатации;

- формировании научно обоснованных требований к проведению огнезащитной обработки стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли.

В ходе выполнения диссертационной работы были использованы следующие **методы исследования**: экспериментальные, методы математической статистики.

Кроме того, в процессе работы над диссертационным исследованием широко использовались правовые и нормативные документы, в том числе законы Российской Федерации, постановления, государственные отечественные и зарубежные стандарты, и другие руководящие документы.

Апробация работы. Научные результаты, полученные в ходе проведения исследований, докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях: VII Международная научно-практическая конференция «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Обеспечение безопасности при чрезвычайных ситуациях» (г. Санкт-Петербург,

2015), Межвузовская научно-практическая конференция «Наукоемкие технологии» (г. Санкт-Петербург, 2014), Международная научно-практическая конференция «Новая наука: теоретический и практический» (г. Нижний Новгород, 2016), II Межвузовская научно-практическая конференция (г. Иваново, 2016 г.), Международная научно-практическая конференция «Новые задачи технических наук и пути их решения» (г. Пермь, 2016), XI Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.).

Внедрение результатов исследования. Научные результаты диссертационного исследования реализованы в практической деятельности ФГБУ Судебно-экспертное учреждение ФПС «Испытательная пожарная лаборатория» по Ленинградской области, в научной и практической деятельности ООО «Пожинжиниринг», а также используются в образовательном процессе ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России на кафедре пожарной безопасности технологических процессов и производств.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 12 научных работ, из них 6 научных работ в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ с обоснованием основных научных результатов исследования.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, выводов и практических рекомендаций, списка литературы, списка иллюстративного материала. Работа содержит 38 рисунков, 28 таблиц. Список литературы включает 104 источника (82 отечественных и 22 зарубежных). Текст диссертации изложен на 128 страницах.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В главе приведен аналитический обзор статистики по пожарам на объектах нефтегазовой отрасли, раскрыты составляющие пожарной опасности данного типа объектов, введено и обосновано понятие факельного углеводородного горения, выделены проблемы в области повышения огнестойкости стальных конструкций и сформулирована задача по разработке методики определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения, разработан методический замысел решения поставленных задач.

1.1. Аналитический обзор статистики по пожарам на объектах нефтегазовой отрасли

По статистическим данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [46], публикациям в журнале «Безопасность труда в промышленности» [10], отчету Шведского Национального Института Тестирования и Исследований по обзору аварий за 1995-2014 гг. [93], а также ряду других работ был проведён анализ пожаров на объектах нефтегазовой промышленности за 2011-2015 гг.

Результаты анализа показывают, что ежегодное количество пожаров имеют тенденцию к увеличению. Ниже представлены статистические данные по количеству пожаров на объектах нефтегазовой отрасли за 2011-2015 гг. (таблица 1).

Таблица 1 – Статистика опасных событий на объектах нефтегазовой промышленности

Виды опасных событий	Число опасных событий										Общее число	
	2011 г.		2012 г.		2013 г.		2014 г.		2015 г.			
		%		%		%		%		%		%
Пожар	35	15.6	45	20.2	48	21.4	44	19.6	52	23.2	224	100

Проанализировано более 224 пожаров, произошедших за период 2011-2015 года. В сравнении с 2011 годом количество аварий и пожаров на 2015 год выросло на 7,6 %. Общий материальный ущерб превысил несколько миллиардов долларов.

По сценариям развития [53] проанализированных пожаров получены следующие процентные соотношения (рисунок 1):

- пожары пролива – 38 %;
- «огненный шар» – 18 %;
- факельное горение – 25 %;
- сгорание облака – 19 %.

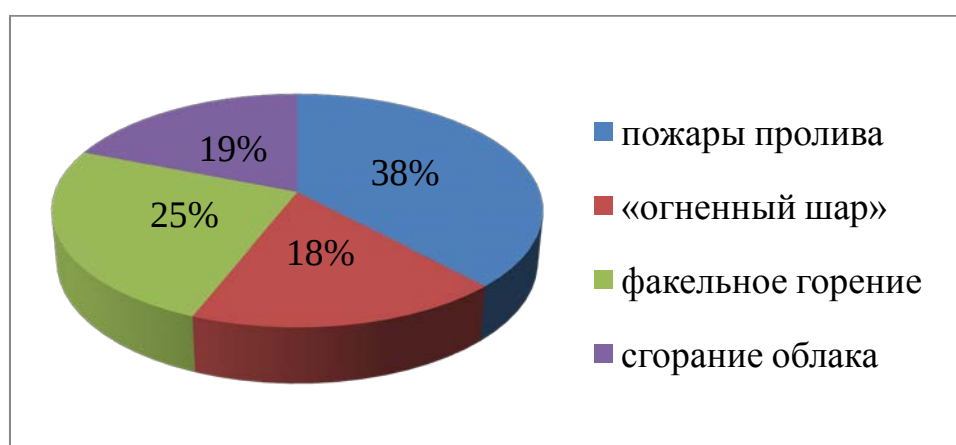


Рисунок 1 – Процентное соотношение сценариев развития пожаров в проанализированных случаях

Факельное горение занимает второе место по распространенности среди сценариев развития пожаров и характерно для газовых и газонефтяных возгораний, возникающих на нефтяных платформах и заводах по добыче и переработке газа. Последствия таких пожаров характеризуются высоким материальным ущербом, что связано с разветвленностью сетей технологических коммуникаций, большой плотностью насыщения территории технологическими объектами и установками, а также наличием большого количества металлических конструкций (в основном стальных), которые под действием высокой температуры быстро теряют свою прочность и деформируются.

В качестве примера можно привести аварию на Ачинском НПЗ в июне 2014 года. Взрыв углеводородного газа на газофракционирующей установке привел к возникновению факельного горения, с последующим распространением пожара по площади 400 квадратных метров. В результате данного инцидента 8 человек погибло и 24 человека пострадало. Убыток от пожара оценивается в 800 млн. долларов и является одним из крупнейших страховых убытков в мире в нефтегазовом секторе (рисунок 2).



Рисунок 2 – Разрушение конструкций в результате аварии на Ачинском НПЗ в июне, 2014 года

В ночь на 16 июня 2009 года на НПЗ в Комсомольске-на-Амуре возникло факельное горение мазута в результате разгерметизации фланцевого соединения. Пожар ликвидировали через два часа, пострадавших и погибших не было.

27 декабря 2010 года произошел взрыв на нефтеперерабатывающей установке ООО "Забайкальская нефтеперерабатывающая компания" в поселке Даурия в Забайкалье. В результате взрыва погибли пять человек - все пятеро граждане КНР, находившиеся в эпицентре взрыва. Установка в результате взрыва и последующего развития факельного горения была разрушена на 90%.

Причинами пожара на Саратовском НПЗ (рисунок 3) 4 октября 2012 года стала негерметичность перекрытия узла клапанной сборки. В результате чего произошел выброс парогазовой фазы газойля из дренажного вентиля с последующим воспламенением и возникновением факельного горения.



Рисунок 3 – Пожар на Саратовском НПЗ 4 октября 2012 года

Пожар на нефтяной платформе "Abkatun Alfa" в Мексиканском заливе унес жизни 15 человек, более 50 человек пострадало. Материальный ущерб оценивается в десятки миллионов долларов.

Материальный ущерб от пожара в резервуарном парке установки подготовки нефти «Уса» (Республика Коми, 21 мая 2014 г.) составил более 53 млн. руб. (рисунок 4)

Значительная часть пожаров вызвана образованием пожаровзрывоопасных смесей вследствие нарушения технологического режима и герметичности оборудования.

К нарушениям герметичности приводят резкие перепады температур в аппаратах или температурные перенапряжения, разрушение прокладок, разрывы технологических трубопроводов в результате коррозии, эрозии и усталость металла, некорректное расположение запорной арматуры и её отказы в работе, механические повреждения по вине производственного персонала и др. [80]



Рисунок 4 – Пожар в резервуарном парке установки подготовки нефти «Уса» (Республика Коми, 21 мая 2014 г.)

Причинами разгерметизации и разрушения технических устройств и оборудования в проанализированных пожарах явились (рисунок 5):

- нарушения правил техники безопасности и пожарной безопасности (41 %);
- некачественный монтаж и ремонт оборудования (22 %);
- некачественная молниезащита (13 %);
- нарушения правил технологического регламента (11 %);
- износ оборудования (11 %);
- прочие (2 %).

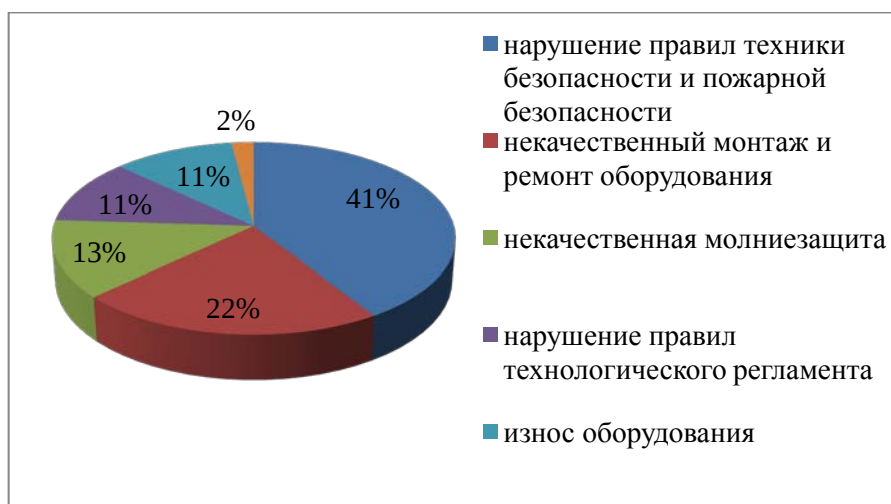


Рисунок 5 – Процентное соотношение причин разгерметизации и разрушения технических устройств и оборудования

1.2. Пожарная опасность объектов нефтегазовой отрасли

Выделены основные тенденции в повышении уровня опасности объектов нефтегазовой отрасли [51]:

- вертикальная и уплотнительная застройка заводских территорий;
 - опережающие развитие объемов производства по сравнению с совершенствованием мер предупреждения аварийных и пожароопасных ситуаций;
 - чрезвычайно высокая энергонасыщенность объектов нефтеперерабатывающей промышленности. Типовой нефтеперерабатывающий завод производительностью 10-15 млн. т/год сосредотачивает на своей территории от 200 до 500 тыс. т углеводородного топлива, энергосодержание которого эквивалентно 2-5 мегатоннам тротила;
 - интенсификацией технологии, ростом единичных мощностей аппаратов, вследствие чего такие параметры, как температура, давление, содержание взрыво-пожароопасных веществ растут и приближаются к критическим;
 - наличие емкостей, реакторов, колонн, аппаратов насосного типа и других технологических объектов, содержащих различные нефтепродукты;
 - наличие большого количества оборудования, работающего под избыточным давлением;
 - наличие большого количества путей распространения пожара.
- Пожарная опасность нефтеперерабатывающих заводов обуславливается:
- сложностью технологических линий, представляющих собой компактные сооружения большой высоты с системами контрольно-измерительных приборов и автоматики;
 - значительным количеством легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, сжиженных горючих газов, твердых горючих материалов;

- большим числом емкостей и аппаратов, в которых находятся пожароопасные продукты под большим давлением и при высокой температуре, разветвленная сеть трубопроводов с многочисленной запорно-пусковой и регулирующей арматурой и контрольно-измерительными приборами;

- высокой теплотой сгорания и скоростью выгорания обращающихся в производстве веществ и материалов.

Потенциальная возможность возникновения и развития пожаров на объектах нефтегазовой отрасли в значительной мере определяется свойствами применяемых веществ и материалов. В большинстве случаев это углеводородсодержащие горючие жидкости и газы.

Оценка опасных событий, произошедших на объектах нефтегазовой отрасли, показывает, что аварии с пожарами и взрывами развиваются по следующей типовой схеме (Рисунок 6):

- в результате нарушения герметичности арматуры или оборудования происходит истечение горючих жидкостей или воспламеняющихся газов в окружающее пространство;

- вышедшие горючие продукты либо воспламеняются, либо создают обширную зону газопаровоздушной смеси со взрывоопасной концентрацией горючего;

- факторы возникшего пожара (взрыва) интенсивно воздействуют на аппарат или трубопровод, из которого происходит истечение, а также на соседнее оборудование, трубопроводы и т.п., вследствие чего в них повышается давление выше расчетного, они теряют прочность и разрушаются или происходит их разгерметизация вследствие разрушения уплотняющих устройств (эскалация аварии);

- количество выходящего продукта и масштабы пожара увеличиваются со временем, принося большой материальный ущерб и приводя к человеческим жертвам и токсическому заражению промышленной территории. [50]

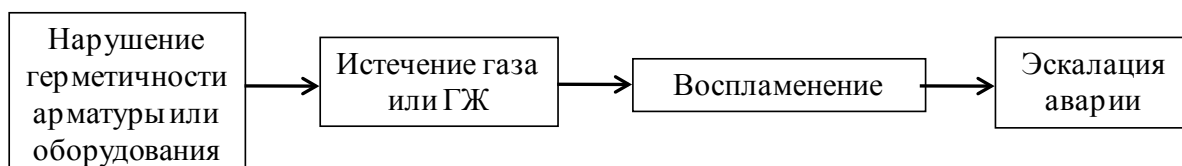


Рисунок 6 – Схема развития пожаров на объектах нефтегазовой отрасли

Рассмотрим следующие наиболее часто встречающиеся процессы и их сценарии развития, возникающие при авариях на объектах нефтегазовой отрасли:

- истечение жидкости;
- истечение газа;
- двухфазное истечение.

При аварийном истечении жидкости возможно возникновение пожара пролива и образование пожаровзрывоопасной газовоздушной смеси с последующим сгоранием облака (Рисунок 7). Возникает сильное тепловое воздействие на окружающие объекты. Температура пламени при таком пожаре зависит от свойств горючей жидкости.

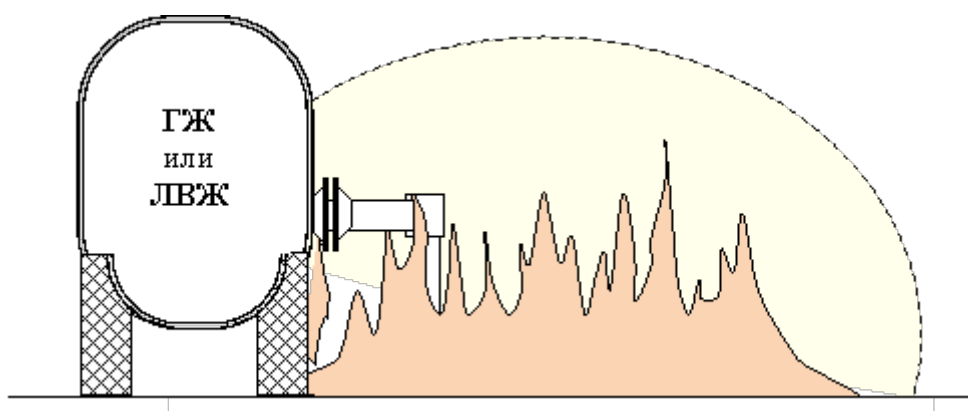


Рисунок 7 – Аварийное истечение ГЖ или ЛВЖ и образование пожара пролива

Аварийное истечение двухфазных смесей может привести к возникновению струйного горения (для газовой фазы) и пожара пролива (для жидкой фазы) одновременно (Рисунок 8). В данной ситуации помимо теплового воздействия на окружающие конструкции, возникает также аэродинамическое воздействие струи,

оказывающее дополнительные механические нагрузки на окружающее оборудование.

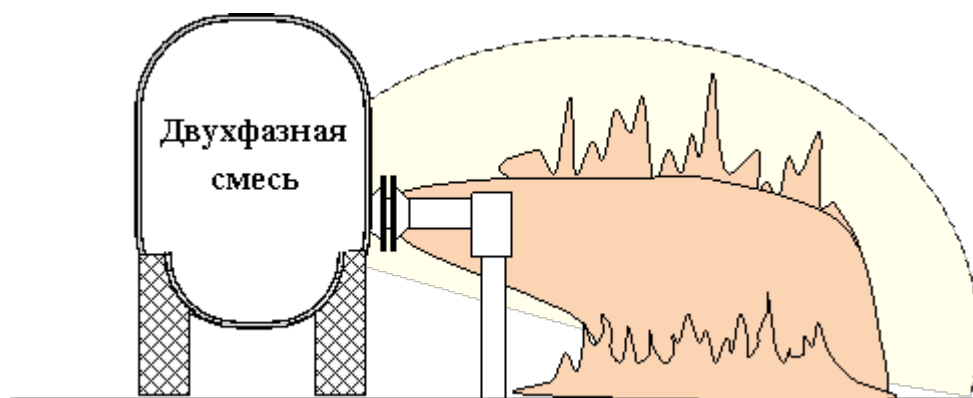


Рисунок 8 – Аварийное истечение ГЖ или ЛВЖ и образование пожара пролива

При аварийном истечении газа возникает опасность факельного (струйного) горения (Рисунок 9), основными параметрами которого являются высокая температура и скорость газового потока. Такой газовый поток оказывает наиболее сильные температурные и механические воздействия на окружающие объекты, в том числе на стальные строительные конструкции.

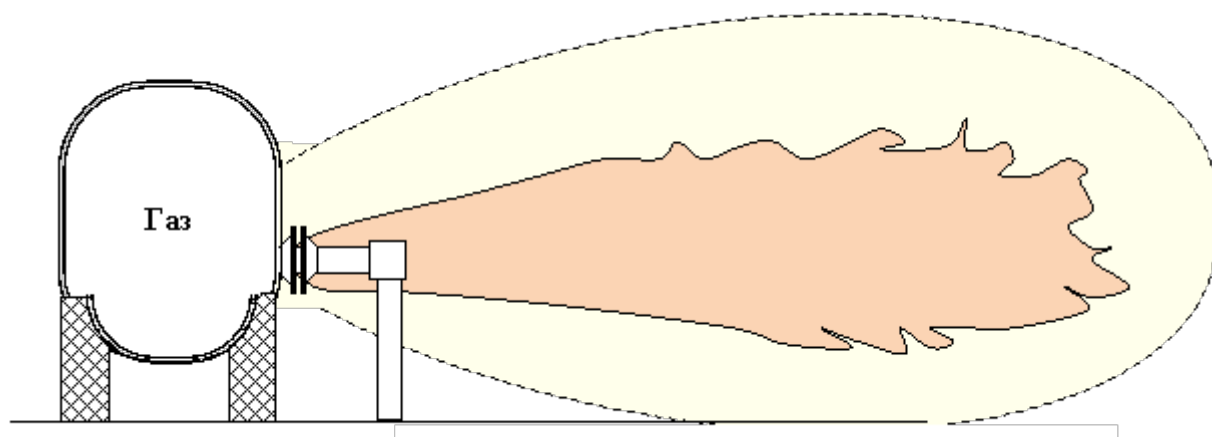


Рисунок 9 – Аварийное истечение газа, образование факельного горения

При факельном горении развиваются сильные газовые потоки с температурой горения до 1300°C и скоростью истечения, которая может быть близка к местной скорости звука (до 340 м/с). Плотность теплового потока может

достигать 300 кВт/м^2 [82], что создает опасность потери механической прочности и деформации в течение первых 5-10 мин омываемых пламенем или находящихся вблизи него конструкций и технологических аппаратов. Высокие значения теплопроводности металла приводят к быстрому прогреву конструкций, потери их механической прочности, снижению огнестойкости. Вследствие чего возможны потеря устойчивости конструкций и их обрушение. Характерной особенностью факельного горения газов является, как правило, непрерывное нарастание площади, охваченной горением.

Возникновение факельного горения возможно в случае истечения газового потока из отверстий, трещин, разрывов, образующихся при разгерметизации следующего оборудования:

- оборудование работающее под давлением (например, колонное оборудование, насосное оборудование, реакторы, трубопроводы для транспортировки технологических сред, аппараты воздушного охлаждения и др.);
- оборудование с возможностью увеличения давления в случае нагрева от внешнего источника (например, резервуары, емкости, аппараты, содержащие сжиженные углеводородные газы и др.).

К работающим под давлением аппаратам относятся герметически закрытые емкости, предназначенные для хранения и транспортировки жидких и газообразных веществ (резервуары, газгольдеры, баллоны, цистерны, баки, бочки, трубопроводы). Большая часть такого оборудования характеризуется большим объемом и высоким давлением, что обуславливает их высокую пожаро- и взрывоопасность. Например, вертикальные резервуары могут изготавливаться емкостью до 50000 м^3 , газгольдеры имеют емкость от 10000 до 100000 м^3 . Давление в таких сосудах может достигать 3 МПа .

Факельное горение может возникнуть на дыхательной арматуре, при нарушении герметичности стенки сосуда, при образовании трещин в сварных швах или при нарушении герметичности фланцевых соединений.

Развитие пожара зависит от места его возникновения, размеров начального очага горения, устойчивости металлических элементов конструкции сосуда [83].

Анализ статистики пожаров и основных параметров их развития позволяет сделать вывод о том, что факельное горение является одним из наиболее распространенных и опасных физических явлений на объектах нефтегазовой отрасли.

1.3. Проблемы повышения огнестойкости стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли

Наличие горючей среды по всей территории объекта и большого количества источников зажиганий приводят к частым возгораниям. В целях исключения возможности перехода возгорания в крупномасштабный пожар, необходимо чтобы строительные конструкции обладали определенной огнестойкостью в течение времени необходимого для сброса давления с аппаратов, слива горючих веществ в аварийные емкости и тушения пожара системами аварийной защиты, либо пожарными подразделениями.

Под огнестойкостью конструкции принято понимать способность конструкции сохранять несущие и (или) ограждающие функции в условиях пожара [62].

В настоящее время большая часть строительных конструкций нефтеперерабатывающих производств (колонны, стойки, балки, фермы, ригели, прогоны и т.п.) изготавливается из металла (в основном из различных марок стали), а не из бетона, как раньше. В случае возникновения пожара стальные конструкции раскаляются, теряется их механическая прочность, появляется возможность их обрушения, что связано с большими значениями теплопроводности металла.

Увеличение пределов огнестойкости производят различными способами, в том числе с применением специальных огнезащитных покрытий. В случае если

огнезащита не срабатывает происходит разрушение строительных конструкций и фактически полная потеря установки, как следствие, высокие материальные затраты на их восстановление, остановка предприятия и простой оборудования (Рисунок 10).



Рисунок 10 – Разрушение строительных конструкций при пожаре на Ачинском НПЗ, июнь 2014 г.

Значения требуемых пределов огнестойкости для основных строительных конструкций зданий и сооружений составляют от 15 до 360 минут [66]. Однако большинство стальных незащищенных конструкций может удовлетворять минимальным требованиям к пределу огнестойкости лишь до 15 минут. Это позволяет сделать вывод о том, что область применения стальных конструкций ограничена по огнестойкости, т.к. не обеспечивается выполнение следующего условия безопасности

$$P_{\text{ф}} > P_{\text{тр}} , \quad (1)$$

где $P_{\text{ф}}$ – фактический предел огнестойкости конструкций;

$P_{\text{тр}}$ – требуемый (нормативный) предел огнестойкости конструкций.

Данное условие безопасности является основным критерием обоснования необходимости огнезащиты строительных конструкций, т.е. если показатель $P_{\text{ф}}$ больше или равен значению $P_{\text{тр}}$, то огнезащита не требуется, в обратном случае огнезащита обязательна.

Фактический предел огнестойкости строительных конструкций можно установить с помощью огневых испытаний [20] или расчетным методом.

Огневые испытания предполагают нагружение конструкции, выполненной в натуральную величину, в соответствии с положением и нагружением ее в здании. После этого конструкция подвергается огневому воздействию. В ходе огневых испытаний фиксируется время с момента начала эксперимента до момента наступления одного из предельных состояний конструкции по огнестойкости. Данное полученное экспериментальное время и является фактическим пределом огнестойкости конструкции.

Нагрев стальных конструкций в условиях пожара зависит от множества факторов (интенсивность теплового излучения, способы теплозащиты и пр.). Для увеличения огнестойкости стальных конструкций желательно уменьшение скорости и глубины их прогрева. Для этих целей широко применяют средства огнезащиты, которые блокируя тепловой поток от огня к поверхности конструкций, предохраняет их от быстрого прогрева и позволяет сохранить несущую способность в течение заданного времени.

Согласно [57] различают конструктивную огнезащиту (толстослойные напыляемые составы, штукатурки, облицовки плитными, листовыми и другими огнезащитными материалами, в том числе на каркасе, с воздушными прослойками, а также комбинации данных материалов, в том числе с тонкослойными вспучивающимися покрытиями) и тонкослойные вспучивающиеся огнезащитные покрытия.

Тонкослойное огнезащитное покрытие (вспучивающееся покрытие, краска) – способ огнезащиты строительных конструкций, основанный на нанесении на обогреваемую поверхность конструкции специальных лакокрасочных составов с толщиной сухого слоя, не превышающей 3 мм, увеличивающих ее многократно при нагревании [57].

Применение конструктивных способов огнезащиты на определенных строительных конструкциях иногда бывает затруднительным в силу увеличения

нагрузки на конструкцию, а также сложной технологии нанесения (крепления). Наиболее технологичным является применение тонкослойных покрытий.

Огнезащитные свойства тонкослойных вспучивающихся покрытий проявляются за счет увеличения толщины слоя и изменения теплофизических характеристик при интенсивном тепловом воздействии в условиях пожара. При воздействии высокой температуры такие покрытия образуют пенистый слой кокса, а толщина покрытия увеличивается до 200 раз, достигая нескольких сантиметров [5]. При этом нагрузка на конструкцию увеличивается не существенно, чем и объясняется распространенность применения данного способа огнезащиты на объектах нефтегазовой отрасли. Ввиду этого проведение настоящего исследования было ограничено применением тонкослойных огнезащитных покрытий.

Коэффициент вспучивания зависит не только от природных свойств материала, но и от условий его нагрева (максимальной температуры и скорости ее подъема). Поэтому для одного и того же материала, обладающего способностью вспучиваться при нагревании, коэффициент вспучивания может колебаться в очень широких пределах. Причиной вспучивания и образования пористости служит выделение водяного пара или газа при высоких температурах. Одни виды сырья при нагреве размягчаются, что способствует возникновению в них пор, другие растрескиваются и распадаются на более мелкие частицы, чем до нагрева, что также приводит к образованию высокопористой структуры.

Выбор средства и способ проведения огнезащиты определяется с учетом следующих условий [12]:

- требуемая степень огнестойкости зданий и сооружений;
- тип конфигурации стальной конструкции и ее расположение в пространстве;
- вид и величина нагрузки на конструкцию;
- условия проведения огнезащитных работ;
- срок монтажа огнезащиты;

- эстетические и экологические характеристики огнезащитного покрытия;
- условия эксплуатации огнезащитного покрытия (уровень агрессивности окружающей среды);
- стоимость огнезащитной обработки, включающая цену огнезащитного материала и затраты на работы по огнезащите.

1.4. Анализ существующих методов определения огнезащитной эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций

Обоснование выбора применения огнезащитных составов осуществляется по принципу эффективности. Согласно п.3.4 ГОСТ Р 53295-2009 показателем эффективности средства огнезащиты является огнезащитная эффективность, которая характеризуется временем в минутах от начала огневого испытания до достижения критической температуры (500 °С) стандартным образцом из стального двутаврового прокатного профиля с огнезащитным покрытием, т.е. огнезащитная эффективность средства огнезащиты – это способность противостоять стандартному тепловому воздействию в течение определенного времени. Чем дольше состав противостоит температурному воздействию, тем выше его огнезащитная эффективность.

В отечественных и зарубежных нормативных документах представлены различные методики проведения испытаний тонкослойных вспучивающихся покрытий на огнезащитную эффективность, существенно отличающиеся условиями проведения испытаний.

В Российской Федерации ГОСТ Р 53295-2009 регламентирует метод определения огнезащитной эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций. Сущность метода заключается в определении времени от начала стандартного теплового воздействия на опытный образец до наступления условно

принятого предельного состояния этого образца – повышения температуры до 500 °С.

В качестве образцов, на которые наносится средство огнезащиты, используют стальные колонны двутаврового сечения. Высота образца (1700±10) мм. На стальную колонну устанавливают термопары и наносят средство огнезащиты в соответствии с рекомендуемой технологией.

Подготовленный образец помещают в печь и проводят испытания в стандартном температурном режиме [20] без статической нагрузки, т.к. показатель эффективности непосредственно связан с огнезащитным покрытием, а не с конструкцией, до наступления предельного состояния опытного образца, возникающей при достижении образцом температуры 500°С. Данная температура определяется как средняя температура по 3-м термопарам установленным на опытном образце.

Совместно с этим оценивается и поведение огнезащиты в процессе испытания (образование трещин, сползание, неравномерное вспучивание, взрывообразное разрушение и т.п.). После проведения такой оценки определяется возможность его применения в производстве на определенных типах конструкций.

В процессе испытания в печи должен быть создан стандартный температурный режим, характеризуемый зависимостью

$$t = t_0 + 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1), \quad (2)$$

где t – температура в печи за время τ ;

t_0 – температура в печи до начала теплового воздействия (принимается равной температуре окружающей среды), °С;

τ – время от начала испытания, мин.

«Стандартный пожар» воспроизводится в печах, футерованных огнеупорным кирпичом, путем сжигания керосина с помощью специальных форсунок.

В зависимости от времени наступления предельного состояния образца огнезащитная эффективность подразделяется на 7 групп:

- 1-я группа — не менее 150 мин;
- 2-я группа — не менее 120 мин;
- 3-я группа — не менее 90 мин;
- 4-я группа — не менее 60 мин;
- 5-я группа — не менее 45 мин;
- 6-я группа — не менее 30 мин;
- 7-я группа — не менее 15 мин.

При определении группы огнезащитной эффективности средств огнезащиты результаты испытаний с показателями менее 15 мин не рассматривают.

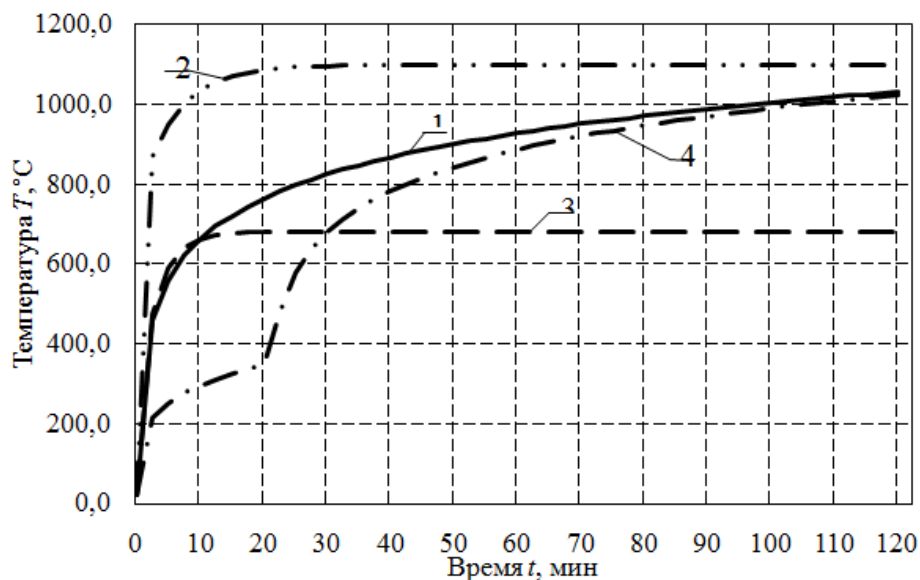
Контрольный метод испытаний, изложенный в [24], используется при проверке огнезащитной эффективности средств в процессе их производства, а также при их поставках крупными партиями (из расчета требуемой массы средства огнезащиты на 1000 м^2 поверхности металлоконструкции и более). Сущность данного метода та же. В качестве образца используется стальная пластина размером $600 \times 600 \times 5$ мм с нанесенным на нее средством огнезащиты. Необогреваемая поверхность опытного образца должна иметь теплоизоляцию из материала с термическим сопротивлением не менее $1,9 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ и толщиной не менее 100 мм. Испытания проводятся на установке для теплофизических исследований и испытаний малогабаритных фрагментов плоских конструкций и отдельных узлов их стыковых сопряжений и закреплений. Как было сказано ранее, испытания проводят в условиях стандартного температурного режима [20].

Стандартный температурный режим, представленный графиком изменения температуры от времени нагревания огневой камеры печи (Рисунок 11) и заложенный в основу вышеизложенной методики, является весьма условной усредненной зависимостью температурного режима реальных пожаров. Фактические температуры на реальных пожарах могут существенно отличаться. Например, в нефтехимической промышленности и на морских нефтяных

платформах существует угроза возникновения интенсивных пожаров с высокой температурой и скоростью распространения (более 900 градусов в течение 5 минут), а также возможным «ударом пламени» по конструкциям. Кроме того, стандартная температурный режим предполагает наличие неограниченного количества горючих материалов; в действительности их количество всегда ограничено, в связи, с чем ограничена и продолжительность реальных пожаров.

Помимо этого, большая часть оборудования на объектах нефтегазовой находится под давлением. Разрушение такого оборудования и выход горючих веществ наружу, в особенности газа, сопровождается возникновением свищей, реактивных струй и факельного воспламенения с высокой скоростью газового потока (реактивное пламя). Аэродинамическое и температурное воздействие газовой струи увеличивает тепловые и механические нагрузки на огнезащитные материалы, увеличивает конвективный и радиационный тепловой поток, что приводит к газовой эрозии и абляции.

Как указано в ГОСТ [20] при необходимости может быть создан другой температурный режим, учитывающий реальные условия пожара, и отличающийся от стандартного режима. ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014 устанавливает альтернативные и дополнительные методы испытания конструкций на огнестойкость, учитывающие реальные условия пожара. Предусмотрены три альтернативных температурных режима: углеводородный; наружный; медленно развивающийся (тлеющий) (Рисунок 11).



1 – стандартный; 2 – углеводородный; 3 – наружный; 4 – медленно развивающийся (тлеющий)

Рисунок 11 – Температурные режимы

На практике в нефтегазовой промышленности возможны интенсивные пожары, характеризующиеся высокой температурой и скоростью распространения. Для таких условий предусмотрено проведение испытаний по углеводородному температурному режиму [27]

$$t = 1080 \cdot (1 - 0.325e^{-0.167\tau} - 0.675e^{-2.5\tau}) + 20 \quad (3)$$

Требования к пожарно-техническим характеристикам некоторых строительных конструкций в определенных случаях могут быть более низкими по сравнению с требованиями к элементам, используемым в качестве противопожарных преград внутри здания. Например, наружные стены зданий, которые могут быть подвержены воздействию внешнего пожара, распространяющегося от соседнего здания или из окон зданий. При этом возникает необходимость исключить возможность распространения пожара в другие помещения здания за счет утраты огнестойкости наружных стен при внешнем огневом воздействии. С учетом особенностей внешнего пожара для оценки пределов огнестойкости наружных конструкций можно использовать наружный температурный режим [27]

$$t = 660 \cdot (1 - 0.687e^{-0.32\tau} - 0.313e^{-3.8\tau}) + 20 \quad (4)$$

Огнестойкость некоторых конструкций может быть определена из условия медленно развивающегося (тлеющего) температурного режима [27]

$$\text{при } 0 < \tau < 21 \quad t = 154 \cdot \tau^{0.25} + 20 \quad (5)$$

$$\text{при } \tau > 21 \quad t = 345 \cdot \lg(8 \cdot (\tau - 20) + 1) + 20 \quad (6)$$

Типовые температурные режимы, рассчитываемые по выражениям (2)-(6), показывают изменение температуры в испытательной печи с течением времени, то есть задается и контролируется только один параметр – температура в печи. Нагрев металлической конструкции, с нанесенным на нее огнезащитным покрытием, происходит со всех сторон равномерно, без движения окружающей испытываемый образец среды.

Как видно из рисунка 13 углеводородный температурный режим отличается от стандартного температурного режима более резким подъемом температуры – за первые пять минут температура достигает 940 °С и продолжает расти до 1100 °С, благодаря чему достигается эффект «теплого удара пламени».

Однако, следует добавить, что данный нормативный документ [27] не содержит сведений о методах проведения испытаний, методах оценки состояния строительных конструкций и критериях наступления предельных состояний в альтернативных температурных режимах.

В большинстве случаев температурный режим пожаров, возникающих на объектах нефтегазовой отрасли, попадает под описание углеводородного температурного режима, например при горении пролива нефтепродуктов. Однако в случае струйного истечения горящих жидкостей и газов из аппаратов и трубопроводов под давлением формируется иной режим пожара, отличающийся аэродинамическим воздействием газового потока на окружающие объекты.

Поэтому предложено ввести понятие *факельного углеводородного горения*. Установление значений основных параметров предлагаемого режима горения, а именно температуры и скорости газового потока, приводится во второй главе настоящей работы.

Остальные методики по определению свойств огнезащитных покрытий по своей сути аналогичны методике [24]. Например, в методике «Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу» [44] представляется метод, сущность которого заключается в определении времени прогрева необогреваемой стороны образца до критической температуры (для стали - 500°C) в процессе испытаний, которые проводятся по заданному температурному режиму (Таблица 2).

Таблица 2 – Температурный режим при определении теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий

Время от начала испытаний, τ , мин	Температура в печи, t , °C	Время от начала испытаний, τ , мин	Температура в печи, t , °C
5	550-590	30	810-840
10	650-690	35	840-870
15	710-750	40	860-890
20	755-795	45	870-900

Данный температурный режим в численном виде отражает зависимость стандартного режима испытаний. Отличием данной методики является испытание образцов в виде пластинок из стали марки Ст3 с размерами $(140 \pm 1) \times (80 \pm 1)$ мм и толщиной 0,8 - 0,9 мм в испытательной установке, представляющей собой печь с трубчатыми электронагревательными приборами (ТЭН). Изменение температурного режима в печи не представляется возможным. Особенностью данной методики является измерение теплового потока, падающего на образец.

В руководстве [47] изложены методы контроля качества огнезащитных работ, среди которых имеется несколько экспресс-методов.

Метод оценки качества примененных огнезащитных составов по металлу сравнивает значения времени эффективности теплоизоляции, полученные при испытаниях образца по методике [44] и значения времени, полученные для этого

образца при испытаниях в стандартном температурном режиме (эталонный образец). То есть для прогноза определенной группы эффективности необходимо получение значений

$$\tau_x \geq \tau_{\text{э}} , \quad (7)$$

где τ_x – значение времени огнезащитной эффективности испытуемого образца;
 $\tau_{\text{э}}$ – значение времени огнезащитной эффективности для эталонного образца огнезащитного покрытия.

В основе методов оценки качества огнезащитной обработки вспучивающимися огнезащитными составами и оценки качества примененных вспучивающихся огнезащитных составов лежит расчет коэффициента вспучивания по приложению Ф стандарта [20]. Для оценки качества отбираются образцы покрытия, из которых вырезаются диски диаметром 3-5 мм в количестве не менее 3 шт. и помещаются на негорючую термоустойчивую подложку на расстоянии не менее 10 мм друг от друга. Далее проводят определение коэффициента вспучивания. Вспучивание покрытия производят в термошкафу с выдержкой образца при температуре 600°C в течение 5 мин.

Коэффициент вспучивания $K_{\text{вс}}$ рассчитывают как отношение толщины вспученного слоя h к исходной толщине покрытия h_0

$$K_{\text{вс}} = \frac{h}{h_0} \quad (8)$$

Коэффициент вспучивания покрытия определяют как среднее арифметическое трех измерений для всех испытанных образцов и должен составлять не менее 10 [20].

На территории Российской Федерации существующие методы по определению эффективности средств огнезащиты не предусматривают

проведение испытаний в условиях подвижной среды, где на покрытие оказывается существенное аэродинамическое воздействие.

Можно выдвинуть гипотезу о том, что предельное состояние по огнестойкости образца с нанесенным вспучивающимся покрытием наступит значительно быстрее при воздействии высокоскоростного газового потока, что связано с возникновением в жидкой и пористой структуре покрытия газовой эрозии и абляции. Поэтому необходима разработка методики испытаний огнезащитных покрытий, учитывающая комплексное воздействие скорости и температуры газового потока (условия факельного углеводородного горения). Такая методика должна применяться для испытания покрытий, наносимых на строительные конструкции объектов нефтегазовой отрасли.

Некоторые подходы к решению данной проблемы изложены в зарубежных стандартах (Таблица 3).

В одном из зарубежных литературных источниках [83] содержатся сведения о стадиях углеводородного температурного режима, которые отличаются между собой температурой пламени, скоростью распространения и продолжительностью (Рисунок 12):

1. Jet Fire – «струя огня» – воздействие реактивного пламени (реактивное горение).
2. Diffuse Hydrocarbon Fire – диффузионное горение.
3. Radiated Heat – «излучаемое тепло» – лучистое воздействие на смежные конструкции.

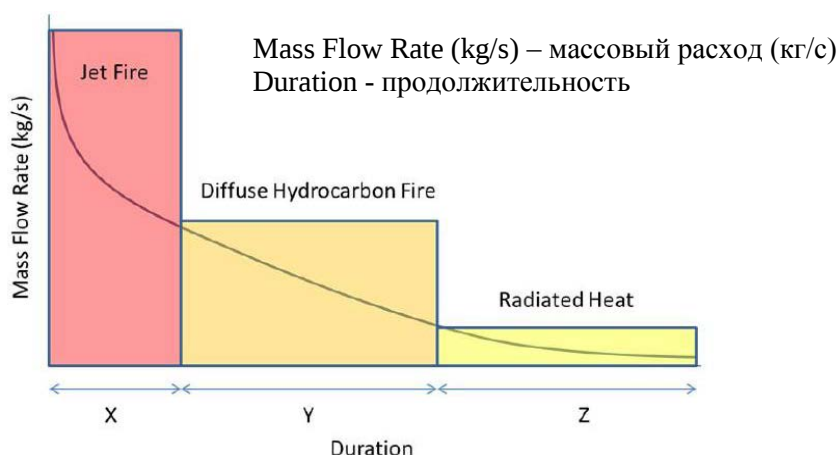


Рисунок 12 – Стадии углеводородного температурного режима

Как видно из схемы, наибольший массовый расход продуктов горения присущ стадии воздействия реактивного пламени (горение углеводородов под давлением).

Таблица 3 – Зарубежные нормативные документы по оценке огнестойкости и эффективности огнезащитных покрытий для строительных конструкций

№	Название	Страна	Описываемый температурный режим	Аналог в России
ANSI/UL 1709 (2007)	Standard for Safety for Rapid Rise Fire Tests of Protection Materials for Structural Steel (Перевод: «Оценка стойкости покрытия в условиях стремительного роста температуры для конструкционных сталей»)	США	Углеводородный температурный режим	отсутствует
ASTM E119	Fire tests of building construction and materials (Перевод: «Огневые испытания строительных конструкций и материалов»)	США	Стандартный температурный режим	отсутствует
ASTM E 1529-14A	Standard Test Methods for Determining Effects of Large Hydrocarbon Pool Fires on Structural Members and Assemblies (Перевод: «Стандартные методы испытаний для определения влияния крупных	США	Стандартный температурный режим	отсутствует

	углеводородных пожаров на элементы конструкции и сборки»)			
UL 263 (1997-02)	Fire tests of building construction and materials (<i>Перевод:</i> «Огневые испытания строительных конструкций и материалов»)	США	Стандартный температурный режим	отсутствует
UL 1709	Standard for Safety for Rapid Rise Fire Tests of Protection Materials for Structural Steel (<i>Перевод:</i> «Оценка стойкости покрытия в условиях стремительного роста температуры для конструкционных сталей»)	США	Углеводородный температурный режим, реактивная струя	отсутствует
NFPA 251	Standard Methods of Tests of Fire Resistance of Building Construction and Materials (<i>Перевод:</i> «Стандартный метод испытания на огнестойкость строительных конструкций и материалов»)	США	Стандартный температурный режим	отсутствует
CAN/ULC -S101-04	Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials (<i>Перевод:</i> «Стандартные методы испытания на огнестойкость строительных конструкций и материалов»)	Канада	Стандартный температурный режим Аналог (аналог UL263, ASTM E119)	отсутствует
DIN 4102-2-1998	Огнестойкость строительных материалов и конструкций. Часть 1. Строительные материалы, термины и определения, требования и испытания	Германия	Углеводородный температурный режим, реактивная струя (аналог UL 1709)	отсутствует
BS 476-21:1987 (с поправками от 2014 г)	Fire tests on building materials and structures. Methods for determination of the fire resistance of load bearing elements of construction (<i>Перевод:</i> «Материалы и конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Часть 21. Методы определения огнестойкости элементов конструкций, несущих нагрузку»)	Великобритания	Углеводородный температурный режим	отсутствует
EN 1991-1-2	Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions -	Европа	Стандартный, наружный,	НСП EN 1991-1-2-2011

	Actions on structures exposed to fire “Еврокод 1. (<i>Перевод:</i> «Воздействие на строительные конструкции. Часть 1-2. Общие воздействия. Воздействие огня на строительные конструкции»)		углеводородный температурные режимы	ЕВРОКОД 1: Воздействия на сооружения – Часть 1-2: Основные воздействия – Воздействия на сооружения при пожаре Приведены номинальные температурно-временные зависимости (стандартный, наружный, углеводородный) и параметрические температурно-временные зависимости, без описание методов проведения испытаний
EN 1363:1/2/3-1999	Fire resistance tests. General requirements Alternative and additional procedures (<i>Перевод:</i> «Испытания на огнестойкость. Часть 1. Общие требования. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы. Часть 3. Испытания на огнестойкость. Часть 3: Проверка эксплуатационных характеристик печей»)	Евросоюз	Стандартный, наружный, углеводородный, тлеющий температурные режимы	ГОСТ Р ЕН-1363-2-2014 «Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы»
ISO 22899-1:2007	Determination of the resistance to jet fires of passive fire protection materials -- Part 1: General requirements (<i>Перевод:</i> «Определение стойкости конструкций и конструктивных элементов к струйному пламени. Часть 1. Общие требования»)	Международный	Углеводородный температурный режим, реактивная струя	отсутствует
ISO/TR 22899-2:2013	Determination of the resistance to jet fires of passive fire protection -- Part 2: Guidance on classification and implementation methods (<i>Перевод:</i>	Международный	Углеводородный температурный режим, реактивная струя	отсутствует

	«Определение стойкости к струйному огню материалов для пассивной противопожарной защиты. Часть 2: Руководство. Методы классификации и применения»)			
ISO 834-3:2012	Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 3: Commentary on test method and guide to the application of the outputs from the fire-resistance test (<i>Перевод: «Испытание на огнестойкость элементов строительных конструкций. Часть 3. Комментарии по методам испытаний и применению результатов испытаний»</i>)	Между народн ый	Стандартный температурный режим	Отсутствует
Отчет ОТИ 95 634	«Jet-fire resistance test of passive fire protection materials» (Перевод: «Тест на огнестойкость пассивных огнезащитных материалов под действием реактивного пламени»)		Описывается метод проведения испытаний в условиях струйного реактивного пламени с помощью пропановой горелки	

Особенно интересны испытания огнезащитных составов по стандарту UL 1709 (Underwriters Laboratory, USA) – «Оценка стойкости покрытия в условиях стремительного роста температуры». Данный стандарт является первым из стандартов в котором был представлен режим углеводородного горения. UL 1709 определяет критерии стойкости огнезащитных покрытий в условиях температурного режима, при котором температура 1100 °С достигается за первые 5 минут горения. Такая температура поддерживается на протяжении всего периода испытания.

Дополнительно, проводится испытание по стандарту «прямого удара» реактивного пламени (Jet Fire) (Lloyd's Register), что также не нашло отражение в отечественных нормативных актах.

Международные стандарты ISO 22899-1:2007 и ISO/TR 22899-2:2013 описывают метод (аналог метода, изложенного в UL 1709), в котором дается представление о поведении огнезащитных материалов и стальных конструкций под воздействием реактивного пламени. Реактивное пламя моделируется с помощью выброса горючих газов высокого давления, сжиженного газа и воспламеняющегося жидкого топлива, что увеличивает тепловые и механические нагрузки на огнезащитные материалы, увеличивает конвективный и радиационный тепловой поток, схожие с сильной эрозией. Для создания подобных условий данный метод предусматривает помещение образца в полую камеру с подведенной трубой (Рисунок 13), через которую происходит выброс газа, в результате чего образуется огненный шар. В качестве топлива используется пропан. Высокие эрозивные показатели образуются благодаря высокоскоростной газовой струе, проходящей над поверхностью образца. Скорость струи составляет около 60-100 м/с, Средний тепловой поток составляет около 240 кВт/м². [83]



Рисунок 13 – Проведение испытаний по международному стандарту ISO 22899-1:2007 и ISO/CD 22899-2:2009

Основным недостатком данных методик испытаний является использование достаточно громоздкого и дорогостоящего оборудования, в настоящее время не

имеющих аналогов в России, что обуславливает целесообразность разработки более экономичных и простых методов испытаний. К тому же представленные методики не гарантируют повторяемости условий проведения эксперимента, так как параметры высокоскоростной струи газа (скорость, температура) при взаимодействии с огнезащитным покрытием могут существенно изменяться и их трудно контролировать.

Согласно приведенным сведениям, испытание огнезащитного покрытия в условиях стандартного температурного режима не является достаточным основанием для применения его в качестве огнезащиты металлических конструкций объектов нефтегазовой отрасли. При обеспечении их противопожарной защиты следует ориентироваться на реальные и наиболее жесткие ситуации, которые могут возникнуть при пожаре. Разработка противопожарной защиты должна проводиться с учетом конкретного огневого воздействия, а испытание эффективности средств огнезащиты должны проводиться в различных температурных режимах, в зависимости от условий эксплуатации данных составов. Существующие потребности в создании указанной методики определения огнезащитной эффективности накладывают ограничения на точность, эффективность и скорость проведения алгоритма испытаний.

1.5. Формулировка научной задачи и методический замысел ее решения

При изучении пожаров, возникающих на объектах нефтегазовой отрасли, и их температурных режимов, было введено понятие факельного углеводородного горения, характеризующееся высокой температурой и скоростью распространения газового потока, с дополнительными температурными и механическими нагрузками на окружающие объекты.

Проведенный анализ состояния вопроса показал, что в России отсутствует метод экспериментального испытания эффективности огнезащитных покрытий

для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения. Существующие в мире установки для определения огнезащитной эффективности являются очень громоздкими и дорогостоящими.

Принятый на территории Российской Федерации температурный режим испытаний огнезащитных составов [27], не учитывает скоростные параметры распространения газового потока, характерные для пожаров факельного горения.

В имеющейся методике определения огнезащитной эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций [24] отсутствуют сведения о методах проведения испытаний в условиях принятого углеводородного режима горения, методах оценки состояния строительных конструкций и критериях наступления предельных состояний.

В методике определения теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу [44] не определены возможности создания условий углеводородного горения, характерного для пожаров объектов нефтегазовой отрасли.

Необходимость создания методики определения эффективности огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения обусловлена рядом задач – основные из них следующие:

- получение более достоверных результатов испытаний и повышение их воспроизводимости при испытаниях огнезащитных составов для стальных конструкций технологических сооружений, применяемых на объектах нефтяной и газовой промышленности;
- уменьшение времени, затрачиваемого на подготовку и проведение эксперимента;
- уменьшение материальных затрат на проведение эксперимента;
- расширение сведений об огнезащитных свойствах покрытий и их поведения в условиях близких к реальным пожарам;
- создание экспресс-метода и соответствующих портативных приборов для оценки качества огнезащитной обработки металлоконструкций.

На сегодняшний день оценка качества обработки металлоконструкций огнезащитными составами на строительном объекте ограничивается:

- контролем по представленной документации;
- визуальным контролем общей толщины и целостности покрытия;
- оценкой качества огнезащитных составов экспресс-методами и методами термического анализа, предполагающие испытаний огнезащитных составов в условиях стандартного температурного режима.

Этих показателей недостаточно для полного представления о состоянии огнезащищенности металлоконструкций.

На основе анализа состояния вопроса необходимо решить научную задачу, сущность которой заключается в создании научно-методического аппарата определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения. Решение данной задачи позволит эффективно использовать разработанную методику при создании новых огнезащитных составов и контроле качества существующих в процессе эксплуатации на объектах нефтегазовой отрасли. Как показывает опыт, в этом случае целесообразно применять именно экспресс-методы исследования, позволяющие испытывать образцы небольшого размера, избежав значительных материальных и временных затрат, с последующим проведением крупномасштабных испытаний при появлении такой необходимости.

Для решения поставленной задачи необходимо (рисунок 14):

- определить факторы, влияющие на огнезащитные составы в условиях факельного углеводородного горения;
- разработать конструкцию экспериментальной установки, позволяющей смоделировать необходимые условия факельного углеводородного горения;
- спланировать и провести эксперимент, по проверке научных результатов исследования;
- разработать методику определения огнезащитной эффективности этих составов;

– разработать критерии применимости огнезащитных составов для стальных конструкций технологических сооружений объектов нефтегазовой отрасли.

Выводы по Главе 1

1. Проведенный анализ пожарной опасности объектов нефтегазовой отрасли и аналитический обзор статистики показал, что одним из основных сценариев развития пожаров на технологических установках объектах нефтегазовой отрасли является факельное углеводородное горение, характеризующееся сильными высокотемпературными газовыми потоками, истекающими из отверстий, трещин, разрывов разгерметизированного оборудования и сопровождающееся тепловым ударом пламени по конструкциям. Температура таких газовых потоков может достигать 1300 °С, а скорость истечения может быть близка к местной скорости звука (до 340 м/с). Высокотемпературные газовые потоки оказывают аэродинамическое и температурное воздействие на окружающие объекты и оборудование.

2. В настоящее время большая часть строительных конструкций изготавливается из металла. Высокие значения теплопроводности металла приводят к быстрому прогреву конструкций, потере их механической прочности, снижению огнестойкости. В следствии возможны потеря устойчивости конструкций и их обрушение. Повышения огнестойкости металлических конструкций добиваются применением различных видов огнезащиты, которая интенсивно разрушается при воздействии высокотемпературного газового потока.

3. Принятые в разных странах методики испытания огнезащитных покрытий различаются источниками нагревания образца, температурными режимами воздействия на образец, размерами, формой образцов и прочими факторами.

4. На территории Российской Федерации испытания проводят в огневой камере печи, где с достаточной точностью выдерживается стандартный

температурный режим и отсутствует аэродинамическое воздействие газового потока на огнезащитное покрытие, то есть в этом случае принято, что огнезащитная эффективность покрытия зависит только от одного фактора – температуры.

5. В зарубежных методиках при проведении испытаний в условиях углеводородного температурного режима используется достаточно громоздкое и дорогостоящее оборудование. К тому же известные методики не гарантируют повторяемости условий проведения эксперимента, так как параметры высокоскоростной струи газа (скорость, температура) при взаимодействии с огнезащитным покрытием могут существенно изменяться и их трудно контролировать.

6. Актуальной проблемой является разработка новых и совершенствование существующих методов, средств и материалов огнезащиты для строительных конструкций опасных производств, решение которой поможет минимизировать последствия техногенных катастроф. Частью этой проблемы является задача испытаний и оценки различных огнезащитных покрытий для стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли в условиях приближенных к реальным.

7. Существует необходимость в разработке экспресс-методики проведения испытаний по определению огнезащитной эффективности покрытий в высокотемпературных газовых потоках, имеющих высокую скорость. Имитация высокотемпературного газового потока, истекающего с высокой скоростью, требует существенного усложнения испытательного оборудования и приводит к удорожанию испытаний. С одной стороны, надо максимально приблизить условия испытания к условиям пожара, а с другой, сколько возможно упростить конструкцию и методику проведения эксперимента и, следовательно, удешевить испытания. Еще одним немаловажным фактором, является гарантия повторяемости условий проведения эксперимента. Существующие потребности в

создании указанной методики накладывают ограничения на точность, эффективность и скорость проведения алгоритма испытаний.

8. Основное содержание первой главы и полученные научные результаты отражены в работах автора [5, 73, 76].



Рисунок 14 – Схема решения научной задачи

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В главе приведены особенности развития процесса факельного горения, определены граничные условия проведения исследования, обоснованы конструкция и параметры испытательной установки, предложен способ проведения испытаний по определению эффективности огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке, выведены экспоненциальные уравнения регрессии для описания зависимости и скорости от расстояния между газовой горелкой и рассматриваемым сечением газового потока. Изложен процесс проведения испытаний огнезащитных составов на разработанной установке.

2.1. Теоретические предпосылки и определение граничных условий

Исходными данными для разработки методики определения эффективности огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения и его влияние на огнезащиту явились особенности развития данного процесса, сведения, о котором были получены из обзора литературных данных и анализа пожарной опасности объектов нефтегазовой отрасли.

Исследование способов определения огнезащитной эффективности ограничено применением тонкослойных огнезащитных покрытий, с толщиной сухого слоя, не превышающей 3 мм, виду их наиболее широкой распространенности применения на объектах нефтегазовой отрасли.

Стойкость огнезащитных составов к различным средам и веществам, типичным для данного класса пожара, а именно: атмосфероустойчивость, стойкость к ультрафиолетовому излучению, циклическому резкому перепаду температур, к воздействию окружающей среды содержащей углекислый газ и диоксид серы, стойкость к вибрации, адгезионная способность и др. – в нашей работе не рассматривались, в связи с большим объемом проведения необходимых

исследований по каждому вышеперечисленному свойству. Исследование было ограничено проверкой стойкости к высоким температурам и скоростным нагрузкам.

В настоящее время накоплен большой объем теоретических и экспериментальных исследований по вопросам факельного горения [8, 14, 17, 32, 47, 68, и др.]. Опубликованная информация о фактических характеристиках факельных пожаров на объектах нефтегазовой отрасли имеет крайне противоречивый характер, в связи с чем необходимо обобщить имеющиеся данные и выделить их основные особенности развития.

При струйном истечении сжатых горючих газов, паровой и жидкой фазы СУГ и СПГ, ЛВЖ и ГЖ под давлением возникает опасность образования диффузионных факелов. В реальных условиях такие струи являются турбулентными и имеют осесимметричную веретенообразную форму. При вытекании газовой струи снизу вверх она разбавляется воздухом. Вблизи от отверстия истечения образуется пограничный слой переменного состава. На "бесконечном удалении" от отверстия – чистый воздух, в ядре – чистый горючий газ, а в промежуточной зоне находится смесь газов, концентрация которой лежит в области воспламеняемости: от "бедной" на внешней границе струи до "богатой" на внутренней. В промежутке между концентрационными пределами лежит поверхность, состава близкого к стехиометрическому. Если к такой газовой струе поднести источник зажигания, то смесь вспыхнет. Факел пламени установится именно на этой стехиометрической поверхности. Возникшие газовые конвективные потоки продуктов горения обеспечат интенсивный приток воздуха к факелу, а потоки продуктов горения расширят верхнюю часть факела. Снизу, с боков факел будет поджиматься восходящими потоками горючего газа [67].

В зависимости от режимов истечения горючего газа, условий его перемешивания с воздухом и условий воспламенения, процесс сгорания облака может развиваться различным образом.

Когда в атмосферу попадает значительное количество горючего газа, а воспламенение запаздывает, тогда облако может сгорать с высокой скоростью, что может привести к образованию ударных волн. После взрыва на месте выброса образуется диффузионный факел.

Если время задержки воспламенения незначительно, тогда образование диффузионного факела не сопровождается взрывом.

При истечении горючего газа возможно образование двух типов факелов [67]:

- 1) Присопловый факел – факел, который стабилизируется непосредственно у отверстия истечения;
- 2) Висящий (или оторванный) – стабилизация происходит на некотором расстоянии от отверстия.

Как правило, в результате утечки горючего газа образуется газоздушное облако. Попадание источника воспламенения в область концентраций между НКПВ и ВКПВ приводит к воспламенению смеси. В окружающую атмосферу вытекает свежий газ и горение происходит в результате взаимной диффузии кислорода и газа в зону горения. Поэтому горение газового фонтана является диффузионным. Горение газового фонтана устойчивое, может длиться неделями и даже месяцами, от метеорологических условий не зависит. Для ликвидации такого пожара необходимо большое количество сил и средств.

Были выделены некоторые особенности, присущие развитию процессов факельного горения:

1. Возгорание в работающих под давлением сосудах и трубопроводах характеризуется быстрым ростом давления паров и газов, высокой скоростью истечения газа и его существенным расходом из разгерметизированного сосуда, что обуславливает интенсивное аэродинамическое и тепловое воздействие на окружающие объекты. Средняя температура газового потока составляет 1100 °С, средняя скорость газового потока составляет 60 м/с.

2. При факельном горении образуется большой удельный тепловой поток. Например, при горении бензина удельный тепловой поток будет равен $129,5 \text{ Вт/м}^2$, тогда как удельный тепловой поток горения древесины составляет $12,6 \text{ Вт/м}^2$, а хлопка $3,98 \text{ Вт/м}^2$ [29].

3. Наличие больших объемов легковоспламеняющихся и горючих жидкостей и газов, во многих случаях нагретых выше температуры самовоспламенения и часто находящихся под давлением (либо увеличение давления в оборудовании в результате нагрева при пожаре), а также близкое расположение и технологическая связность различных аппаратов и оборудования, уплотнённая застройка территории объекта нефтегазовой отрасли, приводят к тому, что пожары на таких объектах могут принимать значительные размеры и быстро распространяться. Во время пожаров происходят взрывы, вскипания и выбросы горящего продукта, разливы горючих жидкостей, деформация емкостей, потеря несущей способности строительных конструкций, аварии технологических аппаратов, дорогостоящей производственной арматуры и коммуникаций. При таком пожаре создается опасность распространения огня в канализационную сеть, нефтеловушки и другие открытые сооружения очистных сооружений. Сложными являются также пожары на установках, технологических аппаратах и оборудовании, которые размещаются на каркасных этажерках, имеющих сравнительно большую высоту (до 30-50 м).

4. Размеры и форма факела пламени зависят от расхода газа и формы струи. По форме факельное горение может быть в виде компактных вертикальных, горизонтальных или раздробленных, распыленных струй. В случае разрыва трубопроводов факел имеет вытянутую форму, а при пробое фланцевого соединения – веерообразную. При встречном газодинамическом воздействии истекающих в критическом режиме потоков газа, в условиях влияния ограничивающих поверхностей (например, различных технологических сооружений и коммуникаций), могут возникать пламёна с весьма сложными объемными конфигурациями. Факел пламени горячей жидкой фазы имеет яркую

желто-оранжевую окраску и дает сильное излучение. Пламя паровой фазы более прозрачно и имеет бледно-желтую окраску. Горение струи газа сопровождается характерным сильным шумом. При истечении жидкой фазы шум слабее и глуше, истечение паровой фазы сопровождается сильным свистящим звуком.

Рассмотрим влияние факельного горения на близлежащие технологические установки и строительные конструкции.

При моделировании процессов формирования тела струевого факела можно предположить, что пламя является трехмерным объемным телом, внутри которого происходят процессы горения, а излучение в окружающее пространство происходит с «наружной» оболочки пламени (как твердого тела) [79]. Поэтому, в качестве модельного приближения достаточно сложной и спонтанно меняющейся во времени формы пламени примем, что факел имеет вытянутую цилиндрическую форму, расширяющуюся в сторону истечения газа. Температура и скорость газового потока уменьшаются в сторону истечения, вследствие чего уменьшается температурное и аэродинамическое воздействие факела пламени на какую-либо конструкцию или установку также в сторону истечения газового потока.

Проведение оценки основных факторов, влияющих на огнезащитную эффективность покрытий в условиях факельного горения, показало, что, в случае возникновения пожара на объектах нефтегазовой отрасли, огнезащитные покрытия должны быть стойки не только к тепловой нагрузке, но и к эрозивному воздействию газового потока.

Определим основные процессы, происходящие при вспучивании и разрушении огнезащитных покрытий под воздействием теплового потока.

Основой вспучивающихся огнезащитных покрытий являются полимеры, состав и строение которых определяет их абляционную стойкость к аэродинамической, термической и термоокислительной деструкции. Покрытия на основе полимеров линейного строения выдерживают температуры до 900°C, а на основе полимеров сетчатого строения (фенолоформальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические) могут быть устойчивы при температурах до 3000°C. При

воздействии высокой температуры полимеры сетчатого строения разлагаются и образуют структуры с высоким содержанием углерода (графит, кокс). Связь между атомами углерода является очень прочной, что определяет высокую температуру плавления таких структур [116].

Для увеличения абляционной стойкости огнезащитных покрытий в них вводят различные армирующие наполнители в виде порошка, волокон, тканей (стеклянное, кремнеземистое, кварцевое, углеродное волокно, порошки на основе огнеупорных окислов циркония, титана, тория, асбест). Армирующие наполнители существенно повышают прочность огнезащитного покрытия [3].

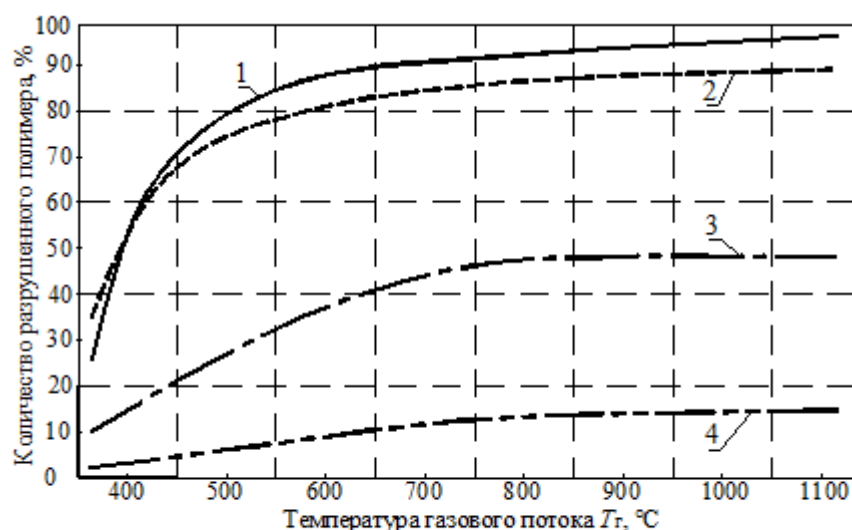
Огнезащитные покрытия характеризуются низким коэффициентом теплопроводности и большой удельной теплоемкостью. Нагревание огнезащитного покрытия сопровождается эндотермическими реакциями, поэтому материал покрытия аккумулирует большое количество тепла и вследствие низкой теплопроводности препятствуют быстрому проникновению в металлическую конструкцию больших тепловых потоков.

Разрушение огнезащитных покрытий происходит вследствие абляции - уноса высокотемпературным газовым потоком части материала с поверхности покрытия. При воздействии высокотемпературного газового потока наблюдается интенсивное разрушение полимеров (рисунок 15) [11].

Абляция полимеров является совокупностью одновременно происходящих процессов:

- сублимация – переход компонентов покрытия из твёрдого состояния в газообразное без пребывания в жидком состоянии;
- испарение – процесс перехода компонентов на поверхности покрытия из жидкого состояния в паро- или в газообразное;
- пиролиз – термическое разложение компонентов покрытия;
- сгорание – сублимация, испарение или пиролиз, сопровождаемые процессом окисления;

- газовая эрозия – разрушение поверхности покрытия под действием аэродинамических и тепловых сил газового потока.



1 – эпоксидных; 2 - полиэфирных; 3 – фенольных; 4 – кремний органических

Рисунок 15 – Разрушение полимеров в высокотемпературном газовом потоке

Сведения об огнезащитных характеристиках покрытий в условиях высокотемпературного газового потока могут быть получены в результате экспериментальных исследований опытных образцов из различных марок составов, применяемых для огнезащиты стальных конструкций (см. подраздел 2.5).

2.2. Обоснование конструкции и технических параметров испытательной установки по определению эффективности огнезащитных покрытий

Имитация высокотемпературного газового потока требует существенного усложнения испытательного оборудования и приводит к удорожанию испытаний. С одной стороны, надо максимально приблизить условия испытания к условиям пожара, а с другой, сколько возможно упростить конструкцию и методику проведения эксперимента и, следовательно, удешевить исследование.

Приемлемым решением при организации таких испытаний является применение различных горелок, с помощью которых можно создать высокотемпературный газовый поток.

Существует большое разнообразие газовых горелок, применяемых в различных отраслях промышленности, обеспечивающих дозвуковые и сверхзвуковые скорости газа. При этом температура истекающего газа может варьироваться в широких пределах и достигать нескольких тысяч градусов. Применение газовой горелки позволяет обеспечить постоянство параметров потока газа (расход, скорость истечения, температура), а также адекватную имитацию реального интенсивного пожара при относительной простоте конструкции установки. Газовая горелка позволяет регулировать температуру, состав, мощность и форму пламени, что позволяет использовать ее для воспроизводимости условий процессов горения углеводородов на объектах нефтепромышленности.

В работе [11] подтверждается достижение значительных величин линейной скорости абляции полимеров при испытании их в пламени газовой горелки (таблица 4).

Таблица 4 – Линейная скорость абляции полимеров

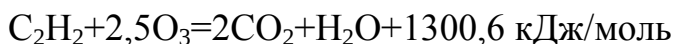
Полимер	Скорость абляции, мм/с
Фенольная смола (отвержденная)	0,157
Кремнийорганический полимер	0,378
Полиметилметакрилат	0,446
Поликарбонат	0,487
Политетрафторэтилен	0,523
Полипропилен	0,597
Полистирол	0,645
Полиэтилен	0,673

Характер пламени ацетилен-кислородной горелки схож с характером пламени горения углеводородов.

Образующаяся в горелке смесь газов вытекает из сопла и, сгорая, дает устойчивое сварочное пламя. Сгорание ацетилена в смеси с техническим

кислородом сопровождается высокой температурой, номинальная тепловая мощность доходит до 3200 кВт. В справочниках по сварке [19, 39] представлено подробное строение ацетилен-кислородного пламени и распределение температуры в нем.

Полное сгорание ацетилена в кислороде протекает по реакции [39]



Для измерения температуры газового потока ($t_{\text{гп}}$) предложено использование специальных измерителей – термопары ТХА (К), размером 0,5 мм, относящиеся к 3 классу точности. Предел допускаемой погрешности $\pm \Delta t$, °С в диапазоне температур 333,4...1350 °С составляет $0,0075 * |t|$.

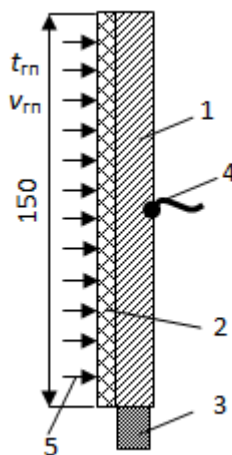
Значения температуры, фиксируемые термопарами, регистрируются с помощью электронного многоканального регистратора Ф1771-АД (Regigraf). Диапазоном измерения от -100 до 1300 °С, предел допускаемой приведенной погрешности $\pm 0,5 \%$, дискретность 1°С. Измерения скорости газового потока ($v_{\text{гп}}$) производятся специальным приемником давления (трубка Пито).

В качестве образца предложено использовать пластину из малоуглеродистой стали марки Ст3 квадратной формы шириной 150 мм, толщиной 5 мм с нанесенным на нее огнезащитным покрытием (рисунок 16). Размер образца выбирается с учетом того, чтобы пламя горелки полностью его охватывало.

Нанесение огнезащитного покрытия на образце производится по технологии, рекомендуемой производителем.

Теплоизолирующий подвижный держатель охватывает испытуемый образец, изолируя его от контакта с высокотемпературным газовым потоком с незащищенной покрытием стороны, а также с боковой поверхности покрытия и стальной пластины. Таким образом, высокоскоростной тепловой поток воздействует на расположенное к нему перпендикулярно огнезащитное покрытие, постепенно нагревая его и стальную пластину. Температура $t_{\text{пл}}$ (°С) стальной

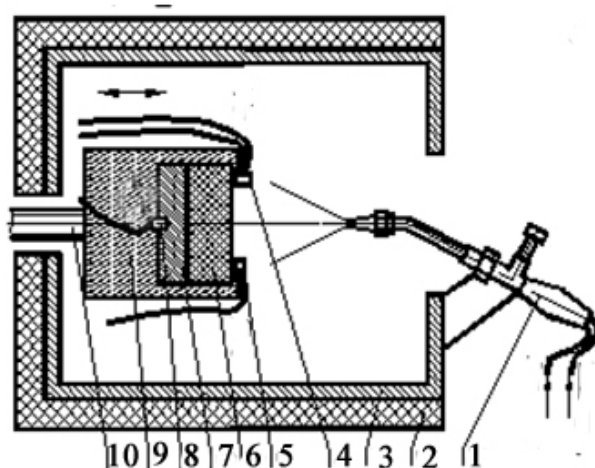
пластины регистрируется термопарой ТХА(К), размером 0,5 мм, зачеканенной на оси стальной пластины с незащищенной покрытием стороны.



- 1 – стальная пластина; 2 – огнезащитное покрытие; 3 – теплоизолированный подвижный держатель образца; 4 – термопара для измерения температуры стальной пластины;
5 – высокотемпературный газовый поток

Рисунок 16 – Образец для испытаний

Таким образом, установка для испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке представляет собой горизонтальный теплоизолированный ограждающий корпус, внутри которого установлен теплоизолированный подвижный держатель образца, который может перемещаться вдоль оси корпуса с помощью резьбового штока (рисунок 17). Резьбовой шток приводится во вращение устройством механической подачи, обеспечивающим заданный режим перемещения теплоизолированного держателя образца в высокотемпературном газовом потоке. Сбоку на корпусе установлена кислородно-ацетиленовая горелка, мундштук которой выставлен соосно оси корпуса. Таким образом, ось мундштука совпадает с осью испытуемого образца, что обеспечивает симметричное воздействие газового потока на огнезащитное покрытие.



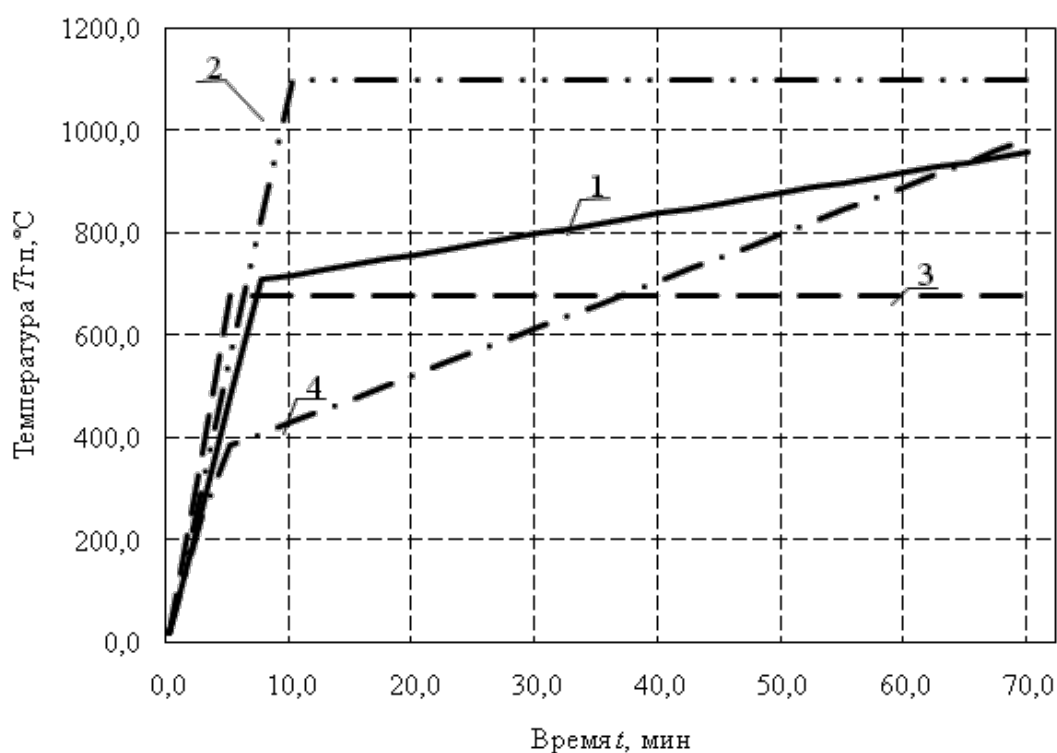
1 – кислородно-ацетиленовая горелка; 2 – теплоизоляция; 3 – ограждающий корпус; 4 – приемник давления газового потока (трубка Пито); 5 – термопара для измерения температуры газового потока; 6 – огнезащитное покрытие; 7 – стальная пластина; 8 – термопара для измерения температуры стальной пластины; 9 – теплоизолированный подвижный держатель образца; 10 – шток для перемещения держателя с образцом.

Рисунок 17 – Схема экспериментальной установки для испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке

Размеры ограждающего корпуса должны быть согласованы с размерами газового потока, создаваемого горелкой. При этом диаметр ограждающего корпуса должно быть больше диаметра газового потока на участке перемещения теплоизолированного подвижного держателя образца. Температура пламени кислородно-ацетиленовой горелки может достигать 3200 °С, скорость истечения газового потока – 200 м/с. По мере удаления от мундштука кислородно-ацетиленовой горелки температура и скорость газового потока постепенно уменьшаются. Размещая испытуемый образец на заранее определенных расстояниях от газовой горелки можно задавать необходимый температурный режим воздействия газового потока. При этом скорость газового потока также будет варьироваться в зависимости от расстояния до газовой горелки. Параметры высокоскоростного газового потока контролируют термопарой и приемником давления газового потока (трубка Пито), установленными перед огнезащитным покрытием. Термопара измеряет температуру газового потока $t_{гп}$ (°С), а приемник

давления газового потока – скорость газового потока $v_{гп}$ (м/с) по разнице полного и статического давлений потока. Таким образом, перемещая испытуемый образец в высокотемпературном газовом потоке, имитируют реальные условия интенсивного пожара, характерного для объектов нефтегазовой отрасли.

Для простоты управления и реализации типовых температурных режимов (рисунок 11) на экспериментальной установке (рисунок 17) можно аппроксимировать прямыми линиями (рисунок 18). При этом остается возможность сравнивать результаты испытаний по определению огнезащитной эффективности покрытий, проведенные в условиях стандартного температурного режима и в условиях воздействия высокотемпературного газового потока.



1 – стандартный; 2 – углеводородный; 3 – наружный; 4 – медленно развивающийся (тлеющий)

Рисунок 18 – Типовые температурные режимы испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке

Таким образом, предложенная экспериментальная установка и рекомендуемые температурные режимы позволяют оценивать и сравнивать огнезащитную эффективность покрытий в различных высокотемпературных газовых потоках.

С целью решения поставленных задач экспериментальная часть исследования была разделена на два этапа:

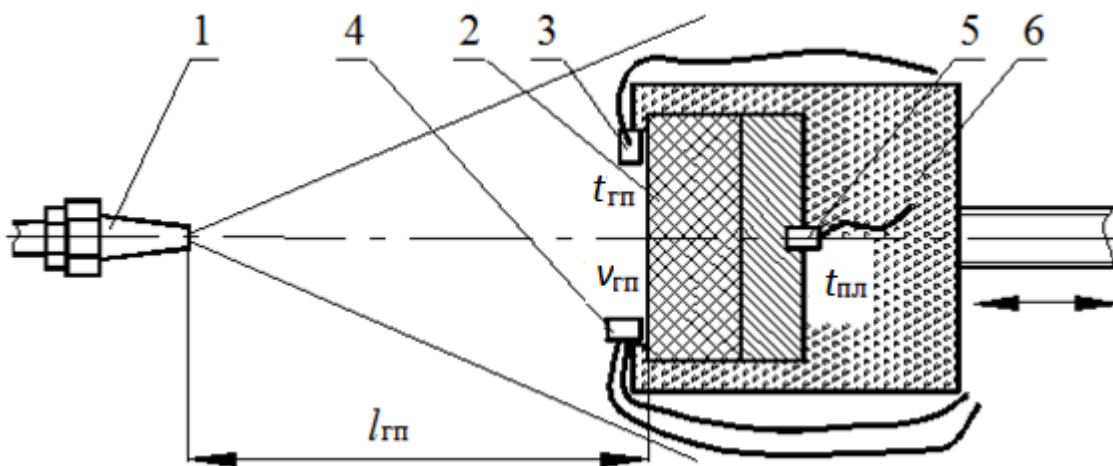
1. Определение параметров газового потока кислородно-ацетиленовой горелки при испытаниях огнезащитных покрытий, с целью установления степени адекватности условий проведения эксперимента реальным условиям пожаров на объектах нефтегазовой отрасли.

2. Определение показателя огнезащитной эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций на разработанной экспериментальной установке.

2.3. Определение параметров высокотемпературного газового потока

Определение параметров созданного кислородно-ацетиленовой горелкой высокотемпературного газового потока вдоль его оси проводили в следующей последовательности.

Теплоизолированный подвижный держатель образца с постоянной скоростью двигали вдоль оси газового потока, постепенно приближая к газовой горелке (варьируется расстояние от газовой горелки до огнезащитного покрытия $l_{гп}$). Через каждые 10 мм термопары регистрировали температуру газового потока $t_{гп}$, а приемник давления газового потока – его скорость $v_{гп}$ (рисунок 19). В результате получили зависимости температуры $t_{гп}$ и скорости $v_{гп}$ газового потока от расстояния между газовой горелкой и огнезащитным покрытием $l_{гп}$.



1 – кислородно-ацетиленовая горелка; 2 – огнезащитное покрытие; 3 – термопара измерения температуры газового потока; 4 – приемник давления газового потока (трубка Пито); 5 – термопара измерения температуры стальной пластины; 6 – теплоизолированный подвижный держатель образца

Рисунок 19– Схема определения параметров высокотемпературного газового потока

При настройке экспериментальной установки с кислородно-ацетиленовой горелкой определяют начальные параметры газового потока (температура и скорость) затем устанавливают распределение этих параметров вдоль оси газового потока. Температура и скорость газового потока уменьшаются с увеличением расстояния от газовой горелки $l_{гп}$ (рисунок 20, 21). Для описания зависимости температуры и скорости от расстояния между газовой горелкой и рассматриваемым сечением газового потока удобны степенные и экспоненциальные уравнения регрессии (9), (10)

$$t_{гп} = a_{рег} \cdot t_{0гп} \cdot e^{b_{рег} \cdot \left(\frac{l_{гп}}{d}\right)}, \quad (9)$$

где $t_{гп}$ – температура газового потока, °C;

$l_{гп}$ – расстояние от газовой горелки до огнезащитного покрытия, м;

d – диаметр отверстия истечения в газовой горелке, м;

$t_{0гп}$ – температура пламени газовой горелки, °C;

$a_{рег}$, $b_{рег}$ – коэффициенты уравнения регрессии.

$$v_{\text{гп}} = a_{\text{рег}} \cdot v_{0\text{гп}} \cdot \left(\frac{l_{\text{гп}}}{d}\right)^{b_{\text{рег}}}, \quad (10)$$

где $v_{\text{гп}}$ – температура газового потока, м/с;

$v_{0\text{гп}}$ – скорость истечения газов из сопла газовой горелки, м/с.

В эксперименте с кислородно-ацетиленовой горелкой были зафиксированы следующие начальные параметры при определении характеристик газового потока:

- диаметр отверстия истечения в газовой горелке $d=3$ мм;
- температура пламени газовой горелки $t_{0\text{гп}}=2900$ °С;
- скорость истечения газов из сопла газовой горелки $v_{0\text{гп}}=170$ м/с.

Получены следующие значения температуры и скорости газового потока на различных расстояниях от сопла горелки (таблица 5):

Таблица 5 – Средние значения температуры и скорости газового потока на различных расстояниях от сопла горелки

Расстояние	0,14 м	0,18 м	0,20 м	0,25 м
Температура, °С	1102	946	851	745
Скорость, м/с	78	62	55	40

Экспериментальные данные зависимости температуры газового потока $t_{\text{гп}}$ от расстояния между газовой горелкой и огнезащитным покрытием $l_{\text{гп}}$ хорошо описываются уравнением регрессии (11):

$$t_{\text{гп}} = 1,055 \cdot t_{0\text{гп}} \cdot e^{-0,020 \cdot \left(\frac{l_{\text{гп}}}{d}\right)}, \quad (11)$$

где $t_{\text{гп}}$ – температура газового потока, °С;

$l_{\text{гп}}$ – расстояние от газовой горелки до огнезащитного покрытия, м;

d – диаметр отверстия истечения в газовой горелке, м.

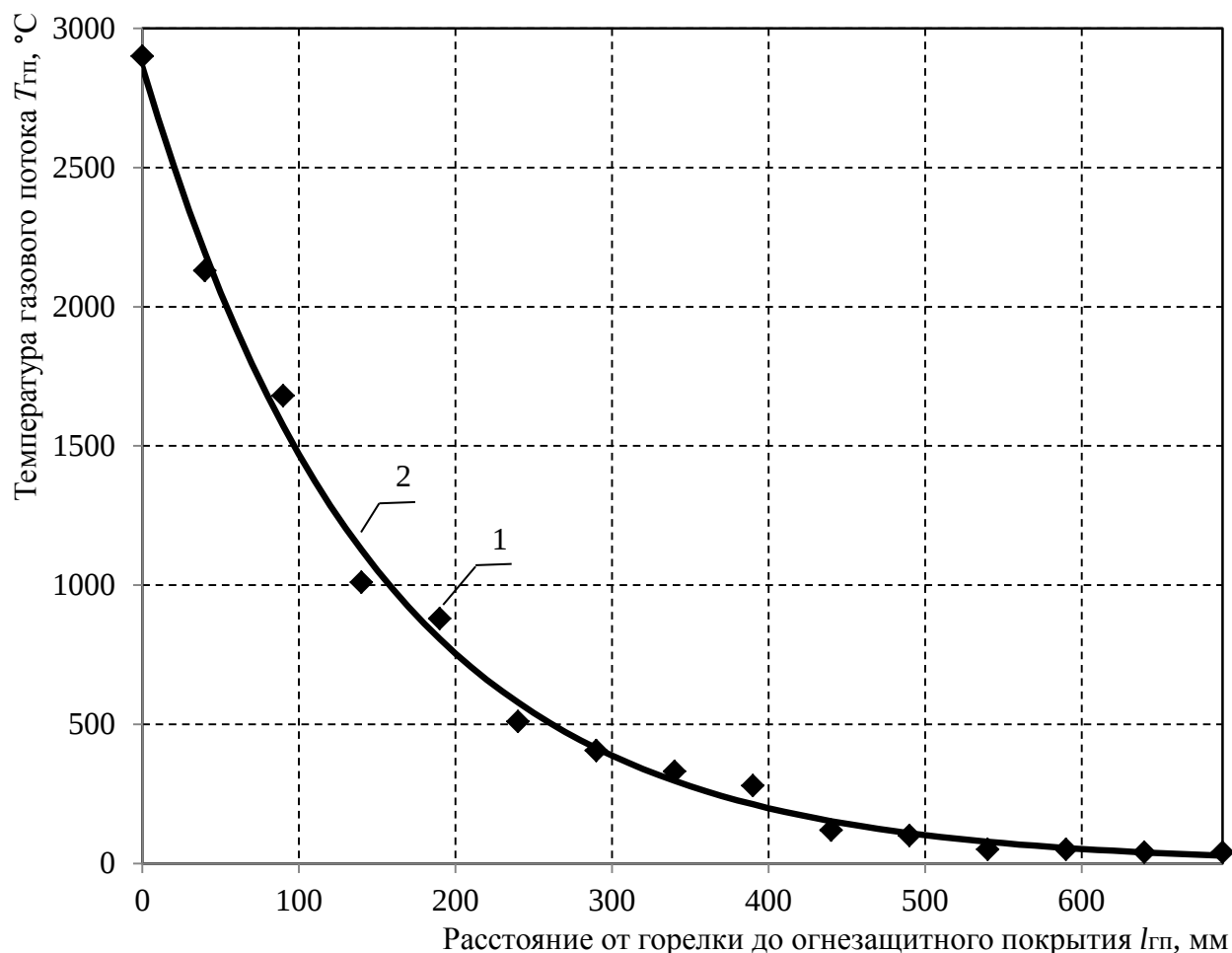


Рисунок 20 – Зависимость температуры газового потока $T_{гп}$ от расстояния между горелкой и огнезащитным покрытием $l_{гп}$

1 – экспериментальные данные; 2 – расчет по выражению (11)

Экспериментальные данные зависимости скорости газового потока $v_{гп}$ от расстояния между газовой горелкой и огнезащитным покрытием $l_{гп}$ хорошо описываются уравнением регрессии (12):

$$v_{гп} = 2,618 \cdot v_{0гп} \cdot \left(\frac{l_{гп}}{d}\right)^{-0,760} , \quad (12)$$

где $v_{гп}$ – скорость газового потока, м/с.

Также близкие результаты при определении скорости газового потока дает эмпирическое выражение [13]:

$$v_{гп} = \frac{6,95 \cdot v_{0гп}}{\left(\frac{l_{гп}}{d}\right)} , \quad (13)$$

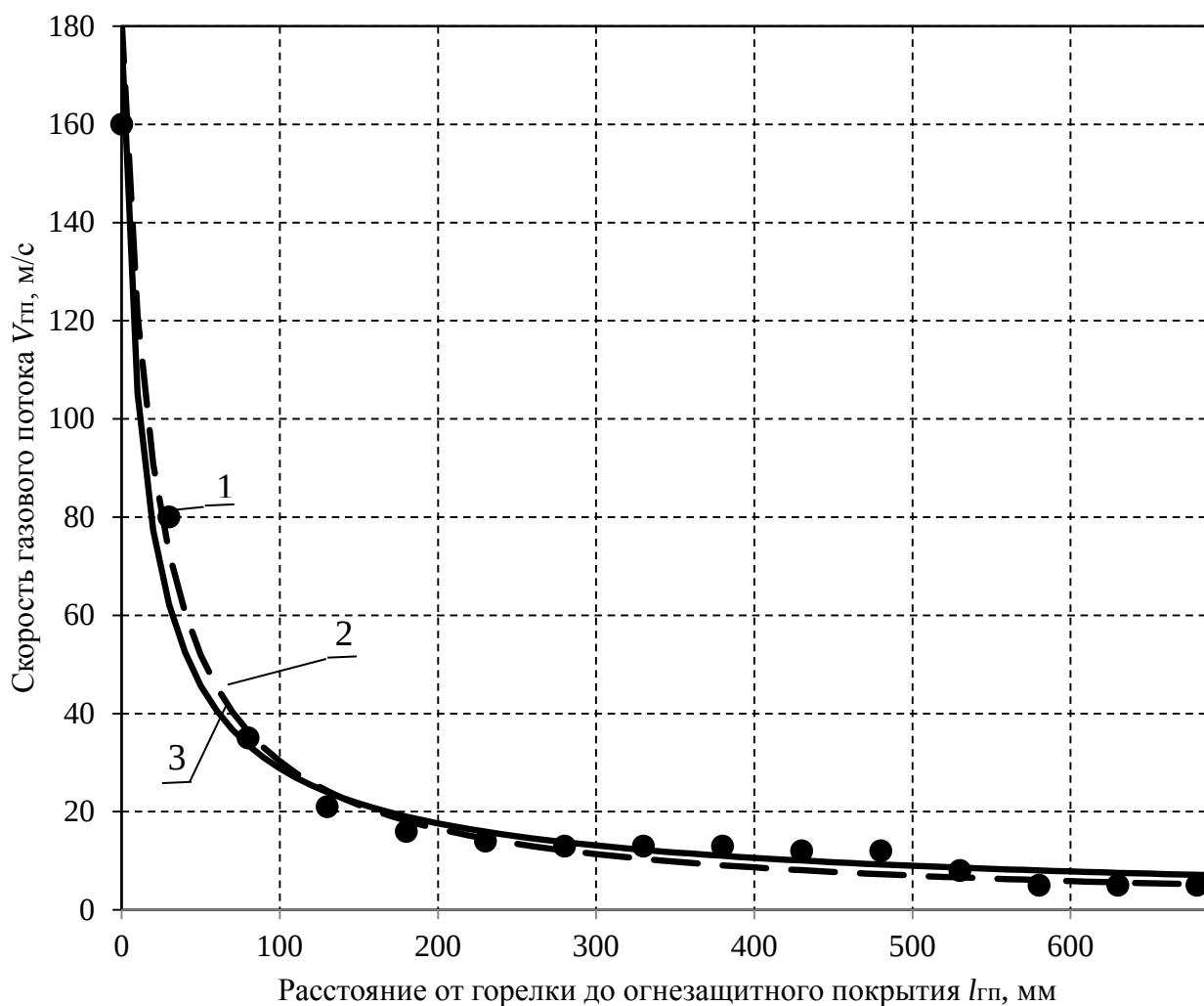


Рисунок 21 – Зависимость скорости газового потока $v_{гп}$ от расстояния между горелкой и огнезащитным покрытием $l_{гп}$

1 – экспериментальные данные; 2 – расчет по выражению (12);
3 – расчет по выражению (13)

Анализ выражений (11)-(13) и графиков зависимости температуры и скорости газового потока от расстояния между газовой горелкой и огнезащитным покрытием (рисунок 20, рисунок 21) показывает, что типовые температурные режимы – стандартный, углеводородный; наружный; медленно развивающийся (тлеющий) – реализуются на расстоянии от газовой горелки $l_{гп}=120...500$ мм. При этом температура и скорость газового потока убывают $t_{гп}\approx 1100...20$ °С, $v_{гп}\approx 100...10$ м/с. Соответственно можно выделить основной фактор – температуру и вспомогательный – скорость, который снижает огнезащитную эффективность покрытия.

Проведена оценка плотности теплового потока ацетилен-кислородной горелки.

В соответствии с [40] плотность теплового потока, Вт/м², падающего на обогреваемую поверхность при пожаре, складывается из теплопередачи конвекцией и лучистого излучения, определяемых на основании закона Стефана-Больцмана

$$q = q_c + q_r, \quad (14)$$

где q_c – конвективный тепловой поток, Вт/м²;

q_r – лучистый тепловой поток, Вт/м².

Конвективный тепловой поток определяется по формуле

$$q_c = \alpha_c (T_g - T_m), \quad (15)$$

где α_c – коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/(м²·К);

T_g – температура вблизи конструкции, °К;

T_m – температура поверхности конструкции, °К.

Значения коэффициента теплопередачи конвекцией, соответствующие номинальным температурным режимам, приведены в п.3.2 [40] и принимает значение $\alpha_c = 50$ Вт/(м²·К).

Температура газового потока в точке истечения составляет 2900 °С.

Температура в сечении газового потока соответствующего средней температуре при углеводородном пожаре составляет 1100 °С.

Лучистый тепловой поток определяется по формуле

$$q_r = \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma (T_r^4 - T_m^4), \quad (16)$$

где Φ — угловой коэффициент облученности;

ε_m — степень черноты поверхности конструкции;

ε_f — степень черноты пламени (пожара);

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана;

T_r – эффективная температура излучения пожара, °К;

T_m – температура поверхности конструкции, °К.

Угловой коэффициент облученности принимается $\Phi = 1$ [40]. Степень черноты поверхности конструкции принимается $\varepsilon_m = 0,8$; степень черноты пламени

принимается $\varepsilon_f = 1$ [40]. Для полностью охваченных пламенем элементов конструкции эффективная температура излучения пожара T_r может быть принята равной температуре среды вблизи нее T_g [40], и в нашем случае составит составляет 2900 °C.

Таким образом, плотность теплового потока ацетилен-кислородной горелки в сечении с температурой 1100 °C составляет ≈ 289 кВт/м², чем подтверждается гипотеза о том, что величина теплового потока ацетилен-кислородной горелки сопоставима с данными испытаний, проведенных голландской противопожарной инженерной компанией «Beele Ingeneering», в соответствии с методикой по международному стандарту ISO 22899-1:2007 и ISO/CD 22899-2, п.5 «Определение стойкости пассивной противопожарной защиты к факельному горению. Часть 2. Руководство по классификации и методам реализации» – средняя величина теплового потока 240 кВт/м², максимальная величина теплового потока 320 кВт/м².

Устанавливая испытуемый образец на необходимом расстоянии от газовой горелки, в определенные моменты времени можно реализовать любой режим аэродинамического и теплового воздействия на него, включая типовые температурные режимы.

Предложенный способ проведения испытаний обеспечивает комплексное воздействие температуры и скорости газового потока, при разном сочетании этих двух параметров. Отметим, что сохраняется возможность сравнивать результаты испытаний огнезащитных покрытий по стандартной методике [24] и по предлагаемой методике испытаний в высокотемпературном газовом потоке.

2.4. Подготовка экспериментальных образцов

Опытные образцы для экспериментов по определению эффективности огнезащитных покрытий представляли собой квадратные пластины из стали

марки Ст3 с размерами $(150\pm 1)\times(150\pm 1)$ мм и толщиной 0,5 мм, что обусловлено имеющимися технологическими возможностями.

В качестве объектов исследований были выбраны пять марок тонкослойных вспучивающихся огнезащитных покрытий (таблица 6).

Таблица 6 – Характеристика основных средств огнезащиты, нанесенных на образцы

№ п/п	Наименование покрытия	Механизм действия покрытия	Основные компоненты	Группа огнезащитной эффективности
1.	Стабитерм-217	вспучивание огнезащитной поверхности, образование пористого теплоизолирующего слоя	Акриловые сополимеры, эпоксидная смола	2-6
2.	Fire Protect	вспучивание огнезащитной поверхности, образование теплоизолирующего слоя	Акриловые сополимеры, углеродистые соединения: Растворитель Р-4, пропилен-гликоль, и др.	2-5
3.	Фризол-ЭП	вспучивание огнезащитной поверхности, образование теплоизолирующего слоя	Эпоксидная смола	2-5
4.	Chartek 1709	вспучивание огнезащитной поверхности, образование теплоизолирующего слоя	Эпоксидная смола	1-6
5.	Экспериментальный состав ЗАО «ПЗСМ»	вспучивание огнезащитной поверхности, образование теплоизолирующего слоя	Эпоксидная смола	2-6

Характеристика составов

Стабитерм-217 – это огнезащитная краска по металлу, применяемая для огнезащиты металлоконструкций как внутри помещений, так и эксплуатирующихся в открытой атмосфере, но под навесом. При эксплуатации в открытой атмосфере без навеса необходимо перекрывать слой покрытия из краски Стабитерм-217 лаком Стабитерм-007. Принцип огнезащитного действия заключается во вспучивании высохшего слоя краски и образовании

теплоизолирующего слоя при воздействии пламени. Данный состав обеспечивает 2-6 группы огнезащитной эффективности.

FIRE PROTECT – однокомпонентный огнезащитный состав, предназначенный для нанесения на стальные и железобетонные конструкции, в том числе при эксплуатации в неблагоприятных климатических условиях, с целью повышения фактического предела огнестойкости конструкций до требуемых значений. Данный состав включает в себя дисперсию антипиреновых и терморасширяющихся наполнителей в органическом растворе акриловых сополимеров, модифицированных углеродистыми соединениями. Состав «FP» применяется в качестве самостоятельного средства огнезащиты и обеспечивает 2-5 группы огнезащитной эффективности.

ФРИЗОЛ-ЭП – двух компонентный огнезащитный атмосферостойкий состав по металлу. При высоких температурах покрытие вспучивается, образуя при этом теплоизолирующий слой. Обладает сильной адгезионной способностью, не требует тщательной обработки защищаемой поверхности. Состоит из двух компонентов, требующих тщательного смешения при приготовлении состава. Данный состав обеспечивает 2-5 группы огнезащитной эффективности.

Chartek 1709 – двухкомпонентное эпоксидное покрытие с аминным механизмом отверждения, не содержащее растворитель. Обеспечивает пассивную противопожарную защиту различных конструкций и оборудования при углеводородном и факельном горении. Применяется для поверхностей из углеродистой стали, алюминия и нержавеющей стали. Не требует установки арматурной сетки. Одобрено для использования на различных стальных конструкциях, огнестойких перегородках и сосудах, требующих защиты от углеводородного и факельного горения. Обычно применяется в нефтегазовой и энергетической отраслях. Может использоваться в морской и континентальной среде. Обеспечивает 1-6 группы огнезащитной эффективности.

Огнезащитный состав ЗАО «ПЗСМ» (далее ПЗСМ) – экспериментальный разрабатываемый огнезащитный состав Подольского завода строительных

материалов, представляет собой двухкомпонентное огнестойкое эпоксидное покрытие.

Подготовка поверхностей стальных пластин и нанесение средств огнезащиты (рисунок 22-рисунок 24) выполнены в соответствии с правилами приготовления и нанесения состава, указанными в технической документации на средства огнезащиты. Толщина нанесения огнезащитных составов на пластины соответствует 6 группе огнезащитной эффективности (не менее 30 мин) (таблица 7) для каждого состава, и составляет менее 3 мм.

Качество нанесения покрытия контролировали визуально. Контроль толщины нанесенного средства огнезащиты производился измерительным прибором: толщиномер покрытий МТ-2007 (МТ20-01) и гребенка для измерения толщины мокрого слоя Elcometer 112, внесенные в государственный реестр средств измерений. Диапазон измерения толщиномером: 50-20000 мкм, погрешность: $\pm 3\% + 10$ мкм.

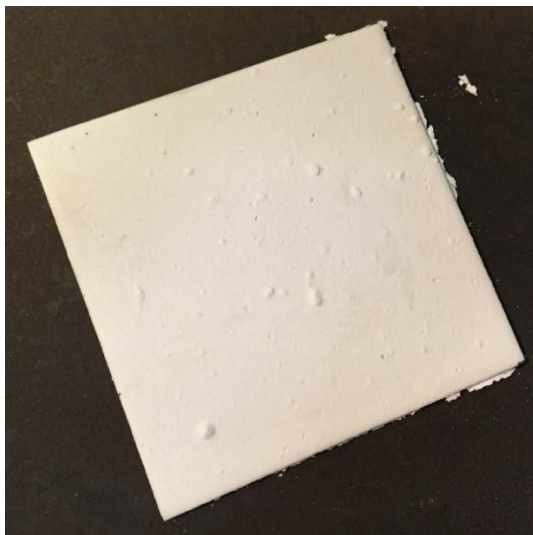


Рисунок 22– Огнезащитный состав Стабирем-217, нанесенный на металлическую пластину



Рисунок 23 – Огнезащитный состав Chartek-1709, нанесенный на металлическую пластину



Рисунок 24 – Огнезащитный состав ПЗСМ, нанесенный на металлическую пластину

Измерение толщины покрытия проводили в пяти точках по периметру обогреваемых поверхностей образцов и в центре, на одинаковом расстоянии друг от друга. За результат было принято среднее арифметическое значение всех измерений по каждому образцу.

Таблица 7 – Значения толщины огнезащитного покрытия, нанесенного на поверхность пластины

№ п.п.	Наименование состава	Рекомендуемая толщина сухого слоя, мкм	Количество нанесенных слоев	Средняя толщина огнезащитного покрытия, нанесенного на пластину, мкм
1.	Стабитерм-217	850	2	856
2.	Fire Protect	1210	2	1310
3.	Фризол-ЭП	1210	2	1380
4.	Chartek 1709	2000	2	2120
5.	ПЗСМ	2000	2	2180

2.5. Исследование эффективности огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения

Определение эффективности огнезащитных покрытий проводили на разработанной экспериментальной установке.

Теплоизолированный подвижный держатель образца (поз. 9, рисунок 17) установили на расстоянии 140 мм от газовой горелки (поз. 1, рисунок 17) и закрепили пластину (поз. 7, рисунок 17) с нанесенным огнезащитным средством (поз. 6, рисунок 17). Подключили приборы регистрации температуры и скорости. Температура начальная по показаниям всех термопар составила 18 °С (одинаковая температура по всем каналам термопар). Включили газовую горелку. Для этого открыли вентили на баллоне: главную трубу с ацетиленом открыли наполовину, а регулятор редуктора установили на 0,041 МПа, кислород установили на 0,051 МПа. Затем на рукоятке горелки открыли вентиль ацетилена, пока не услышали легкое шипение газа из наконечника, после этого зажгли горелку с помощью зажигалки и медленно открыли вентиль, контролирующий подачу кислорода. В итоге получили пламя голубого цвета с белым язычком внутри. Длина пламени составляет около 20 см.

Стальную пластину (образец) с нанесенным огнезащитным покрытием предварительно установили в поперечном сечении газового потока на расстоянии,

соответствующем приблизительно 1100 °С – по показаниям термопар (поз. 4, рисунок 17).

Наблюдали за изменением температуры термопар на экране регистратора и за поведением огнезащитных составов под воздействием пламени ацетилен-кислородной горелки. После достижения стальной пластиной «предельного состояния» (500 °С), по показаниям термопары (поз.8, рисунок 17), испытания прекращали, отключали горелку и меняли пластину в теплоизолированном подвижном держателе на другой образец. После чего вновь приступали к испытаниям. Для получения достоверных результатов каждое огнезащитное покрытие испытывали не менее пяти раз.

Условия окружающей среды при проведении испытаний: испытания проводили в помещении, температура окружающей среды составила 18 °С, относительная влажность воздуха 55 %.

В процессе проведения испытаний регистрировались следующие показатели:

- время наступления условно принятого «предельного состояния» стального образца (достижение температуры пластины на необогреваемой стороне 500 °С);
- изменение температуры на необогреваемой поверхности пластины (изменения температуры фиксировались каждую секунду);
- поведение средства огнезащиты (вспучивание, обугливание, отслоение, выделение продуктов горения и т. д.).

Изменение температуры пластины в процессе испытаний огнезащитных составов при температуре газового потока около 1100 °С представлены ниже (таблица 8-таблица 12).

Аналогичным образом были проведены испытания огнезащитных составов при температуре газового потока 930, 830, 730 °С.

Таблица 8 – Изменение температуры пластины с огнезащитным покрытием Стабитерм-217 в процессе испытаний

Опыт №1			Опыт №2			Опыт №3			Опыт №4			Опыт №5		
Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С
0	1093	18	0	1143	18	0	1059	18	0	1103	18	0	1076	18
1	1060	53	1	1070	69	1	1130	48	1	1180	61	1	1081	71
2	1077	77	2	1095	89	2	1135	64	2	1145	84	2	1097	85
3	1054	97	3	1052	109	3	1157	83	3	1130	104	3	1138	132
4	1140	120	4	1138	134	4	1159	100	4	1187	141	4	1179	174
5	1065	145	5	1077	165	5	1123	118	5	1056	165	5	1091	199
6	1062	211	6	1091	208	6	1148	152	6	1060	227	6	1134	231
7	1090	278	7	1078	269	7	1053	219	7	1124	295	7	1064	254
8	1090	341	8	1093	344	8	1190	289	8	1148	369	8	1054	289
9	1089	398	9	1145	401	9	1155	362	9	1112	412	9	1168	325
10	1135	449	10	1125	452	10	1193	401	10	1099	481	10	1189	386
11	1118	498	11	1085	501	11	1196	423	11	1124	542	11	1150	422
12	1104	560				12	1083	487				12	1098	489
						13	1165	549				13	1109	524

Таблица 9 – Изменение температуры пластины с огнезащитным покрытием Fire Protect в процессе испытаний

Опыт №1			Опыт №2			Опыт №3			Опыт №4			Опыт №5		
Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °C	Темпера тура пластин ы, °C	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °C	Темпера тура пластин ы, °C	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °C	Темпера тура пластин ы, °C	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °C	Темпера тура пластин ы, °C	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °C	Темпера тура пластин ы, °C
0	1123	18	0	1061	18	0	1061	18	0	1096	18	0	1050	18
1	1112	64	1	1128	75	1	1196	68	1	1172	89	1	1104	79
2	1150	125	2	1125	138	2	1079	131	2	1151	159	2	1180	161
3	1084	135	3	1074	140	3	1153	139	3	1181	202	3	1092	211
4	1148	145	4	1137	152	4	1165	154	4	1148	278	4	1174	301
5	1076	220	5	1096	243	5	1190	240	5	1078	361	5	1077	412
6	1118	308	6	1052	321	6	1149	315	6	1085	420	6	1127	523
7	1104	412	7	1135	436	7	1043	420	7	1116	510			
8	1144	520	8	1136	556	8	1062	532						

Таблица 10 – Изменение температуры пластины с огнезащитным покрытием Фризол-ЭП в процессе испытаний

Опыт №1			Опыт №2			Опыт №3			Опыт №4			Опыт №5		
Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С
0	1097	18	0	1102	18	0	1105	18	0	1113	18	0	1097	18
1	1096	49	1	1098	52	1	1107	55	1	1146	80	1	1096	49
2	1100	86	2	1097	90	2	1139	101	2	1168	156	2	1100	86
3	1095	165	3	1096	176	3	1126	186	3	1174	299	3	1095	165
4	1096	256	4	1097	274	4	1043	302	4	1126	436	4	1096	256
5	1100	365	5	1098	389	5	1120	445	5	1125	521	5	1100	365
6	1098	478	6	1097	485	6	1056	536				6	1098	478
7	1101	581	7	1101	576							7	1101	581

Таблица 11 – Изменение температуры пластины с огнезащитным покрытием Chartek-1709 в процессе испытаний

Опыт №1			Опыт №2			Опыт №3			Опыт №4			Опыт №5		
Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки	Темпера тура пластин ы	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °С	Темпера тура пластин ы, °С
0	1131	18	0	1140	18	0	1067	18	0	1058	18	0	1052	18
1	1103	20	1	1075	21	1	1075	20	1	1126	21	1	1124	21
2	1112	21	2	1128	23	2	1099	21	2	1144	25	2	1128	25
3	1135	24	3	1050	25	3	1130	24	3	1128	26	3	1110	29
4	1143	24	4	1076	28	4	1119	25	4	1124	29	4	1124	30
5	1081	28	5	1094	31	5	1108	26	5	1070	32	5	1060	36
6	1150	31	6	1128	36	6	1146	29	6	1141	34	6	1147	45
7	1104	33	7	1103	42	7	1051	31	7	1142	42	7	1068	52
8	1134	39	8	1114	45	8	1150	33	8	1143	53	8	1090	57
9	1087	45	9	1131	52	9	1094	37	9	1076	57	9	1066	65
10	1101	51	10	1138	57	10	1061	43	10	1147	65	10	1090	73
11	1057	55	11	1124	65	11	1124	49	11	1147	73	11	1148	81
12	1110	59	12	1061	73	12	1125	54	12	1131	90	12	1142	90
13	1052	62	13	1106	90	13	1134	60	13	1124	108	13	1105	104
14	1081	71	14	1136	104	14	1121	68	14	1101	118	14	1106	119
15	1096	79	15	1089	119	15	1097	74	15	1116	136	15	1078	137
16	1116	85	16	1110	137	16	1150	80	16	1066	145	16	1108	144
17	1128	97	17	1057	144	17	1142	92	17	1131	163	17	1133	163
18	1112	109	18	1068	163	18	1091	108	18	1052	185	18	1097	182

19	1138	130	19	1119	182	19	1088	118	19	1066	218	19	1074	218
20	1143	145	20	1109	218	20	1077	136	20	1136	257	20	1090	257
21	1094	156	21	1052	257	21	1099	145	21	1129	285	21	1083	281
22	1066	182	22	1146	281	22	1073	163	22	1085	324	22	1051	326
23	1080	222	23	1135	326	23	1149	185	23	1143	343	23	1074	341
24	1148	254	24	1113	341	24	1076	218	24	1097	385	24	1143	385
25	1075	289	25	1133	385	25	1100	257	25	1063	414	25	1086	415
26	1084	318	26	1143	415	26	1092	285	26	1051	440	26	1086	442
27	1150	350	27	1089	442	27	1141	324	27	1116	459	27	1089	475
28	1096	376	28	1114	459	28	1126	343	28	1056	489	28	1080	504
29	1138	408	29	1068	490	29	1054	385	29	1109	531			
30	1081	430	30	1124	531	30	1063	414						
31	1150	458				31	1122	440						
32	1103	479				32	1141	474						
33	1083	512				33	1073	507						

Таблица 12 – Изменение температуры пластины с огнезащитным покрытием ПЗСМ в процессе испытаний

Опыт №1			Опыт №2			Опыт №3			Опыт №4			Опыт №5		
Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки	Темпера тура пластин ы	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °C	Темпера тура пластин ы, °C	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °C	Темпера тура пластин ы, °C	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °C	Темпера тура пластин ы, °C	Вре мя, мин	Темпера тура пламени горелки, °C	Темпера тура пластин ы, °C
0	1087	18	0	1121	18	0	1054	18	0	1135	18	0	1119	18
1	1133	56	1	1078	65	1	1102	51	1	1159	57	1	1083	65
2	1077	85	2	1052	96	2	1201	76	2	1085	86	2	1185	71
3	1080	109	3	1119	120	3	1140	101	3	1179	110	3	1061	124
4	1142	130	4	1057	155	4	1152	124	4	1111	157	4	1153	164
5	1138	151	5	1087	176	5	1104	145	5	1149	184	5	1098	192
6	1069	184	6	1129	201	6	1122	168	6	1113	222	6	1110	214
7	1061	234	7	1106	220	7	1090	212	7	1167	285	7	1090	296
8	1133	289	8	1131	296	8	1067	270	8	1161	329	8	1097	329
9	1136	317	9	1142	334	9	1129	309	9	1105	356	9	1058	341
10	1065	316	10	1057	345	10	1122	326	10	1064	389	10	1089	360
11	1080	351	11	1134	368	11	1160	348	11	1144	428	11	1140	372
12	1080	381	12	1058	396	12	1159	391	12	1104	464	12	1078	383
13	1110	410	13	1082	441	13	1129	432	13	1143	496	13	1046	424
14	1067	444	14	1090	489	14	1180	459	14	1138	520	14	1076	465
15	1109	475	15	1081	523	15	1048	489				15	1159	507
16	1146	509				16	1095	530						

В процессе проведения испытаний регистрировали характерные особенности поведения образцов (таблица 13-таблица 17, рисунок 25-рисунок 27).

Таблица 13 – Результаты визуального наблюдения за состоянием образца во время испытаний при температуре 1100 °С, покрытого огнезащитным составом Стабирем-217

Время от начала испытания	Внешний вид обогреваемого покрытия
1 мин	Частичное потемнение и вспучивание покрытия
2 мин	Увеличение толщины слоя вспученного покрытия
3 мин	Появление трещин, толщина вспученного слоя около 2-3 см
5 мин	Частичное разрушение вспученного слоя под действием аэродинамических сил газового потока, появление прогаров
7 мин	Увеличение прогаров и разрушенной площади покрытия
10 мин	Частичное отслоение покрытия от пластины
12 мин	Окончание эксперимента

Таблица 14 – Результаты визуального наблюдения за состоянием образца во время испытаний при температуре 1100 °С, покрытого огнезащитным составом Fire Protect

Время от начала испытания	Внешний вид обогреваемого покрытия
1 мин	Частичное потемнение огнезащитного покрытия
2 мин	Появление вспученных пузырьков, пробежки пламени по покрытию
3 мин	Толщина вспученного слоя менее 1 см, появление прогаров и разрушение покрытия под действием аэродинамических сил газового потока
6 мин	Воспламенение покрытия
7 мин	Частичное осыпание покрытия, с горением и тлением осыпавшихся частиц
8 мин	Окончание эксперимента

Таблица 15 – Результаты визуального наблюдения за состоянием образца во время испытаний при температуре 1100 °С, покрытого огнезащитным составом Фризол-ЭП

Время от начала испытания	Внешний вид обогреваемого покрытия
1 мин	Частичное потемнение огнезащитного покрытия
2 мин	Небольшое вспучивание покрытия (менее 1 см), появление трещин
3 мин	Пробежки пламени в месте образовавшихся трещин, возгорание и разрушение покрытия
5 мин	Практически полное разрушение покрытия
6 мин	Окончание эксперимента

Таблица 16 – Результаты визуального наблюдения за состоянием образца во время испытаний при температуре 1100 °С, покрытого огнезащитным составом Chartek-1709

Время от начала испытания	Внешний вид обогреваемого покрытия
1 мин	Потемнение огнезащитного покрытия
2 мин	Вспучивание верхнего слоя
10 мин	Появление трещин, можно разглядеть послойное вспучивание покрытия, увеличение объемов сажи на поверхности, толщина вспученного слоя 3 см
15 мин	Небольшое воспламенение покрытия, горение в трещинах
20 мин	Частичное разрушение покрытия, появление прогара
25 мин	Частичное осыпание верхнего слоя покрытия, с горением и тлением осыпавшихся частиц
30 мин	Окончание эксперимента

Таблица 17 – Результаты визуального наблюдения за состоянием образца во время испытаний при температуре 1100 °С, покрытого огнезащитным составом ПЗСМ

Время от начала испытания	Внешний вид обогреваемого покрытия
1 мин	Потемнение огнезащитного покрытия, вспучивание верхнего слоя
3 мин	Появление трещин, пробежки пламени в трещинах
5 мин	Появление резкого запаха
8 мин	Частичное разрушение покрытия, появление прогара
10 мин	Увеличение площади прогара, осыпание покрытия
15 мин	Окончание эксперимента



Рисунок 25 – Разрушение огнезащитного покрытия Фризол-ЭП после окончания проведения испытаний при температуре 1100 °С

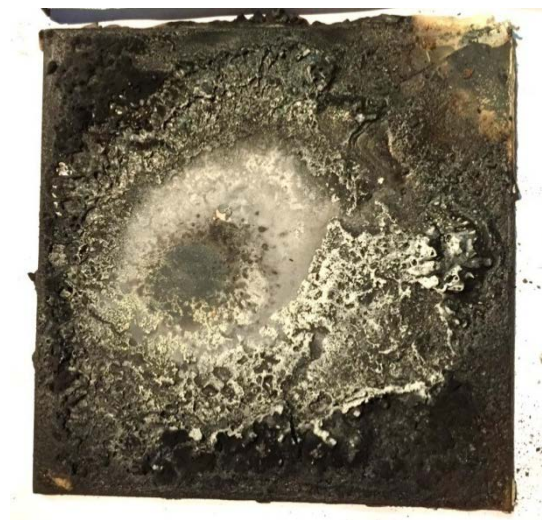


Рисунок 26 – Разрушение огнезащитного покрытия Fire Protect после окончания проведения испытаний при температуре 1100 °С



Рисунок 27 – Вспучивание огнезащитного покрытия Chartek-1709 после 10 мин проведения испытания при температуре 1100 °С

Выводы по Главе 2

1. Одним из основных факторов, влияющих на огнезащитную эффективность тонкослойных вспучивающихся покрытий в условиях факельного углеводородного горения, является воздействие высокотемпературного газового потока, основными параметрами которого является температура и скорость. Приняты следующие средние значения данных параметров: температура газового потока – 1100 °С, скорость газового потока – 80 м/с.

2. Обоснованы конструкция и параметры испытательной установки. Для достижения необходимых значений параметров в лабораторных условиях было предложено использование газовой горелки, например ацетилен-кислородной. Применение газовой горелки при испытаниях огнезащитных составов имитирует условия воздействия факельного углеводородного горения на конструкции при пожарах на объектах нефтегазовой отрасли. Данный способ проведения испытаний позволяет получить высокий технический результат, что связано с возможностью обеспечения постоянства параметров расхода и скорости истечения горючей смеси из горелки, а также возможностью контроля

температуры теплового потока перед огнезащитным покрытием с помощью термопар. Предложенный способ проведения испытаний обеспечивает комплексное воздействие температуры и скорости газового потока, при разном сочетании этих двух параметров.

4. Выведены экспоненциальные уравнения регрессии для описания зависимости и скорости от расстояния между газовой горелкой и рассматриваемым сечением газового потока. Анализ выражений и графиков зависимости температуры и скорости газового потока от расстояния между газовой горелкой и огнезащитным покрытием показывает, что типовые температурные режимы – стандартный, углеводородный; наружный; медленно развивающийся (тлеющий) – реализуются на расстоянии от газовой горелки $l_{гг}=120...500$ мм. При этом температура и скорость газового потока убывают $t_{гг}\approx 1100...20$ °C, $v_{гг}\approx 80...10$ м/с.

5. Проведены испытания огнезащитных составов на разработанной испытательной установке.

6. Основное содержание второй главы и полученные научные результаты отражены в работах автора [6, 70, 71, 72, 73].

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБРАБОТКА

В главе представлены результаты статистической обработки данных экспериментального исследования, предложены зонирование факела пламени и дифференцированный подход к обработке стальных конструкций огнезащитными покрытиями, выведены критерии применимости огнезащитных составов для обработки стальных конструкций.

3.1. Анализ полученных экспериментальных данных

Результаты испытаний исследуемых образцов огнезащитных покрытий представлены в таблицах 18-21.

Таблица 18. Время наступления огнезащитной эффективности по результатам проведения испытаний при температуре пламени газовой горелки 1100 °С ($l_{гп}=140$ мм)

Наименование состава	Время наступления огнезащитной эффективности, мин				
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5
Стабитерм-217	12	11	13	11	13
Fire Protect	8	8	8	7	6
Фризол-ЭП	6	7	7	6	5
Chartek 1709	33	30	33	29	28
ПЗСМ	16	15	16	14	15

Таблица 19. Время наступления огнезащитной эффективности по результатам проведения испытаний при температуре пламени газовой горелки 930 °С ($l_{гп}=180$ мм)

Наименование состава	Время наступления огнезащитной эффективности, мин				
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5
Стабитерм-217	17	18	20	18	19
Fire Protect	13	14	14	13	12
Фризол-ЭП	11	13	13	12	11
Chartek 1709	более 40	более 40	более 40	более 40	более 40
ПЗСМ	22	21	20	20	19

Таблица 20. Время наступления огнезащитной эффективности по результатам проведения испытаний при температуре пламени газовой горелки 830 °С ($l_{гп}=200$ мм)

Наименование состава	Время наступления огнезащитной эффективности, мин				
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5
Стабитерм-217	23	25	27	25	26
Fire Protect	22	18	18	20	18
Фризол-ЭП	20	19	17	20	18
Chartek 1709	более 40	более 40	более 40	более 40	более 40
ПЗСМ	31	29	32	29	30

Таблица 21. Время наступления огнезащитной эффективности по результатам проведения испытаний при температуре пламени газовой горелки 730 °С ($l_{гп}=240$ мм)

Наименование состава	Время наступления огнезащитной эффективности, мин				
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5
Стабитерм-217	32	31	32	31	33
Fire Protect	26	28	26	26	26
Фризол-ЭП	24	25	27	26	25
Chartek 1709	более 40	более 40	более 40	более 40	более 40
ПЗСМ	35	37	37	36	37

По полученным экспериментальным данным были построены графики изменения температуры пластины во время проведения испытаний, а также проведено сравнение результатов испытаний на предлагаемой установке с испытаниями в условиях стандартного температурного режима (рисунок 28-рисунок 31).

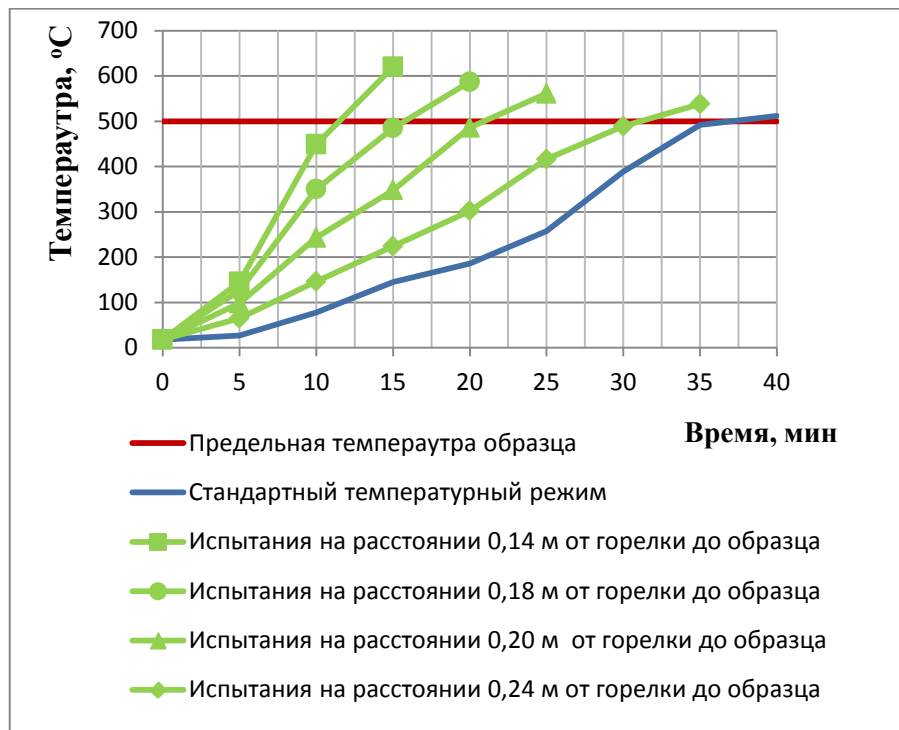


Рисунок 28 – Сравнение результатов испытаний огнезащитного состава Стабистерм-217 на предлагаемой установке и при стандартном температурном режиме

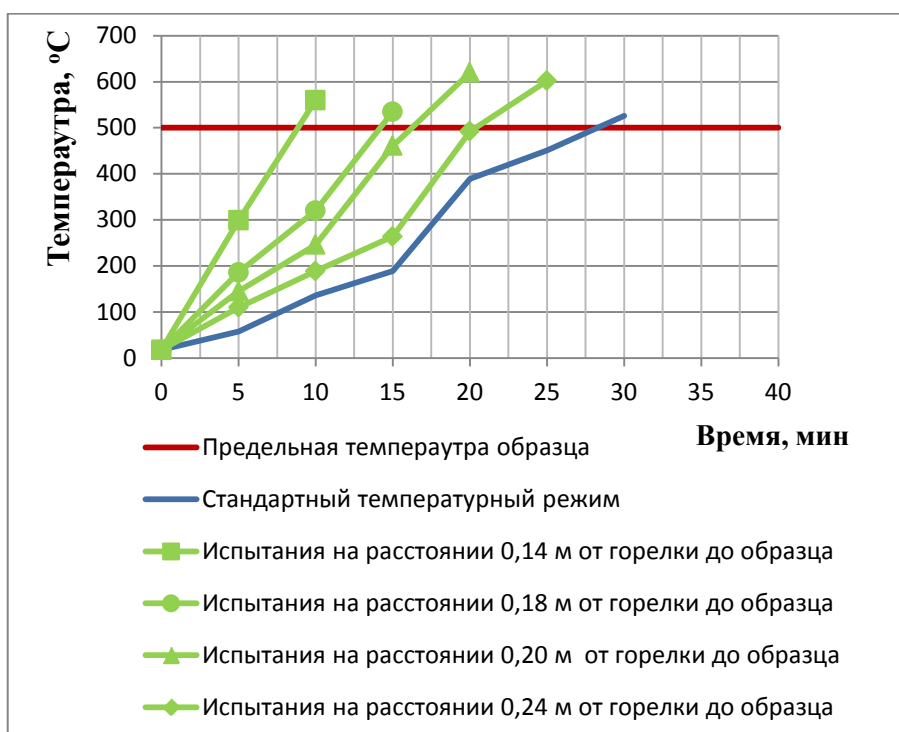


Рисунок 29– Сравнение результатов испытаний огнезащитного состава Fire Protect на предлагаемой установке и при стандартном температурном режиме

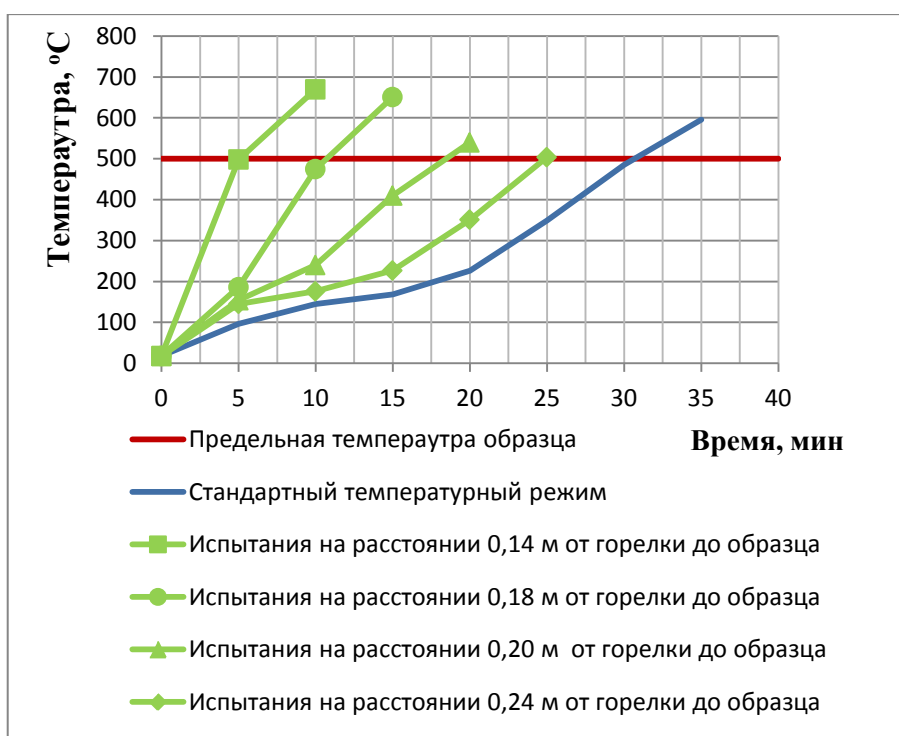


Рисунок 30– Сравнение результатов испытаний огнезащитного состава Фризол-ЭП на предлагаемой установке и при стандартном температурном режиме

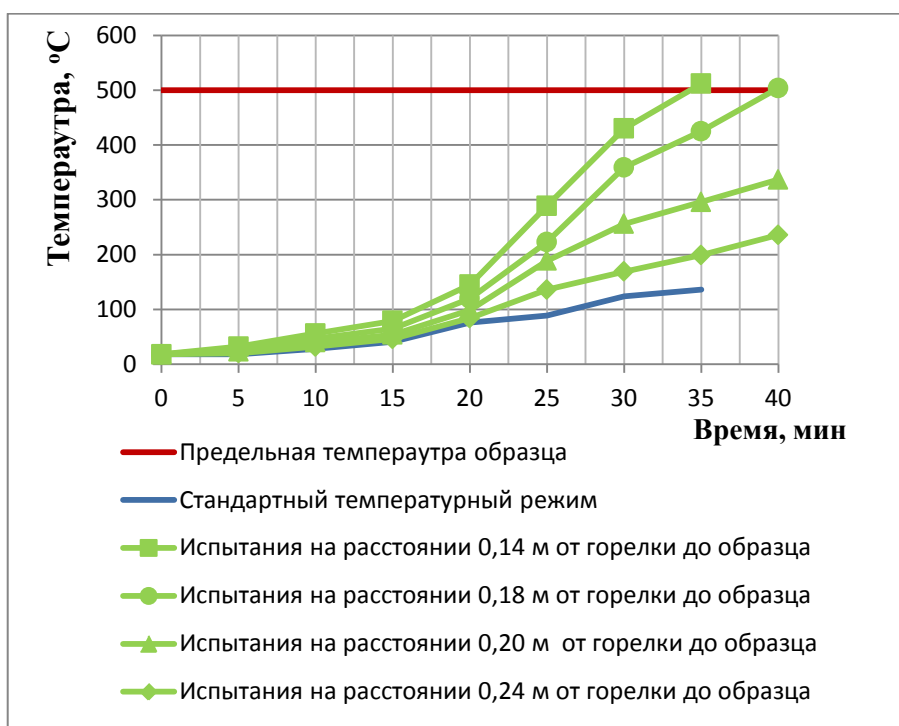


Рисунок 31 – Сравнение результатов испытаний огнезащитного состава Chartek 1709 на предлагаемой установке и при стандартном температурном режиме

Проведенные испытания показали, что основная причина разрушения огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения происходит вследствие абляции – уноса высокотемпературным газовым потоком части материала с поверхности образца. Под действием газового потока на поверхности вспученного покрытия образуется отверстие, которое с течением времени постепенно расширяется в ширину и в глубину по мере прогорания. В результате этого, происходит воздействие факела пламени непосредственно на поверхность пластины, незащищенной огнезащитным покрытием.

Время наступления эффективности огнезащитных составов при проведении испытаний на расстоянии 140 мм (при температуре 1100 °C и скорости газового потока 60 м/с) значительно ниже (в 2-4 раза), чем при стандартном режиме испытаний, что связано с более жесткими температурными и аэродинамическими условиями воздействия газового пламени на образцы. Исключение составил огнезащитный состав Chartek-1709. Он показал схожие результаты испытаний на предлагаемой экспериментальной установке и в испытаниях на углеводородное

горение, проведенные голландской противопожарной инженерной компанией «Beele Ingeneering», в соответствии с методикой по международному стандарту ISO 22899-1:2007 и ISO/CD 22899-2, п.5 «Определение стойкости пассивной противопожарной защиты к факельному горению. Часть 2. Руководство по классификации и методам реализации», что подтверждает достоверность и сходимость результатов лабораторных испытаний с результатами крупномасштабных испытаний.

По мере удаления образцов от сопла горелки происходит уменьшение абляции покрытий, что связано с уменьшением скорости и температуры газового потока. Уже на расстоянии около 200 мм образование отверстия в огнезащитном покрытии не происходит, в связи с чем наблюдается увеличение времени достижения огнезащитной эффективности (τ_{ϕ}) испытываемых составов (рисунок 32).

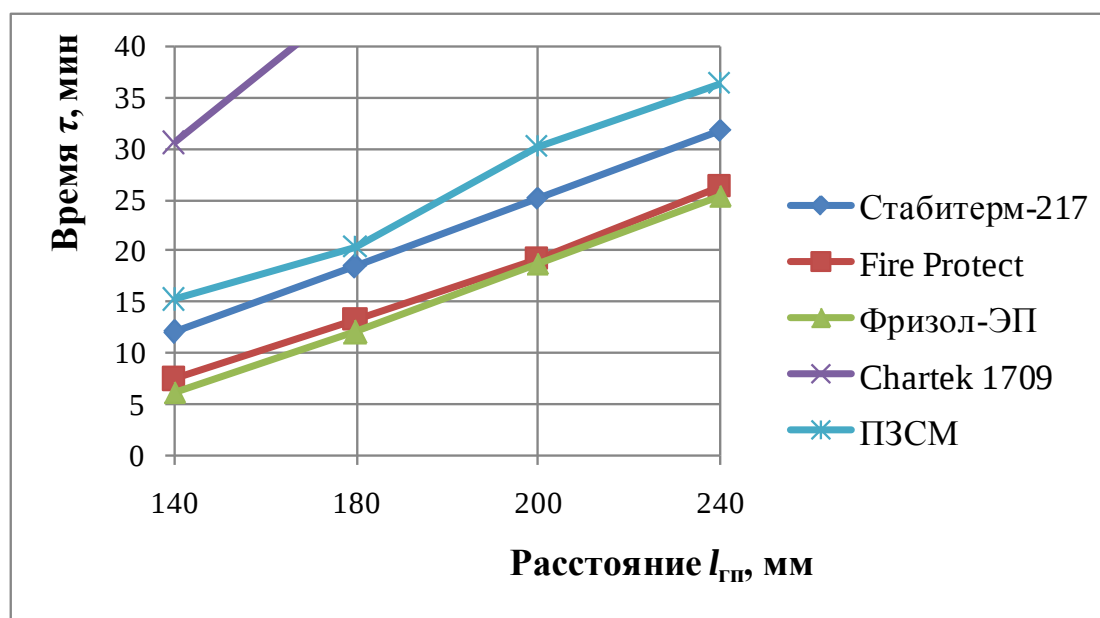


Рисунок 32 – Изменение времени огнезащитной эффективности (τ_{ϕ}) в зависимости от расстояния между горелкой и огнезащитным покрытием $l_{гп}$

Однако делать выводы о том, что данные огнезащитные средства не рекомендуются к применению на объектах нефтегазовой отрасли, оснований недостаточно. Испытуемые огнезащитные составы обладают определенной огнезащитной эффективностью, которой может оказаться достаточной для

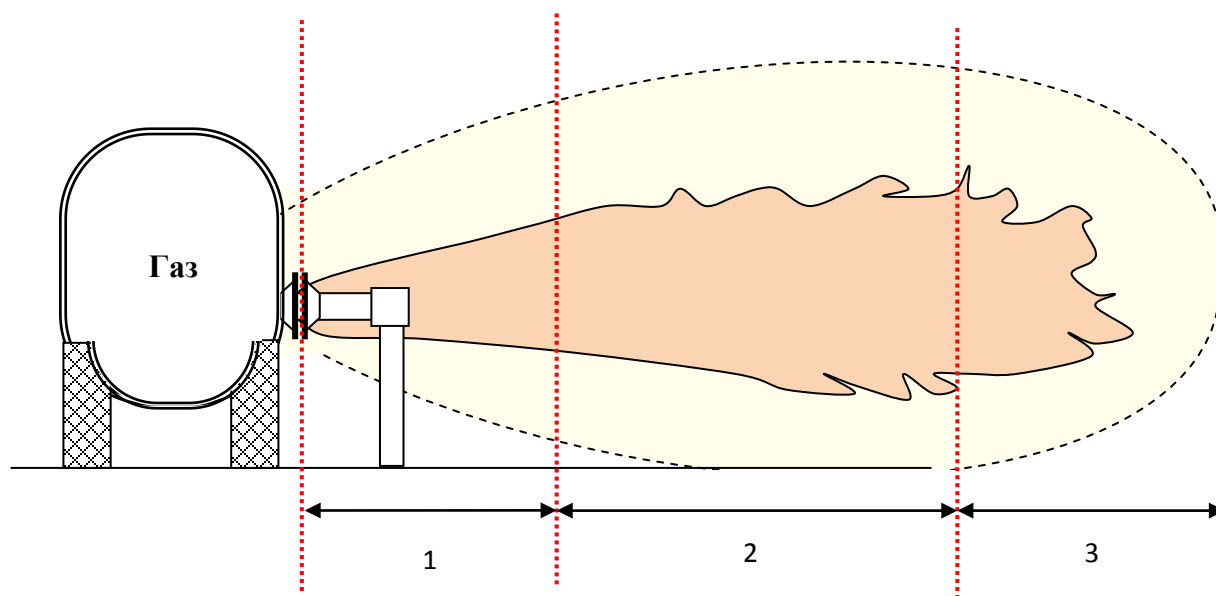
обеспечения интервала времени от начала пожара до срабатывания систем пожаротушения, водяного орошения, защитных водяных завес, а также в отдельных случаях целесообразно их применение для защиты путей эвакуации персонала.

Анализируя экспериментальные данные, предлагается разделить факел пламени, образующийся в случае пожара при разгерметизации технологического оборудования, содержащего газ под давлением, на три зоны (рисунок 33) с различными температурными и скоростными параметрами газового потока – по мере удаления от отверстия температура и скорость газового потока постепенно уменьшаются.

1. Зона реактивного горения – характеризуется высокой температурой (1100-1300 °C) и скоростью газового потока (около 80 м/с). Под действием высокоскоростного газового потока происходит практически мгновенное разрушение огнезащитного покрытия. Огнестойкость строительных конструкций в данной зоне, как правило, не превышает 3 мин.

2. Зона углеводородного горения – характеризуется высокой температурой (до 1100 °C), но более низкой скоростью газового потока (до 50 м/с), по сравнению с зоной реактивного горения. Огнестойкость строительных конструкций в данной зоне не превышает 5-10 мин, разрушение огнезащитных покрытий происходит достаточно быстро, но с сохранением определенного запаса времени для принятия решений по пожаротушению или включению систем автоматического пожаротушения. Данную зону можно характеризовать как зона углеводородного пожара.

3. Зона стандартного горения – средняя температура пламени не превышает 900 °C, скорость газового потока менее 20 м/с. Огнестойкость строительных конструкций в данной зоне может достигать 15-20 мин. Огнезащитная эффективность покрытий соответствует времени испытаний, в условиях стандартного температурного режима.



1 – зона реактивного горения; 2 – зона углеводородного горения; 3 – зона стандартного горения.

Рисунок 33 – Разделение факельного углеводородного горения на зоны

Воздействие факела пламени на какую-либо конструкцию или установку уменьшается в сторону истечения газового потока, вследствие чего уменьшается температурное и аэродинамическое воздействие на огнезащитные покрытия. В связи с чем предлагается разработать дифференцированный подход к огнезащите строительных конструкций. Противопожарная защита технологических установок и строительных конструкций (в том числе огнезащитная обработка) должна осуществляться в зависимости от возможности возникновения факельного горения на той или иной технологической установке и приблизительного определения границ зон горения. Для этого должен проводиться подробный анализ пожарной опасности защищаемого объекта, определяться возможные места и вероятность возникновения факельного горения, а также границы зон в зависимости от длины факела.

Вероятность возникновения факельного горения рассчитывается по формуле [21]:

$$Q_{\phi} = \frac{N_{\phi}}{N_{\text{мг}}} , \quad (17)$$

где N_{ϕ} — число случаев факельного горения истекающего продукта на установках данного типа;

$N_{\text{мг}}$ — число случаев мгновенного воспламенения истекающего продукта при его аварийных выбросах.

Для расчета границ зон воздействия необходимо рассчитать приблизительную длину факела в случае возгорания.

Определению длины факела посвящено много работ [8, 14, 17, 32, 42, 66 и др.], в которых содержатся предложенные разными авторами расчетные закономерности описания процесса или эмпирические формулы, полученные в результате обработки экспериментальных данных. В приказе МЧС РФ от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [42] представлены следующие формулы расчета размеров факела при струйном горении.

Длина факела:

$$L_{\phi} = KG^{0,4} , \quad (18)$$

где G – расход продукта, кг/с;

K – эмпирический коэффициент, который при истечении сжатых газов принимается равным 12,5, при истечении паровой фазы СУГ или СПГ равным 13,5, при истечении жидкой фазы СУГ и СПГ, ЛВЖ и ГЖ под давлением равным 15.

Ширина факела:

$$D_{\phi} = 0,15L_{\phi} , \quad (19)$$

На основании полученной длины факела строятся зоны факельного горения.

3.2. Определение доверительных границ результата измерений показателя эффективности огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения

Для оценки анализа экспериментальных данных, полученных в данной работе, показателей эффективности огнезащитных покрытий исследуемых марок, было необходимо указать границы погрешности результатов измерений. При определении доверительных границ погрешности результата эксперимента учитывались как случайные, так и систематические погрешности.

Оценку экспериментальных данных выполняли в соответствии с действующими государственными стандартами [22, 23, 26].

Число результатов замеров n при определении исследуемых параметров в проводимых экспериментах не превышало 15 ($n=5$). Поэтому для определения доверительных границ погрешности при $n < 15$ принадлежность результатов к нормальному распределению не проверяют [26]. Вместо нормального распределения Гаусса использовали распределение Стьюдента, которое зависит от числа измерений n . Задаваясь доверительной вероятностью $P = 0,95$ [п.4.4, 26], коэффициент Стьюдента $t_{1-\alpha}$ принимает значение 2,132 [23].

В данной работе для оценки точности и надежности полученных значений показателя огнезащитной эффективности определение границ случайной погрешности сводится к построению одностороннего доверительного интервала. Утверждение об одностороннем доверительном интервале сформулировали следующим образом: «с уверенностью 95 % можно утверждать, что среднее полученное значение огнезащитной эффективности не больше, чем $\bar{x} + t_{0.05} S_{\bar{x}}$ ».

Доверительные границы случайной погрешности оценки измеряемой величины вычисляли по формуле [26]

$$\varepsilon = t_{1-\alpha} \cdot S_{\bar{x}}, \quad (20)$$

где $t_{1-\alpha}$ – коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности P , вида доверительного интервала и числа результатов измерений n определяли по таблице 1 [п.7.2, 22];

α – заданный уровень значимости, принимает значения от 10% до 2% (в нашем случае он равняется 0,05 или 5%);

$S_{\bar{x}}$ – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического (оценка измеряемой величины), которое вычисляется по формуле

$$S_{\bar{x}} = \frac{t_{1-\alpha}}{\sqrt{n}} \cdot S, \quad (21)$$

Значение $\frac{t_{1-\alpha}}{\sqrt{n}}$ определяется из таблица 1 [22].

Среднее квадратическое отклонение S результатов измерений определяется по формуле [26]

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (22)$$

где S – среднее квадратическое отклонение результата измерений;

x_i – i -й результат измерений;

$\bar{x}$ – среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений;

n – число исправленных результатов измерения.

Оценку измеряемой величины $\bar{x}$ (оценка математического ожидания), вычисляют по формуле [26]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (23)$$

Для исключения грубых погрешностей используют критерий Граббса [26], который основан на предположении о том, что группа результатов принадлежит

нормальному распределению. Для этого вычисляют критерии Граббса G_1 и G_2 , предполагая, что наибольший x_{max} или наименьший x_{min} результат измерений вызван грубыми погрешностями

$$G_1 = \frac{|x_{max} - \bar{x}|}{S}, \quad G_2 = \frac{|\bar{x} - x_{min}|}{S} \quad (24)$$

Сравнивают G_1 и G_2 с критическим значением G_T критерия Граббса при выбранном уровне значимости [приложение А,22].

Если $G_1 > G_T$, то x_{max} исключают как маловероятное значение. Если $G_2 > G_T$, то x_{min} исключают как маловероятное значение. Далее вновь вычисляют среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонения ряда результатов измерений и процедур проверки наличия грубых погрешностей повторяют.

Если $G_1 \leq G_T$, то x_{max} не считают промахом и его сохраняют в ряду результатов измерений. Если $G_2 \leq G_T$, то x_{min} не считают промахом и его сохраняют в ряду результатов измерений.

При замере температуры пластины имелось несколько составляющих неисключенных систематических погрешностей (НСП) (метод, средства измерений и др.). Сумма таких погрешностей определяет границы НСП Θ результата измерений. При равномерном распределении НСП доверительные границы $\Theta_L(P)$ можно вычислить по формуле [26]

$$\Theta_L(P) = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2}, \quad (25)$$

где Θ_i – граница i -й НСП;

k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью, числом составляющих НСП и их соотношением между собой.

Для доверительной вероятности $P=0,95$ коэффициент k пренебрежимо мало зависит от числа составляющих НСП и их соотношения, поэтому при указанной доверительной вероятности коэффициент k принимают равным 1,1 [26].

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины находят путем построения композиции распределения случайных погрешностей и НСП.

Граница погрешности оценки измеряемой величины Δ (без учета знака) вычисляют по формуле [26]

$$\Delta = K S_{\Sigma}, \quad (26)$$

где K – коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и НСП.

Суммарное среднее квадратическое отклонение S_{Σ} оценки измеряемой величины вычисляют по формуле [26]

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\theta}^2 + S_{\bar{x}}^2}, \quad (27)$$

где S_{θ} – среднее квадратическое отклонение НСП, которое оценивают по формуле [26]

$$S_{\theta} = \frac{\theta_{\Sigma}(P)}{k\sqrt{3}} \quad (28)$$

Коэффициент K определяется по формуле [26]

$$K = \frac{\varepsilon + \theta_{\Sigma}(P)}{S_{\bar{x}} + S_{\theta}} \quad (29)$$

Расчет доверительных границ погрешности при определении показателя эффективности огнезащитных покрытий

При проведении эксперимента по определению эффективности огнезащитных покрытий замеряли время достижения стальной пластиной

«предельного состояния» температуры 500 °С. Перед проведением испытаний проверили настройку средств измерений, исключив тем самым известные систематические погрешности из результатов измерений.

В связи с этим для показателя огнезащитной эффективности погрешность результата измерений вычисляли путем построения композиции распределения случайных погрешностей и неисключенных систематических погрешностей, а также путем проверки наличия грубых погрешностей по критерию Граббса.

Значения промежуточных расчетов при определении доверительных границ случайной погрешности для показателя огнезащитной эффективности испытуемых покрытий приведены в таблица 22.

Таблица 22 – Расчет доверительных границ случайной погрешности

Наименование (марка) испытуемого состава	Σx_i , мин	$\bar{x}$, мин	$(\Sigma x_i^2 - 1/n * (\Sigma x_i)^2) /$ $(n-1)$, мин	S , мин	$S_{\bar{x}}$, мин	$\mathcal{E} = t_{1-\alpha} * S_{\bar{x}}$, мин
Стабигерм-217	60	12	1	1,000	0,953	0,908
Fire Protect	37	7,4	0,8	0,894	0,852	0,812
Фризол-ЭП	31	6,2	0,7	0,837	0,797	0,760
Chartek 1709	153	30,6	5,3	2,302	2,194	2,091
ПЗСМ	76	15,2	0,7	0,837	0,797	0,760

Вычисление критериев Граббса для исключения грубых погрешностей провели по формулам (24) (таблица 23).

Таблица 23 – Вычисление критериев Граббса для исключения грубых погрешностей

Наименование (марка) испытуемого состава	x_{max}	x_{min}	$\bar{x}$	S	G_1	G_2	G_T
Стабигерм-217	13	11	12	1,000	1,000	1,000	1,715
Fire Protect	8	6	7,4	0,894	0,671	1,565	1,715
Фризол-ЭП	7	5	6,2	0,837	0,956	1,434	1,715
Chartek 1709	33	28	30,6	2,302	1,042	1,129	1,715
ПЗСМ	16	14	15,2	0,837	0,956	1,434	1,715

Сравнивая G_1 и G_2 с критическим значением G_T критерия Граббса, пришли к выводу, что во всех случаях $G_1 < G_T$ и $G_2 < G_T$, следовательно наибольшие x_{max} и наименьшие x_{min} результаты измерений не являются промахами и сохраняются в ряду результатов измерений.

Доверительные границы не исключенной систематической погрешности рассчитывали по зависимости (25). Составляющими систематической погрешности при замере температуры являлись:

$\Theta_1 = 4,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ – предел допускаемых отклонений ТЭДС термопар ТХА (К) от НСХ, первого класса точности, при диапазоне измерений при температуре $1100 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$\Theta_2 = 0,014 \text{ } ^\circ\text{C}$ – погрешность градуировки ХА;

$\Theta_3 = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}$ – погрешность регистратора Ф1771-АД.

Границы общей неисклученной систематической погрешности без учета знака вычисляли:

$$\Theta_{\Sigma}(P) = 1,1\sqrt{4,4^2 + 0,014^2 + 0,005^2} = 4,840 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Определение доверительных границ погрешности оценки измеряемой величины проводили в соответствии с формулами (26)-(29) .

Для определения связей между ошибкой по времени и ошибкой по показаниям температуры термопар и регистратора было необходимо также использовать следующий способ перевода получаемых значений. Вычислили соотношение оценки измеряемой величины и температуры достижения этой величины, которая использовалась в эксперименте ($500 \text{ } ^\circ\text{C}$) ($\bar{x}/500$, мин* $^\circ\text{C}^{-1}$). Рассчитали произведение неисклученной систематической погрешности по температуре и соответствующего полученного значения ($\Theta_{\Sigma}(P) * \bar{x}/500$, мин), далее по зависимостям (26)-(29) определяли доверительные границы погрешности полученных показателей эффективности огнезащитных покрытий (таблица 24) и записали результат оценки показателя огнезащитной эффективности (таблица 25).

Таблица 24 – Расчет доверительных границ погрешности оценки измеряемой величины

Наименование испытываемого состава	$\bar{x}/500$, мин*°C ⁻¹	$\Theta_{\Sigma}(P)$, мин	S_{Θ} , мин	K , мин	S_{Σ} , мин	Δ , мин
Стабигерм-217	0,024	0,116	0,061	1,010	0,955	1,0
Fire Protect	0,015	0,072	0,038	0,993	0,853	0,8
Фризол-ЭП	0,012	0,060	0,032	0,989	0,798	0,8
Chartek 1709	0,061	0,296	0,155	1,016	2,199	2,2
ПЗСМ	0,030	0,147	0,077	1,037	0,801	0,8

Таблица 25 – Результат оценки показателя огнезащитной эффективности

Наименование состава	Показатель огнезащитной эффективности
Стабигерм-217	12 + 1,0 мин, 0,95
Fire Protect	7,4 + 0,8 мин, 0,95
Фризол-ЭП	6,2 + 0,8 мин, 0,95
Chartek 1709	30,6 + 2,2 мин, 0,95
ПЗСМ	15,2 + 0,8 мин, 0,95

3.3. Критерии применимости огнезащитных составов на объектах нефтегазовой отрасли

Зонирование факельного углеводородного горения позволяет выделить два критерия применимости огнезащитных покрытий для стальных конструкций технологических установок и сооружений объектов нефтегазовой отрасли:

1. Относительная огнезащитная эффективность ($K_{\text{оз}}$) – безразмерная величина, характеризующая отношение показателей эффективности огнезащитных составов при испытаниях в условиях стандартного температурного режима ($\tau_{\text{ст}}$) и в условиях факельного углеводородного горения ($\tau_{\text{ф}}$). Выражается коэффициентом, который принимает различные значения, в зависимости от марки огнезащитного состава

$$K_{\text{оз}} = \frac{\tau_{\text{ст}}}{\tau_{\text{ф}}} , \quad (30)$$

На примере проведенных испытаний, была рассчитана относительная огнезащитная эффективность испытанных огнезащитных покрытий (таблица 26).

Таблица 26 – Относительная огнезащитная эффективность испытанных огнезащитных составов

Наименование состава	Время испытания, мин	Время достижения «предельного состояния» образца при проведении испытаний, мин	Относительная огнезащитная эффективность $K_{оэ}$
Стабигерм-217	30	12	2,5
FireProtect	30	7,4	4,1
Фризол-ЭП	30	6,2	4,8
Chartek 1709	30	30,6	1
ПЗСМ	30	15,2	2

Сделаны следующие предложения по применению выделенных критериев на практике (дифференцированный подход к обработке стальных конструкций средствами огнезащиты):

Если коэффициент относительной огнезащитной эффективности принимает значение равное или меньше единицы ($K_{оэ} \leq 1$), то применение данного огнезащитного состава на строительных конструкциях зданий и технологических установок нефтеперерабатывающих производств предлагается считать допустимым во всех зонах, включая реактивную зону факельного горения.

Если коэффициент принимает значения от 1 до 2,5 ($1 < K_{оэ} \leq 2,5$), то применение данных составов представляется возможным допустить в зонах углеводородного и стандартного горения. Применение данного огнезащитного состава представляется допустимым в зоне реактивного горения только при увеличении толщины слоя нанесенного покрытия в 2-2,5 раза – от рекомендуемого по технической документации на покрытие – в соответствии с результатами сертификационных испытаний групп его огнезащитной эффективности по ГОСТ Р [24].

При значениях коэффициента более 2,5 ($K_{оэ} > 2,5$) применение данного состава допустимо только в зонах стандартного горения, либо в зонах реактивного и углеводородного горения для обеспечения достаточного интервала времени сохранения огнестойкости конструкций, необходимого для срабатывания систем пожаротушения, водяного орошения, защитных водяных завес, а также в отдельных случаях для защиты путей эвакуации персонала. При увеличении толщины слоя нанесенного покрытия в 2-2,5 раза от рекомендуемого по технической документации на покрытия – в соответствии с результатами сертификационных испытаний групп его огнезащитной эффективности по ГОСТ Р [24], представляется, что данные составы, возможно, применять в зоне углеводородного горения.

2. Критерий факельности (K_f) – коэффициент, характеризующий воздействие высокотемпературного (горящего) газового потока в зависимости от удаленности от отверстия истечения газа.

Расчет длин разнообразных факелов позволил выделить следующие средние расстояния зон воздействия факела пламени от отверстия истечения (таблица 27).

Таблица 27 – Длины зон факельного горения

Длина факела пламени	Зона реактивного воздействия	Зона углеводородного воздействия	Зона стандартного воздействия
от 10 до 15 м	до 5 м	5-12 м	от 12 м
от 15 до 30 м	до 10 м	10-25 м	от 25 м
свыше 30 м	до 15 м	15-35 м	от 35 м

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Проведенные испытания показали, что основная причина разрушения огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения происходит вследствие абляции – уноса высокотемпературным газовым потоком части материала с поверхности образца.

2. Анализируя экспериментальные данные, предлагается разделить образующийся в случае пожара факел пламени на три зоны с различными температурными и скоростными параметрами газового потока: зона реактивного горения, зона углеводородного горения, зона стандартного горения.

3. Дифференцированный подход к обработке стальных конструкций в зависимости от зоны факельного углеводородного горения позволит увеличить эффективность защиты стальных конструкций и снизить материальные затраты на проведение огнезащитных работ.

4. В целях реализации дифференцированного подхода выделены два критерия применимости огнезащитных покрытий для стальных конструкций: критерий относительной огнезащитной эффективности и критерий факельности.

5. Основное содержание третьей главы и полученные научные результаты отражены в работах автора [2, 70, 75].

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ФАКЕЛЬНОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЕНИЯ

4.1. Общие положения

Настоящая методика предназначена для определения огнезащитной эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций зданий и инженерных сооружений объектов нефтегазовой отрасли. Методика может быть использована:

- для сравнительной оценки огнезащитной эффективности средств огнезащиты;
- для определения и контроля огнезащитной эффективности составов при их разработке, производстве и применении;
- для определения изменения огнезащитной эффективности после ускоренного старения.

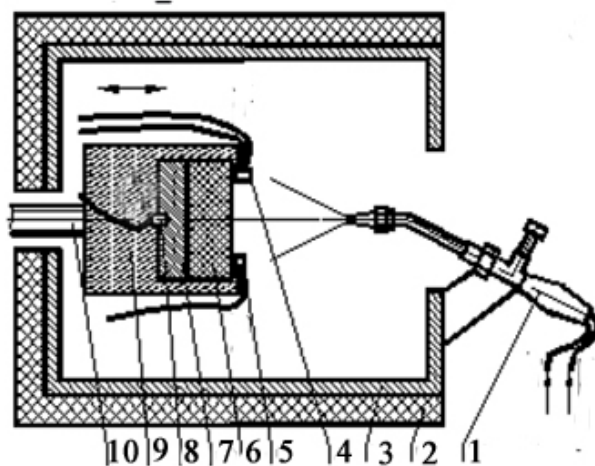
Испытаниям по данной методике подвергают все тонкослойные вспучивающиеся составы, используемые для огнезащитной обработки стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли.

4.2. Сущность метода

Сущность метода заключается в определении времени прогрева необогреваемой стороны образца до усредненной «критической температуры» (500°С для стальных пластин) в процессе испытаний, которые проводятся в условиях факельного углеводородного горения при температуре газового потока 1100 °С и скорости газового потока 80 м/с.

4.3. Оборудование для проведения испытаний

Испытательная установка (рисунок 34), предназначенная для определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения включает в себя: газовую горелку (поз. 1) для подачи пламени на стальную пластину (поз. 7) с огнезащитным покрытием поз. 6), теплоизолированный подвижный держатель образца (поз. 9), шток перемещения держателя с образцом (поз. 10), ограждающий корпус с теплоизоляцией (поз. 2, 3), приемник давления газового потока (трубка Пито) (поз. 4), термопара для измерения температуры газового потока (поз. 5), термопара для измерения температуры стальной пластины (поз. 8).



1 – кислородно-ацетиленовая горелка; 2 – теплоизоляция; 3 – ограждающий корпус; 4 – приемник давления газового потока (трубка Пито); 5 – термопара для измерения температуры газового потока; 6 – огнезащитное покрытие; 7 – стальная пластина; 8 – термопара для измерения температуры стальной пластины; 9 – теплоизолированный подвижный держатель образца; 10 – шток для перемещения держателя с образцом.

Рисунок 34 – Схема экспериментальной установки для испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке

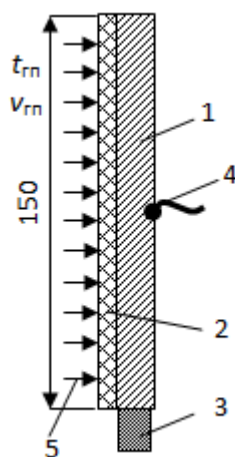
4.4. Условия проведения испытаний

Испытания должны проводиться при температуре окружающей среды 5-35 °С, относительной влажности 30-80 % и атмосферном давлении 84-106 кПа.

4.5. Подготовка оборудования и образцов для проведения испытаний

Подготовка к проведению испытаний включает в себя следующее: подготовка образцов, нанесение огнезащитного состава на образец в соответствии с технической документацией на данное средство огнезащиты, измерение толщины слоя покрытия, сушка нанесенного покрытия, измерение параметров теплового потока, для определения необходимых условий проведения испытаний, расстановку термопар на образце, проверку и отладку систем подачи и сжигания топлива, приборов, установку образца.

4.5.1. Для испытаний необходимо подготовить три одинаковых образца, представляющих собой пластинки квадратной формы из стали марки Ст3 по ГОСТ 380-88 размером $(150 \pm 1) \times (150 \pm 1)$ мм и толщиной $5 (\pm 1)$ мм (рисунок 35).



- 1 – стальная пластина; 2 – огнезащитное покрытие; 3 – теплоизолированный подвижный держатель образца; 4 – термопара для измерения температуры стальной пластины;
5 – высокотемпературный газовый поток

Рисунок 35 – Образец для испытаний

4.5.2. Нанести огнезащитный состав на одну из сторон пластин в соответствии с технической документацией и провести контрольные измерения фактической толщины нанесенного на образцы средства огнезащиты.

Измерение толщины покрытия проводят не менее чем в пяти точках в центре и по периметру обогреваемой поверхности стальной пластины. За результат следует принимать среднее арифметическое значение результатов всех измерений. При этом среднее квадратическое отклонение $S_{\bar{x}}$ должно составлять не более 20% от результата измерений. Оценку вычисления среднего квадратического отклонения результата измерений следует проводить по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (31)$$

где S – среднее квадратическое отклонение результата измерений;

$x_i - i^{\text{й}}$ результат измерений;

$\bar{x}$ – среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений;

n - число исправленных результатов измерения.

4.5.3. Подготовить установку для проведения испытаний:

4.5.3.1. Пластины, с нанесенным на нее огнезащитным покрытием, закрепить на теплоизолированном подвижном держателе образца. Сбоку установить газовую горелку, мундштук которой выставить соосно оси корпуса, и подготовить горелку к проведению испытаний (рисунок 36).

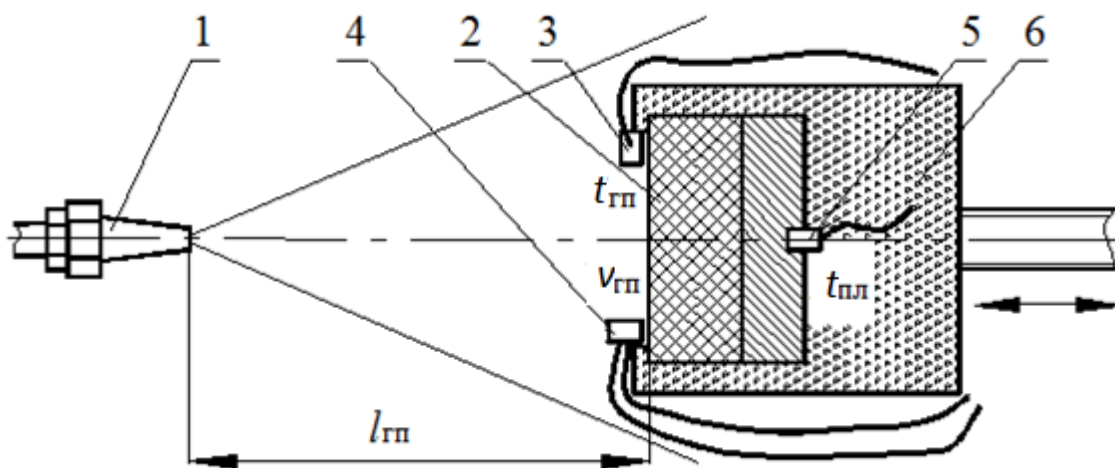
4.5.3.2. Установить термопары и подключить их к многоканальному температурному регистратору.

4.5.3.3. Включить горелку и настроить пламя таким образом, чтобы его длина составила около 20 см.

4.5.3.4. Перемещая испытуемый образец вдоль оси корпуса с помощью резьбового штока, найти необходимую температуру испытаний по показаниям термопар измерения температуры газового потока (поз. 3, рисунок 36). Для

определения эффективности огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения температура газового потока должна составлять $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в этом случае расстояние между мундштуком газовой горелки и образцом будет составлять 140 мм, скорость газового потока в точке проведения испытаний должна находиться в пределах 76-85 м/с (контроль скорости проводят с помощью трубки Пито).

Установка для проведения испытаний готова к работе.



1 – кислородно-ацетиленовая горелка; 2 – огнезащитное покрытие; 3 – термопара измерения температуры газового потока; 4 – приемник давления газового потока (трубка Пито); 5 – термопара измерения температуры стальной пластины; 6 – теплоизолированный подвижный держатель образца

Рисунок 36 – Схема определения параметров высокотемпературного газового потока

4.6. Последовательность проведения испытания

4.6.1. Начать испытания и засечь время на часах.

4.6.2. При проведении испытаний необходимо постоянно следить за показателями термопар, и определить огнезащитную эффективность средства огнезащиты как время от начала испытаний до достижения «критической

температуры» (500 °C) на необогреваемой стороне пластины (показания термопар поз. 5, Рисунок 36).

4.6.3. При достижении необогреваемой стороной пластины 500 °C испытания прекратить и выключить горелку.

4.6.4. Перед проведением следующего испытания поменять пластину с огнезащитным составом на другой образец и повторить п.4.5.3.-4.6.3.

4.7. Обработка и оценка результатов испытания

4.7.1. Огнезащитная эффективность средств огнезащиты для стальных конструкций определяется как среднее арифметическое результатов испытания трех образцов, при этом результаты испытаний не должны отличаться от вычисленного значения среднего арифметического более чем на 15%.

Если указанное условие не соблюдается, то результаты испытаний, отличающиеся от среднего арифметического более чем на 15%, исключаются, а вместо каждого из них проводят по два дополнительных испытания и вновь определяют среднее арифметическое.

4.7.2. После проведения испытаний регистрируют поведение средства огнезащиты (вспучивание, обугливание, отслоение, выделение дыма и т. д.).

4.7.3. Для того, чтобы сделать выводы по использованию испытанного огнезащитного средства на практике, необходимо провести оценку его характеристик путем сравнения времени огнезащитной эффективности, полученного в результате данных испытаний (τ_{ϕ}), и времени огнезащитной эффективности, полученного в результате испытаний в условиях стандартного температурного режима (τ_{cm}) (см. Приложение к методике)

4.8. Оформление результатов испытаний

Результаты испытаний оформляют в виде протокола. Протокол должен содержать следующие данные: сведения об изготовителе средства огнезащиты; дату нанесения средства огнезащиты; способ нанесения; расход средства огнезащиты, количество слоев и общую толщину сухого слоя огнезащитного покрытия; наименование метода испытания с указанием установленных параметров газового потока; дату проведения испытания; результат испытания.

Приложение к методике

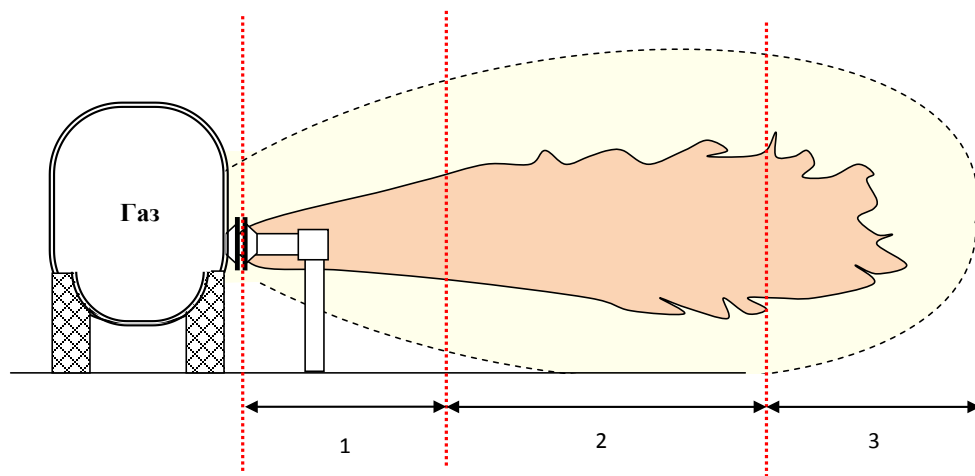
Для оценки применимости испытанных огнезащитных составов на стальных конструкциях объектов нефтегазовой отрасли в случае возможного возникновения факельного углеводородного горения необходимо рассчитать коэффициенты применимости по следующим формулам:

1. Критерий относительной огнезащитной эффективности ($K_{оз}$)

$$K_{оз} = \frac{\tau_{ст}}{\tau_{ф}}$$

Выводы:

В случае возможного возникновения факельного углеводородного горения необходимо факел пламени разделить на три зоны в зависимости от длины факела (см. п.2 приложения – Критерий факельности): зона реактивного горения, зона углеводородного горения, зона стандартного горения (рисунок 37).



1 – зона реактивного горения; 2 – зона углеводородного горения; 3 – зона стандартного горения.

Рисунок 37 – Разделение факельного углеводородного горения на зоны

Если коэффициент относительной огнезащитной эффективности принимает значение равное или меньше единицы ($K_{оэ} \leq 1$), то применение данного огнезащитного состава на строительных конструкциях зданий и технологических установок нефтеперерабатывающих производств предлагается считать допустимым во всех зонах, включая реактивную зону факельного горения.

Если коэффициент принимает значения от 1 до 2,5 ($1 < K_{оэ} \leq 2,5$), то применение данных составов представляется возможным допустить в зонах углеводородного и стандартного горения.

При значениях коэффициента более 2,5 ($K_{оэ} > 2,5$) применение данного состава допустимо только в зонах стандартного горения, либо в зонах реактивного и углеводородного горения для обеспечения достаточного интервала времени сохранения огнестойкости конструкций, необходимого для срабатывания систем пожаротушения, водяного орошения, защитных водяных завес, а также в отдельных случаях для защиты путей эвакуации персонала.

2. Критерий факельности ($K_{ф}$) – коэффициент, характеризующий воздействие высокотемпературного (горящего) газового потока в зависимости от удаленности от отверстия истечения газа (таблица 28).

Таблица 28 – Длины зон факельного горения

Длина факела пламени	Зона реактивного воздействия	Зона углеводородного воздействия	Зона стандартного воздействия
от 10 до 15 м	до 5 м	5-12 м	от 12 м
от 15 до 30 м	до 10 м	10-25 м	от 25 м
свыше 30 м	до 15 м	15-35 м	от 35 м

Выводы по Главе 4

Предлагаемая методика определения эффективности средств огнезащиты для стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли обеспечивает проведение испытаний огнезащитных составов при комплексном воздействии температуры и скорости газового потока на огнезащитное покрытие, позволяя упростить конструкцию и методику проведения эксперимента и, следовательно, удешевить испытания, а также максимально приблизить условия испытаний к условиям пожара.

Структурная схема методики представлена на рисунке 38.

Основное содержание четвертой главы и полученные научные результаты отражены в работах автора [2, 72, 73].

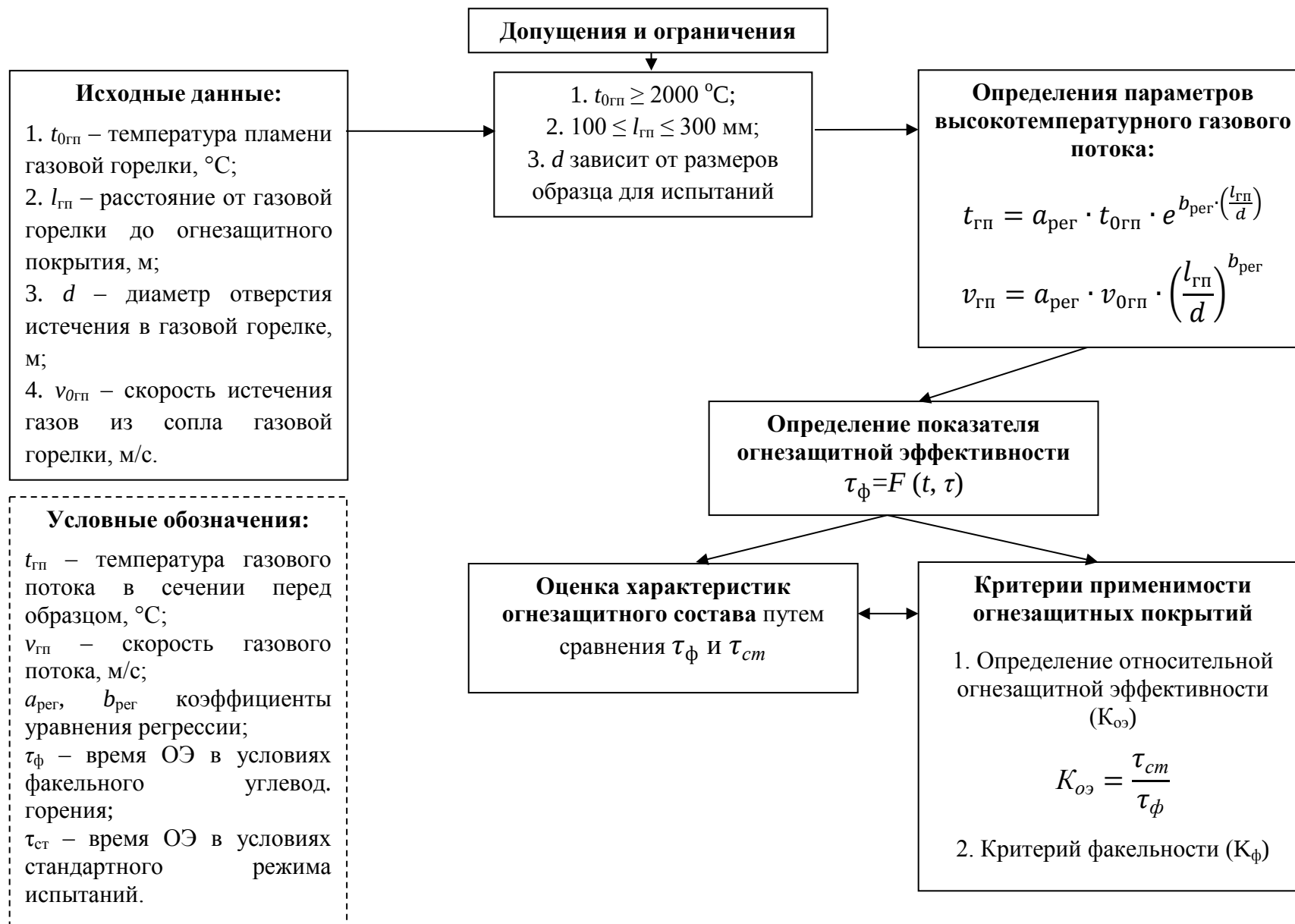


Рисунок 38 – Структурная схема методики

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования был предложен комплекс научно-технических решений и реализован ряд практических и экспериментальных задач:

1. Определены основные условия процессов факельного углеводородного горения.

2. На основе выделенных параметров, влияющих на эффективность огнезащитных покрытий в условиях факельного углеводородного горения, разработана конструкция испытательной установки по определению эффективности огнезащитных покрытий. Для достижения необходимых значений выбранных параметров в лабораторных условиях было предложено использование газовой горелки, например ацетилен-кислородной. Применение газовой горелки при испытаниях огнезащитных составов имитирует условия воздействия факельного углеводородного горения на конструкции при пожарах на объектах нефтегазовой отрасли.

3. Предлагаемая методика определения огнезащитной эффективности обеспечивает проведение испытаний огнезащитных составов при комплексном воздействии температуры и скорости газового потока на огнезащитное покрытие, позволяя упростить конструкцию и методику проведения эксперимента и, следовательно, удешевить испытания, а также максимально приблизить условия испытания к условиям пожара. Предлагаемая методика может быть использована:

- для сравнительной оценки огнезащитной эффективности средств огнезащиты;
- для определения и контроля огнезащитной эффективности составов при их разработке, производстве и применении;
- для определения изменения огнезащитной эффективности после ускоренного старения.

4. На основе проведенных исследований выделены зоны факельного углеводородного горения, даны их характеристики и определены критерии применимости огнезащитных составов, позволяющие использовать

дифференцированный подход к обработке стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли и сократить материальные затраты на проведение огнезащитных работ.

5. На основе выделенных критериев разработаны научно-обоснованные рекомендации по применению огнезащитных составов на стальных конструкциях объектов нефтегазовой отрасли.

6. Дальнейшее развитие данной тематики целесообразно продолжить в области исследования поведения огнезащитных покрытий в других различных условиях, например находящихся под нагрузкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, С. В. Прогнозирование последствий аварий при разгерметизации резервуарного оборудования: дис. канд. техн. наук: 05.26.03: защищена 08.02.2011: утв. 27.06.2011 / Алексеев Сергей Викторович. – Казань: 2011 г. – 191 с.
2. Андриюшкин А.Ю. О методике определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения [Электронный ресурс] / А.Ю. Андриюшкин, А.А. Цой // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 2016. – №2. – URL: <http://www.vestnik.igps.ru>. (Дата обращения 21.06.2016)
3. Андриюшкин, А.Ю. Композиционные материалы в производстве летательных аппаратов: учебное пособие /А.Ю. Андриюшкин, В.К. Иванов. - СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2010.- 144с. - ISBN 978-5-85546-515-0.
4. Андриюшкин, А.Ю. О методе испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературных газовых потоках / А.Ю. Андриюшкин, А.А. Цой, М.А. Симонова // Проблемы управления рисками в техносфере, 2016. – №2 (38). – С. 37-45.
5. Андриюшкин, А.Ю. Об основных предпосылках метода испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературных газовых потоках / А.Ю. Андриюшкин, А.А. Цой, М.А. Симонова // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – №1 (37). – С.39-46.
6. Андриюшкин, А.Ю. Определение параметров высокотемпературного газового потока при испытаниях огнезащитных покрытий / А.Ю. Андриюшкин, А.А. Цой // Безопасность жизнедеятельности, 2016. – №7. – С.35-39
7. Андриюшкин, А.Ю. Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением: монограф. Основные положения - СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2012. – 400 с. - ISBN 978-5-85546-673-7.

8. Аннушкин, Ю.М. Длина турбулентного газового пламени в неподвижном воздухе различной температуры / Ю.М. Аннушкин, В.А. Сосунов // Физика горения и взрыва. – Новосибирск, 1970. – № 4. – с. 495-503: ил.
9. Баев, В.К. О длине диффузионных пламен / В.К. Баев, П.П. Кузнецов, И.А. Могильский, и др. Сосунов // Физика горения и взрыва. – Новосибирск, 1974. – № 4, с 485-492: ил.
10. Безопасность труда в промышленности: научн.-производ. журн. / учредитель РОСТЕХНАДЗОР, ЗАО «НТЦ ПБ». – 2005-2015. – Ежемес.– ISSN 0409-2961.
11. Бэр, Э. Конструкционные свойства пластмасс – М.: Химия, 1967. – 464 с.
12. Вахитова, Л.Н., Калафт, К.В. Огнезащита стальных конструкций [Электронный ресурс] / Л.Н. Вахитова, К.В. Калафт. – Украинский центр стального строительства. Статьи и интервью. URL: <http://www.uscc.ua/ru/komitety/ognezashhita-stalnykh-konstrukcij>. (Дата обращения: 22.07.2015)
13. Винтовкин, А.А. Горелочные устройства промышленных печей и топок (конструкции и технические характеристики): справочник / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусовский. – М.: Интермет Инжиниринг, 1999. – 560 с.
14. Вулис, Л.А. Аэродинамика факела / Л.А. Вулис, Л.И. Ярин – Л.: Энергия, 1978. – 216 с.
15. Гимранов, Ф.М. Прогнозирование сценариев развития аварий на нефтехимических производствах / Ф.М. Гимранов // Вестник Казанского Технологического Университета. – Казань, 2010. – № 5 – с. 158 – 161.
16. Гимранов, Ф. М. Возможные сценарии развития аварий на нефтехимических производствах // Промышленная и экологическая безопасность, охрана труда. – 2012. – №1 (63). – С. 24-29

17. Гиневский, А. С. Теория турбулентных струй и следов. – М.:Машиностроение, 1969. – 398 с.: ил.

18. Глебова, Е.В. Снижение риска аварийности и травматизма в нефтегазовой промышленности на основе модели профессиональной пригодности операторов: дис. докт. техн. наук: 05.26.03: защищена 04.04.2009: утв. 12.08.2009 / Глебова Елена Витальевна. – М.: 2009 г. – 325 с.

19. Глизманенко, Д.Л. Газовая сварка и резка металлов: уч. для индивид. и бриг. подг. раб. на произв. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1969. – 238 с.

20. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные методы испытаний на огнестойкость. Общие требования [Электронный ресурс]. – Введ. 1996-01-01. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 15.05.2014)

21. ГОСТ Р 12.3.047-98. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля [Электронный ресурс]. – Введ. 1998-08-03. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 09.06.2014)

22. ГОСТ Р 50779.21-2004. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение [Электронный ресурс]. – Введ. 2004-01-12. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 09.06.2014)

23. ГОСТ Р 50779.22-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего [Электронный ресурс]. – Введ. 2005-05-31. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 09.06.2014)

24. ГОСТ Р 53295—2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности [Электронный ресурс]. – Введ. 2010-01-01. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 15.05.2014)

25. ГОСТ Р 7.0.11-2011. СИБД. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления [Электронный ресурс]. – Введ. 2012-09-01. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 09.10.2015)

26. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений [Электронный ресурс]. – Введ. 2013-01-01. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 27.04.2015)

27. ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Часть 2. Альтернативные и дополнительные методы [Электронный ресурс]. – Введ. 2015-06-01. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 15.09.2015)

28. Демёхин, Ф.В. О проблеме тушения пожаров в резервуарах с кольцевой защитной стенкой [Электронный ресурс] / Ф.В. Демёхин, А.А. Таранцев, Д.И. Белов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2013. - №2. – URL: <http://www.vestnik.igps.ru> (Дата обращения: 14.05.2014).

29. Демидов, П.Г. Горение и свойства горючих веществ. – М: Изд-во мин-ва ком. хоз. РСФСР, 1962. – 262 с.

30. Дидковский, О.Б. Совершенствование нормативной базы для нефтяных стальных резервуаров [Электронный ресурс] / О.Б. Дидковский, Э.Я. Еленицкий., Х.М. Ханухов, А.А. Катанов, С.Г. Иванцова. – ЗАО

“Химсталькон-Инжиниринг”. Техническая информация. Статьи. URL: <http://www.himstalcon.ru/node/247> (Дата обращения: 14.05.2014).

31. Еленицкий, Э. Я. Современные проблемы расчета резервуарных металлоконструкций [Электронный ресурс]: доклад – Самарский филиал "КХМ - Проект". URL: <http://www.rmkn.ru/konf2002/old/elenickij.php> (Дата обращения: 14.05.2014)

32. Ершин, Ш. Л. Аэродинамика турбулентного диффузионного факела, развивающегося в спутных коаксиальных струях / Ш.Л. Ершин, В.Н. Войчак // Теория и практика сжигания газа. – Л.: Недра, 1968. – № 4. – с. 73-87: ил.

33. Иванов, Е.Н. Основы пожарной защиты нефтеперерабатывающих заводов. – М: «Химия», 1977. – 144 с.

34. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. / Ю.М. Лахтин Ю. М., В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

35. Лебедева, М.И. Аналитический обзор статистики по опасным событиям на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / М.И. Лебедева, А.В. Богданов, Ю.Ю. Колесников // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – № 4 (50). – С.22-30

36. Лисиенко, В.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: справочник в 3 кн. / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. – М: Теплотехник, 2003.– Кн.2.– 833 с.

37. Малинин, В.Р. Теоретические основы оценки и способы снижения техногенной опасности резервуарного хранения нефти и нефтепродуктов: дис. док. тех. наук: 05.26.03: защищена 17.05.2005: утв. 27.09.2005 / Малинин Владимир Романович. – Санкт-Петербург, 2005. -243 с.

38. Маршалл, В. Основные опасности химических производств: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 672 с.: ил.

39. Никифоров, Н.И. Справочник газосварщика и газорезчика / Н.И. Никифоров, С.П. Нешумова, И.А. Антонов – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа; 1999 – 239 с.: ил.

40. НСР ЕН 1991-1-2-2011. Еврокод 1: Воздействия на сооружения – Часть 1-2: Основные воздействия – Воздействия на сооружения при пожаре (1-я редакция) [Электронный ресурс] – Введ. 2011-01-01. – Научно исследовательский центр «Строительство». URL: <http://www.cstroy.ru/files/ntdoc/np1991-1-2.pdf> (Дата обращения 15.01.2016)

41. О промышленной безопасности опасных производственных объектов [Электронный ресурс]: федер. закон: [№ 116-ФЗ, принят Гос. Думой 20 июня 1997, одобрен Советом Федерации 21 июля 1997 г., с изм. и доп. от 2 июля 2013 г. № 186-ФЗ]. – Правовой сайт «КонсультантПлюс» URL: <http://www.consultant.ru> (Дата обращения 09.06.2014)

42. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404 (с изменениями и дополнениями от 14.12.2010 г. приказ МЧС № 649). – Правовой сайт «КонсультантПлюс» URL: <http://www.consultant.ru> (Дата обращения 09.06.2014)

43. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности [Электронный ресурс]: свод правил: СП 12.13130.2009: утв. и введ. в действие приказом МЧС от 25.03.2009 г. № 182. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 09.06.2014)

44. Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу: методика. – М: ВНИИПО, 1998. – 10с.

45. Основы государственной политики в области обеспечения безопасности населения РФ и защищенности критически важных и потенциально опасных объектов от угроз природного и техногенного характера и террористических актов на период до 2020 года [Электронный ресурс]: поручение

Президента РФ от 15.11.2011 г. № Пр-3400 // – Правовой сайт «КонсультантПлюс» URL: <http://www.consultant.ru> (Дата обращения 09.06.2014)

46. Отчёты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (годовые) [Электронный ресурс] – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). URL: http://www.gosnadzor.ru/osnovnaya_deyatelnost_slujby/otcheti (Дата обращения: 22.07.2014)

47. Оценка качества огнезащиты и установление вида огнезащитных покрытий на объектах: руководство. - М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2010. - 14 с.

48. Пономарев, А.А. Параметры пожароопасности струйных выбросов горючих газов / А.А. Пономарев, В.Л. Карпов, В.В. Строганов // Пожаровзрывобезопасность. – М.: ВНИИПО, 1996. – №3. – С.17-22.

49. Пособие по определению пределов огнестойкости строительных конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов (к СНиП II-2-80). – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко. - М., 2013. – 113 с.

50. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов. – М.: ВНИИПО, 2012. – 242 с.

51. Противопожарная защита предприятий нефтеперерабатывающего комплекса [Электронный ресурс]: Семинар №5 «Электронные системы безопасности», 27 марта 2009 г. – Институт электронных систем безопасности URL: <http://www.i-e-s-b.ru/site/119> (Дата обращения: 15.07.2014)

52. Ройтман, В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. – М: Ассоциация «Пожнаука», 2001. – 354 с.

53. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий: М.: ФГУ ВНИИПО МЧС, 2006 г. [Электронный ресурс]. –

Правовой сайт «КонсультантПлюс» URL: <http://www.consultant.ru> (Дата обращения 09.02.2014)

54. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках [Электронный ресурс]. – М.: ГУГПС-ВНИИПО-МИПБ, 1999. – Портал «Стройплан.ру» URL: <http://www.stroyplan.ru/docs.php?showitem=7251> (Дата обращения 09.02.2014)

55. Рыбка, Е.А. Лабораторная установка для оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий для металлических конструкций с учетом параметров развития реального пожара / Е.А. Рыбка, В.А. Андронов // Пожаровзрывобезопасность. Т. 19 – 2010. – № 10. – С. 19-23.

56. Сизов, А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах – М.: Металлургия, 1987. – 256 с.

57. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты [Электронный ресурс]: свод правил: СП 2.13130.2012: утв. и введ. в действие приказом МЧС от 21.11.2012 г. № 693. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 09.06.2014)

58. Собурь, С.В. Огнезащита материалов и конструкций: учебно-справочное пособие – М.: ПожКнига, 2008. – 200 с.

59. Соколик, А.С. Самовоспламенение, пламя и детонации в газах – М: Изд. АН СССР, 1960. – 429 с.

60. Способ определения теплозащитных свойств высокотемпературных покрытий и деталей и устройства для его осуществления [Электронный ресурс]: пат. 2284514 Российская Федерация: МПК G01N25/00 / Бычков Н.Г., Ножницкий Ю.А., Першин А.В.; заявитель и патентообладатель Центр. ин-т авиац. моторостроения им. П.И. Баранова. – № 20051001381/28; заявл. 24.01.2005; опубл. 27.09.2006, Бюл. №27. – 53 с.: ил.

61. Справочник по огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций, пожарной опасности строительных материалов и огнестойкости

инженерного оборудования зданий (в помощь инспектору Государственной противопожарной службы). – М.: ГУГПС, ВНИИПО, 1999. – 28 с.

62. СТ СЭВ 383-87. Пожарная безопасность в строительстве. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Введ. 1987-07-01. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (Дата обращения 09.06.2014)

63. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н. Огнезащита строительных конструкций: современные средства и методы оптимального проектирования // Строительные материалы. – 2002. – №6. – С. 2-5.

64. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф. Огнезащита строительных конструкций / Под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: ТИМР, 2000. – 433 с.

65. Техническая информация (в помощь инспектору Государственной противопожарной службы) [Электронный ресурс]. – Портал по технической информации DWG. Архив 2015. URL: <http://www.dwg.ru>. (Дата обращения: 11.08.2015)

66. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: федер. закон № 123-ФЗ: принят Гос. Думой 22.07.2008 (в ред. от 13.07.2015). – Информационно-правовой портал «Гарант». URL: <http://www.base.garant.ru> (Дата обращения: 15.12.2013)

67. Тимофеева, С.С. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособие. / С.С. Тимофеева, Т.И. Дроздова, Г.В. Плотникова, В.Ф. Гольчевский. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 178 с.

68. Ханухов, Х.М. Нормативно-техническое и организационное обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных конструкций / Х.М. Ханухов, А.В. Алипов // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сборник научных трудов. – М: 2011 г. – № 10. – стр. 384-422.

69. Хотел, Г. Диффузное горение ламинарных и турбулентных струй. Вопросы горения и детонационные волны / Г. Хотел. – М.: Оборонгиз, 1958. – 204 с.

70. Цой, А.А. Влияние условий факельного углеводородного горения на огнезащитные покрытия стальных конструкций: междунар. науч. период. изд. по итогам Междунар. научн.-практ.конф. (14 апреля, 2016 г., г. Нижний Новгород): 3 ч. / А.А. Цой // Новая наука: теоретический и практический взгляд. – Ч.2 – Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016.– С. 211-213 –ISSN 2412-9720.

71. Цой, А.А. Обеспечение пожарной безопасности стальных конструкций объектов нефтегазовой отрасли: сборник научных статей по матер. XI Всерос. научн.-практ. конф. (12-14 апреля, 2016 г., г. Санкт-Петербург) / А.А. Цой, Ф.В. Демехин // Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму. – СПб: СПбУ ГПС МЧС России, 2016. – С.126-129.

72. Цой, А.А. Обоснование состава и технических параметров испытательной установки для определения показателя эффективности огнезащитных покрытий: сборник статей Междунар. научн.-практ. конф. (10 апреля, 2016 г., г. Пермь). // Новые задачи технических наук и пути их решения – Уфа: АЭТЕРНА, 2016.– С.154-157 –ISBN 978-5-906869-00-5.

73. Цой, А.А. Способ испытаний огнезащитных материалов в условиях факельного углеводородного горения: сборник научн. стат. по матер. II межвуз.научн.-практ. конф. (20 апреля, 2016 г., г. Иваново) / А.А. Цой, Ф.В. Демехин // Современные пожаробезопасные материалы и технологии. – Иваново: ИПСА ГПС МЧС России , 2016.– С. 181-187

74. Цой, А.А. Испытание огнезащитных материалов в условиях углеводородного температурного режима [Электронный ресурс] / А.А. Цой, Ф.В. Демехин // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 2015. – №4. – URL: <http://www.vestnik.igps.ru>. (Дата обращения 21.02.2016)

75. Цой, А.А. Критерии модели эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения / А.А. Цой, Ф.В. Демехин // Международный научно-исследовательский журнал,

2016. – № 6 (48). – Ч.2. – С.161-165 – ISSN 2303-9868 (PRINT), DOI: 10.18454/IRJ.2227-6017

76. Цой, А.А. Поведение огнезащитных материалов при пожарах на объектах нефтегазовой отрасли: материалы VII Междунар. научн.-практ. конф. (24 сентября, 2015 года, г. Санкт-Петербург) // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Обеспечение безопасности при чрезвычайных ситуациях.– СПб: СПбУ ГПС МЧС России, 2015. – С. 47-49

77. Цой, А.А. Пожарная безопасность предприятий нефтеперерабатывающего комплекса: сборник научных статей по матер. межвуз.научн.-практ. конф. (20 марта, 2014 г., г. Санкт-Петербург) // Наукоемкие технологии – СПб: СПбГУКиТ, 2014. – С. 49-54.

78. Чикурова, А.А. Методы системного анализа в решении задач повышения уровня противопожарной защиты технологических сооружений нефтеперерабатывающих производств: матер. межвуз. научн-практ. семинара (29 января, 2014 г., г. Санкт-Петербург) // Системный анализ научных исследований – СПб: СПбУГПСМЧС России, 2014. –С. 46-49

79. Чурбанов, О.И. Математические модели определения параметров силовых полей опасных факторов для населения и территорий при гильотинном разрушении газопровода / О.И. Чурбанов, А.И. Овсяник, И.Ю. Олтян // Проблемы безопасности при ЧС, 2004. - № 4. - С. 73-84.

80. Шевердин, А.В. Оценка массы парогазового облака, образующегося при аварийной разгерметизации оборудования нефтеперерабатывающих предприятий: дис. канд. техн. наук: 05.26.03: защищена 23.10.2001: утв. 14.01.2002 / Шавердин Александр Васильевич – Уфа: 2001 г. – 127 с.

81. Щелкин, К.И. Газодинамика горения / К.И. Щелкин, Я.К. Трошин. – М.: Изд. АН СССР, 1963. – 175 с.

82. Энергетическая стратегии России на период до 2030 года [Электронный ресурс]: распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р – Информационно-правовой портал «Гарант». URL:

<http://www.base.garant.ru/products/ipo/prime/doc/96681/> (Дата обращения: 15.07.2014)

83. Beele engineering Jet fire test 2009. Maximum simplicity of use Optimum flexibility Outstanding performance. – Presentation of Beele engineering bv. – URL: <http://www.actifoam.com>

84. Determination of the resistance to jet fires of passive fire protection materials -Part 1: General requirements: ISO 22899-1:2007. URL: <http://pfpsystems.com>

85. Determination of the resistance to jet fires of passive fire protection -- Part 2: Guidance on classification and implementation methods: ISO/TR 22899-2:2013. URL: <http://pfpsystems.com>

86. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire: EN 1991-1-2. URL: <http://pfpsystems.com>

87. Fire resistance tests. General requirements Alternative and additional procedure: EN 1363:1/2/3-1999. URL: <http://pfpsystems.com>

88. Fire tests of building construction and materials: ASTM E119. URL: <http://pfpsystems.com>

89. Fire tests of building construction and materials: UL 263 (1997-02). URL: <http://pfpsystems.com>

90. Fire tests on building materials and structures. Methods for determination of the fire resistance of load bearing elements of construction: BS 476-21:1987. URL: <http://pfpsystems.com>

91. Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 3: Commentary on test method and guide to the application of the outputs from the fire-resistance test: ISO 834-3:2012. URL: <http://pfpsystems.com>

92. Gómez M.M., Zárate L., Casal J. Jet fires and the domino effect // Fire Safety Journal. – 2009 – Vol. 43 (8) с p. 583-588.

93. Henry Persson, Anders Lönnermark. Tank Fires Review of fire incidents 1995–2012 – Swedish National Testing and Research Institute, 2013.

94. Jet-Fire Resistance Test of Passive Fire Protection Materials: OTI 95 634. Issued by both Health and Safety Executive, UK report no. OTI 95 634, ISBN 0-7176-11663 and Norwegian Petroleum Directorate, report no. 048270, ISBN 82-7257-516-7
95. Luis G. Zárate, Hugo E. Laraa, Mario E. Corderoa. Infrared Thermography and CFD Analysis of Hydrocarbon Jet Fires // Chemical engineering transactions. – Vol. 39 – 2014. – p. 321-328.
96. Opstad K., Berge G., Kolsaker K.: Calculation of Temperature Response in Fire Protected Flanges – Petrell 09-51285-01, Trondheim Norway, 2009.
97. Richard G. Gewain, Nestor R. Iwankiw, Farid Alfawakhiri, George Frater. Fire. Facts for steel buildings. – Canadian Institute of Steel Construction. – Toronto, 2006.
98. Robin Wade. Partners in Engineered Design Solutions for hydrocarbon processing assets? – Presentation of International Fire and Security Conference & Exhibition. – July, 2015.
99. Standard for Safety for Rapid Rise Fire Tests of Protection Materials for Structural Steel: ANSI/UL 1709 (2007). URL: <http://pfpsystems.com>
100. Standard for Safety for Rapid Rise Fire Tests of Protection Materials for Structural Steel: UL 1709. URL: <http://pfpsystems.com>
101. Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials: CAN/ULC-S101-04. URL: <http://pfpsystems.com>
102. Standard Methods of Tests of Fire Resistance of Building Construction and Materials: NFPA 251. URL: <http://pfpsystems.com>
103. Standard Test Methods for Determining Effects of Large Hydrocarbon Pool Fires on Structural Members and Assemblies: ASTM E 1529-14A. URL: <http://pfpsystems.com>
104. Tugnoli A., Salzano E., Di Benedetto A., Russo P., Cozzani V. Analysis of the flash-fire scenario in the viareggio accident // Chemical Engineering Transactions – 2013. – Vol. 32. – p. 403-408.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Рисунок 1 – Процентное соотношение сценариев развития пожаров в проанализированных случаях	11
Рисунок 2 – Разрушение конструкций в результате аварии на Ачинском НПЗ в июне, 2014 года	12
Рисунок 3 – Пожар на Саратовском НПЗ 4 октября 2012 года	13
Рисунок 4 – Пожар в резервуарном парке установки подготовки нефти «Уса» (Республика Коми, 21 мая 2014 г.)	14
Рисунок 5 – Процентное соотношение причин разгерметизации и разрушения технических устройств и оборудования	14
Рисунок 6 – Схема развития пожаров на объектах нефтегазовой отрасли	17
Рисунок 7 – Аварийное истечение ГЖ или ЛВЖ и образование пожара пролива	17
Рисунок 8 – Аварийное истечение ГЖ или ЛВЖ и образование пожара пролива	18
Рисунок 9 – Аварийное истечение газа, образование факельного горения	18
Рисунок 10 – Разрушение строительных конструкций при пожаре на Ачинском НПЗ, июнь 2014 г.	21
Рисунок 11 – Температурные режимы	28
Рисунок 12– Стадии углеводородного температурного режима	33
Рисунок 13 – Проведение испытаний по международному стандарту ISO 22899-1:2007 и ISO/CD 22899-2:2009	37
Рисунок 14 – Схема решения научной задачи	44
Рисунок 15 – Разрушение полимеров в высокотемпературном газовом потоке....	51
Рисунок 16 – Образец для испытаний.....	54
Рисунок 17 – Схема экспериментальной установки для испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке	55
Рисунок 18 – Типовые температурные режимы испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке	56
Рисунок 19– Схема определения параметров высокотемпературного газового потока	58
Рисунок 20 – Зависимость температуры газового потока $T_{гп}$ от расстояния между горелкой и огнезащитным покрытием $l_{гп}$	60
Рисунок 21 – Зависимость скорости газового потока $v_{гп}$ от расстояния между горелкой и огнезащитным покрытием $l_{гп}$	61
Рисунок 22– Огнезащитный состав Стабирем-217, нанесенный на металлическую пластину	66
Рисунок 23 – Огнезащитный состав Chartek-1709, нанесенный на металлическую пластину	67

Рисунок 24 – Огнезащитный состав ПЗСМ, нанесенный на металлическую пластину	67
Рисунок 25 – Разрушение огнезащитного покрытия Фризол-ЭП после окончания проведения испытаний при температуре 1100 °С.....	78
Рисунок 26 – Разрушение огнезащитного покрытия Fire Protect после окончания проведения испытаний при температуре 1100 °С.....	78
Рисунок 27 – Вспучивание огнезащитного покрытия Chartek-1709 после 10 мин проведения испытания при температуре 1100 °С.....	79
Рисунок 28 – Сравнение результатов испытаний огнезащитного состава Стабитерм-217 на предлагаемой установке и при стандартном температурном режиме	83
Рисунок 29– Сравнение результатов испытаний огнезащитного состава Fire Protect на предлагаемой установке и при стандартном температурном режиме ...	84
Рисунок 30– Сравнение результатов испытаний огнезащитного состава Фризол-ЭП на предлагаемой установке и при стандартном температурном режиме	84
Рисунок 31 – Сравнение результатов испытаний огнезащитного состава Chartek 1709 на предлагаемой установке и при стандартном температурном режиме..	85
Рисунок 32 – Изменение времени огнезащитной эффективности ($\tau_{\text{ф}}$) в зависимости от расстояния между горелкой и огнезащитным покрытием $l_{\text{гп}}$	86
Рисунок 33 – Разделение факельного углеводородного горения на зоны	88
Рисунок 34 – Схема экспериментальной установки для испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературном газовом потоке	101
Рисунок 35 – Образец для испытаний.....	102
Рисунок 36 – Схема определения параметров высокотемпературного газового потока	104
Рисунок 37 – Разделение факельного углеводородного горения на зоны	107
Рисунок 38 – Структурная схема методики	109

Таблица 1 – Статистика опасных событий на объектах нефтегазовой промышленности.....	10
Таблица 2 – Температурный режим при определении теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий	30
Таблица 3 – Зарубежные нормативные документы по оценке огнестойкости и эффективности огнезащитных покрытий для строительных конструкций	33
Таблица 4 – Линейная скорость абляции полимеров	52
Таблица 5 – Средние значения температуры и скорости газового потока на различных расстояниях от сопла горелки	59

Таблица 6 – Характеристика основных средств огнезащиты, нанесенных на образцы.....	64
Таблица 7 – Значения толщины огнезащитного покрытия, нанесенного на поверхность пластины	68
Таблица 8 – Изменение температуры пластины с огнезащитным покрытием Стабигерм-217 в процессе испытаний	70
Таблица 9 – Изменение температуры пластины с огнезащитным покрытием Fire Protect в процессе испытаний.....	71
Таблица 10 – Изменение температуры пластины с огнезащитным покрытием Фризол-ЭП в процессе испытаний	72
Таблица 11 – Изменение температуры пластины с огнезащитным покрытием Chartek-1709 в процессе испытаний	73
Таблица 12 – Изменение температуры пластины с огнезащитным покрытием ПЗСМ в процессе испытаний.....	75
Таблица 13 – Результаты визуального наблюдения за состоянием образца во время испытаний при температуре 1100 °С, покрытого огнезащитным составом Стабигерм-217	76
Таблица 14 – Результаты визуального наблюдения за состоянием образца во время испытаний при температуре 1100 °С, покрытого огнезащитным составом Fire Protect	76
Таблица 15 – Результаты визуального наблюдения за состоянием образца во время испытаний при температуре 1100 °С, покрытого огнезащитным составом Фризол-ЭП	77
Таблица 16 – Результаты визуального наблюдения за состоянием образца во время испытаний при температуре 1100 °С, покрытого огнезащитным составом Chartek-1709	77
Таблица 17 – Результаты визуального наблюдения за состоянием образца во время испытаний при температуре 1100 °С, покрытого огнезащитным составом ПЗСМ.....	77
Таблица 18. Время наступления огнезащитной эффективности по результатам проведения испытаний при температуре пламени газовой горелки 1100 °С ($l_{гп}=140$ мм)	81
Таблица 19. Время наступления огнезащитной эффективности по результатам проведения испытаний при температуре пламени газовой горелки 930 °С ($l_{гп}=180$ мм)	81
Таблица 20. Время наступления огнезащитной эффективности по результатам проведения испытаний при температуре пламени газовой горелки 830 °С ($l_{гп}=200$ мм)	82

Таблица 21. Время наступления огнезащитной эффективности по результатам проведения испытаний при температуре пламени газовой горелки 730 °С ($l_{гп}=240$ мм)	82
Таблица 22 – Расчет доверительных границ случайной погрешности.....	94
Таблица 23 – Вычисление критериев Граббса для исключения грубых погрешностей.....	94
Таблица 24 – Расчет доверительных границ погрешности оценки измеряемой величины	95
Таблица 25 – Результат оценки показателя огнезащитной эффективности	96
Таблица 26 – Относительная огнезащитная эффективность испытанных огнезащитных составов	97
Таблица 27 – Длины зон факельного горения.....	98
Таблица 28 – Длины зон факельного горения.....	108

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Санкт-Петербургского
университета Государственной
противопожарной службы МЧС России
генерал-лейтенант внутренней службы

Э.Н. Чижиков

« 12 » 01 2016 года

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования адъюнкта факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России старшего лейтенанта внутренней службы Цой А.А. на тему: «Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения» в учебный процесс кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств.

Комиссия в составе:

Председатель – врио начальника кафедры ПБТПП, майор внутренней службы Симонова М.А., кандидат технических наук;

Члены комиссии – доцент кафедры Маловечко В.А., кандидат технических наук, доцент; старший преподаватель кафедры Савельев Д.В., кандидат военных наук, доцент

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования Цой А.А., а именно «основные параметры факельного углеводородного горения» и «конструкция и технические параметры испытательной установки для определения показателя огнезащитной эффективности», используются в учебном процессе кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств при проведении занятий по дисциплине «Пожарная безопасность технологических процессов».

Использование указанных результатов позволяет повысить эффективность учебного процесса и качество подготовки специалистов.

Председатель комиссии

ВрИО начальника кафедры ПБТПиП

кандидат технических наук

майор внутренней службы

М.А. Симонова

Члены комиссии:

Доцент кафедры ПБТПиП

кандидат технических наук, доцент

В.А. Маловечко

Старший преподаватель кафедры

кандидат военных наук, доцент

полковник внутренней службы

Д.В. Савельев



инновационно-внедренческий центр прикладной науки
ПОЖИНЖИНИРИНГ
комплексные решения пожарной, промышленной и экологической безопасности

Российская Федерация
195112, г. Санкт-Петербург
пр. Шаумяна, д. 18
Тел/факс: (812) 305-38-84
Эл. почта: spb@creafire.ru
Веб-сайт: www.creafire.ru



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
С.В. Вакуленко

«28» сентября 2016 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования адъюнкта факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России старшего лейтенанта внутренней службы Цой А.А. на тему: «Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения» в практическую и научную деятельность ООО «Пожинжиниринг».

Комиссия в составе:

Председатель – генеральный директор, к.т.н., доцент Вакуленко С.В.;

Члены комиссии – главный инженер, к.т.н., Низамов М.М., ведущий специалист Ульянова А.Г., ведущий специалист Акимова А.В.

составила настоящий акт о том, что основные результаты диссертационного исследования Цой А.А., а именно: основные параметры факельного углеводородного горения, конструкция и технические параметры испытательной установки для определения показателя эффективности огнезащитных покрытий, а также критерии применимости огнезащитных покрытий для стальных конструкций инженерных сооружений

(многоярусных этажерок и постаментов) объектов нефтегазовой отрасли внедрены в практическую и научную деятельность ООО «Пожинжиниринг».

Внедрение данных результатов исследования позволяет использовать дифференцированный подход при обработке стальных конструкций средствами огнезащиты в зависимости от зоны факельного углеводородного горения, что в свою очередь увеличивает эффективность защиты стальных конструкций и снижает материальные затраты на проведение огнезащитных работ.

Председатель комиссии

Генеральный директор, к.т.н., доцент

Вакуленко С.В.

Члены комиссии:

Главный инженер, к.т.н.

Низамов М.М.

Ведущий специалист

Ульянова А.Г.

Ведущий специалист

Акимова А.В.

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ
по Ленинградской области
подполковник внутренней службы
Р.Ш. Бибарсов

«16» _____ 2016 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования адъюнкта факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России старшего лейтенанта внутренней службы Цой А.А. на тему: «Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения» в практическую деятельность ФГБУ «Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Ленинградской области».

Комиссия в составе:

Председатель – начальник ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Ленинградской области подполковник внутренней службы Бибарсов Р.Ш.

Члены комиссии – заместитель начальника ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Ленинградской области подполковник внутренней службы Кощеев М.А., кандидат химических наук, старший инженер сектора исследовательских и испытательных работ в области пожарной безопасности капитан внутренней службы Охотников М.А., старший эксперт сектора судебных экспертиз ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Ленинградской области капитан внутренней службы Змиенко Д.В.

составила настоящий акт о том, что методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения, включающая в себя определение основных параметров факельного углеводородного горения, конструкцию и технические параметры испытательной установки для определения показателя огнезащитной эффективности, а также критерии применимости

огнезащитных покрытий, внедрены в практическую деятельность ФГБУ «Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Ленинградской области».

Внедрение разработанной методики определения эффективности огнезащитных покрытий позволяет провести испытания в условиях факельного углеводородного горения и учесть аэродинамическое и температурное воздействие газового потока на огнезащиту, а также выполнить это исследование в лабораторных условиях, достаточно быстро и без значительных материальных затрат. Методика может быть использована для оценки эффективности огнезащитных покрытий в исследовательских пожарных лабораториях, экспертных организациях, научно-исследовательских и учебных организациях пожарно-технического профиля.

Председатель комиссии

Начальник ФГБУ СЭУ ФПС
ИПЛ по Ленинградской области
подполковник внутренней службы

Р.Ш. Бибарсов

Члены комиссии:

Заместитель начальника ФГБУ СЭУ ФПС
ИПЛ по Ленинградской области
подполковник внутренней службы

М.А. Кошечев

Кандидат химических наук,
старший инженер сектора исследовательских
и испытательных работ в области
пожарной безопасности ФГБУ СЭУ ФПС
ИПЛ по Ленинградской области
капитан внутренней службы

М.А. Охотников

Старший эксперт сектора
судебных экспертиз ФГБУ СЭУ ФПС
ИПЛ по Ленинградской области
капитан внутренней службы

Д.В. Змиенко