

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

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

На правах рукописи

Шимко Василий Юрьевич



**ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ ПРЕГРАДЫ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ
СЕТЧАТЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО
КОМПЛЕКСА**

Специальность: 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»
(нефтегазовая отрасль, технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Брушлинский Николай Николаевич

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ОПАСНЫХ ИНЦИДЕНТОВ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА, ТРЕБОВАНИЙ НОРМ К ПРОТИВОПОЖАРНЫМ ПРЕГРАДАМ И СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРЕГРАД.....	13
1.1 Анализ статистических данных об опасных инцидентах на объектах нефтегазового комплекса.....	13
1.2 Основные нормативные требования, предъявляемые к противопожарным преградам.....	17
1.3 Анализ существующих конструкций противопожарных и теплозащитных преград.....	20
1.4 Цель и задачи исследования.....	28
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ПРЕГРАД НА ОСНОВЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СЕТЧАТЫХ ЭКРАНОВ	30
2.1 Оценка коэффициента ослабления лучистого теплового потока теплозащитным экраном без водяного орошения.....	30
2.2 Режим «сухой» сетки.....	32
2.2.1 Теплообмен на первой сетке.....	32
2.2.2 Теплопоглощение паро-воздушно-капельной средой.....	34
2.2.3 Прохождение ИК-излучения через систему.....	37
2.3 Режим «мокрой» сетки.....	38
2.4 Численные оценки процессов поглощения и отвода тепла теплозащитным экраном.....	39
2.5 Численные оценки коэффициента поглощения тепловых потоков в режиме «сухой» сетки.....	42

2.6 Численные оценки коэффициента поглощения тепловых потоков в режиме «мокрой» сетки.....	46
2.7 Оценка коэффициента ослабления лучистого теплового потока противопожарной преградой при «стандартном» пожаре.....	48
ГЛАВА 3 СРЕДСТВА РАСПЫЛЕНИЯ ВОДЫ.....	56
3.1 Выбор способа распыления и вида распылителя.....	56
3.1.1 Характеристики распылов.....	62
3.1.2 Классификация форсунок.....	70
3.1.3 Обоснование способа распыления жидкости.....	72
3.2 Конструкция форсунки.....	75
3.3 Экспериментальное определение характеристик форсунок.....	82
3.3.1 Стенд для испытания форсунок.....	82
3.3.2 Дисперсность распыляемой воды.....	82
3.3.3 Статистическое распределение капель с разными диаметрами в потоке.....	85
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРОТИВОПОЖАРНЫМИ ПРЕГРАДАМИ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СЕТЧАТЫХ ЭКРАНОВ..	89
4.1 Задачи экспериментальных исследований и требования к разработке экспериментальных стендов.....	89
4.2 Экспериментальное определение параметров и характеристик теплозащитных экранов, обеспечивающих максимальную степень ослабления тепловых потоков.....	90
4.2.1 Разработка экспериментального стенда и методики исследований...	90
4.2.2 Результаты экспериментов и обработка полученных данных.....	93
4.2.2.1 Определение оптимальных параметров сеток теплозащитного экрана.....	94
4.2.2.2 Определение оптимальных расходов воды.....	94
4.2.2.3 Определение оптимальных расстояний между сетками.....	95

4.3 Экспериментальное исследование характеристик противопожарных преград и теплозащитных экранов в условиях горения пролива горючих жидкостей и лесопиломатериалов с плотностью теплового излучения пламени до 75 кВт/м ² ...	97
4.3.1 Разработка экспериментального стенда и методики исследований...	97
4.3.2 Результаты экспериментов и обработка полученных данных.....	98
4.3.2.1 Испытания противопожарной преграды в виде теплозащитного коридора.....	99
4.3.3 Испытания противопожарной преграды на огнестойкость	102
4.4 Экспериментальное исследование характеристик противопожарной преграды при возникновении аварийной ситуации в местах хранения сжиженного природного газа.....	110
4.4.1 Разработка экспериментального стенда и методики исследований...	110
4.4.2 Результаты экспериментов и обработка полученных данных.....	112
4.4.2.1 Исследования характеристик противопожарного устройства в условиях горения пролива сжиженного природного газа с внешней стороны конструкции	113
4.4.2.2 Исследования характеристик противопожарного устройства в условиях горения пролива сжиженного природного газа внутри конструкции.....	117
4.5 Измерительная и регистрирующая аппаратура, используемая при проведении экспериментов.....	119
ГЛАВА 5 МОДЕЛЬНЫЙ РЯД ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ПРЕГРАД И ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА ПРАКТИКЕ.....	121
5.1 Противопожарные преграды для защиты пожароопасных объектов.....	121
5.2 Противопожарное устройство для рассеивания газового облака, образующегося при утечке из наземной емкости хранения сжиженного природного газа.....	123
5.3 Теплозащитные экраны для защиты личного состава пожарной охраны...	125
5.3.1 Теплозащитный экран «Согда» 1А.01.....	125
5.3.2 Теплозащитный экран «Согда» 1В.....	126

5.3.3 Теплозащитный экран «Согда» 2А.....	127
5.4 Теплозащитные экраны для защиты оборудования, эвакуации людей.....	128
5.5 Теплозащитные экраны для защиты людей при проведении работ по ликвидации аварий на газовых и нефтяных фонтанах.....	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	133
Приложение А АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Нефтегазовая промышленность России является одной из важнейших отраслей национальной экономики, способствующей развитию других отраслей народного хозяйства и обеспечивающей существенный вклад в валовый национальный продукт [1, 2]. Вместе с тем, предприятия нефтегазового комплекса (НГК) относятся к объектам повышенной опасности, так как газ, нефть и продукты их переработки при определенных условиях могут взрываться и (или) гореть [3–7].

Анализ статистических данных о пожарах и взрывах на объектах НГК, выполненный за период с 1998 по 2016 гг., показал, что на них практически еженедельно происходят деструктивные события, приводящие к травмам и гибели людей, значительному материальному и экологическому ущербу. При этом отличительной особенностью большинства пожаров проливов горючих жидкостей (ГЖ) и сжиженного природного газа (СПГ) являлась высокая интенсивность тепловых потоков, воздействие которых приводило к уничтожению технологического оборудования, зданий, сооружений, различной техники, затруднению работы и обеспечения безопасности как персонала объекта, так и личного состава пожарной охраны [8–27].

Таким образом, одной из актуальных задач в системе противопожарной защиты объектов НГК является разработка надежных противопожарных преград, существенно снижающих плотность тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ, чему и посвящена настоящая работа.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам разработки противопожарных преград посвящено большое количество работ, выполненных как отечественными (Ройтман М.Я., Иванов Е.Н., Петров В.К., Исхаков Х.И., Полежаев Ю.В., Морозюк Ю.В., Кошмаров Ю.А., Карпов В.Л., Страхов В.Л., Давыдкин Н.Ф., Заикин С.В., Копылов Н.П., Брушлинский Н.Н., Усманов М.Х. и др. [31, 32, 34–36, 45–47, 49–70, 73–75, 77–80]), так и зарубежными учеными (*Jacques R., Tonkia R., Smith W., Nevin L., Sakurai A., Stoebich J., Hattori T., Jamison W. et al.* [33, 37–44, 48, 71, 72, 76]).

Однако, анализ результатов этих исследований, а также российских и зарубежных патентов на изобретения в рассматриваемой области, показал, что применяемые как в отечественной, так и в мировой практике противопожарные преграды имеют ряд существенных недостатков, в частности, ограниченный предел огнестойкости, требование большого расхода воды, сложность конструкций, неприемлемо высокая стоимость и др. При этом важно отметить, что простая модернизация любого из существующих способов обеспечения теплозащиты не позволяет существенно повысить их эффективность, что требует поиска новых технических решений.

Целью работы являлась разработка высокоэффективных противопожарных преград на основе теплозащитных сетчатых экранов, принцип действия которых основан на многократном ослаблении плотности теплового излучения пламени пожаров проливов ГЖ и СПГ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- предложить альтернативный способ защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ на основе применения теплозащитных сетчатых экранов;
- выполнить теоретические исследования механизма теплопереноса, протекающего при взаимодействии потока энергии, излучаемого пожаром, с теплозащитным сетчатым экраном, а также численные оценки коэффициентов поглощения тепловых потоков в режимах «сухой» и «мокрой» сеток экрана;
- обосновать наиболее эффективный способ распыления воды в межсеточном пространстве экрана и оптимальную конструкцию форсунки с экспериментальным определением ее характеристик, направленных на обеспечение равномерного заполнения межсеточного пространства экрана каплями распыляемой воды;
- экспериментально определить оптимальные параметры теплозащитных экранов (материал сеток, диаметр проволоки, размеры ячеек, межсеточное расстояние, расход воды на 1 м² экрана), обеспечивающих максимальную степень ослабления тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ, а также огнестойкость противопожарной преграды, выполненной на основе применения теплозащитных сетчатых экранов;

– разработать модельный ряд противопожарных преград и теплозащитных экранов для защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ.

Объектом исследования являлся процесс ослабления плотности теплового потока пожара пролива ГЖ и СПГ, определяющий эффективность противопожарных преград и теплозащитных сетчатых экранов.

В качестве **предмета исследования** рассматривались различные модели противопожарных преград и теплозащитных сетчатых экранов, конструктивную основу которых составляли металлический каркас, сетчатые панели и специальные форсунки, распыляющие воду между панелями.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен альтернативный способ защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ путем разработки противопожарных преград на основе теплозащитных сетчатых экранов, действие которых базируется на многократном ослаблении плотности теплового излучения пламени.

2. В результате теоретических исследований механизма теплопереноса, протекающего при взаимодействии потока энергии, излучаемого пожаром, с теплозащитным сетчатым экраном, а также численных оценок коэффициентов поглощения тепловых потоков в режимах «сухой» и «мокрой» сеток экрана установлено, что коэффициент ослабления плотности теплового потока пожара теплозащитным экраном в режиме «мокрой» сетки достигает 80 раз.

3. Обосновано применение гидравлического способа для распыления воды в межсеточном пространстве теплозащитного экрана, как наиболее экономичного и имеющего максимальный КПД распыления. При этом показано, что оптимальным распыливающим устройством будет являться форсунка-симбиоз конструктивных схем щелевой, струйной и ударно-струйной форсунок. Численно и экспериментально определены характеристики форсунки, обеспечивающие равномерное заполнение межсеточного пространства экрана каплями распыляемой воды.

4. Экспериментально определены оптимальные параметры (материал сеток, диаметр проволоки, размеры ячеек, межсеточное расстояние, расход воды на 1 м² экрана) и характеристики (значения величин снижения тепловых потоков) теплозащитных экранов, обеспечивающие максимальную степень ослабления тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ, а также установлено, что предел огнестойкости противопожарной преграды, выполненной на основе применения теплозащитных сетчатых экранов, составляет не менее *EIW* 150, при этом класс конструктивной пожарной опасности такой конструкции – К0.

5. Разработан модельный ряд противопожарных преград и теплозащитных экранов для защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в использовании полученных при ее выполнении результатов теоретических и экспериментальных исследований при разработке противопожарных преград на основе теплозащитных сетчатых экранов и их применении на различных объектах НГК и в оперативных подразделениях Государственной противопожарной службы МЧС России. В частности, разработаны и широко применяются на практике:

- противопожарные преграды «Согда» для защиты пожароопасных объектов;
- противопожарные устройства для рассеивания газового облака, образующегося при утечке СПГ из наземной емкости хранения;
- теплозащитные экраны для защиты личного состава пожарной охраны моделей «Согда» 1А.01, «Согда» 1В и «Согда» 2А;
- теплозащитные экраны для защиты оборудования, зданий и эвакуации людей модели «Согда» 3;
- теплозащитные экраны для защиты людей при проведении работ по ликвидации аварий на газовых и нефтяных фонтанах модели «Согда» 4.

Методология и методы исследования. Основу теоретических исследований составляли методы теории теплообмена, оптической теории излучения, теории вероятностей и математической статистики, выявления закономерностей,

описания, обобщения. Результаты численных расчетов подтверждены результатами экспериментальных исследований с использованием современных поверенных приборов и оборудования.

Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные литературные, правовые и нормативные источники, материалы расследований аварий и пожаров с участием ГЖ и СПГ на объектах НГК, а также научно-исследовательских работ в области разработки противопожарных преград.

Положения, выносимые на защиту:

– противопожарные преграды на основе теплозащитных сетчатых экранов как альтернативный способ защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ;

– результаты теоретических исследований механизма теплопереноса, протекающего при взаимодействии потока энергии, излучаемого пожаром, с теплозащитным сетчатым экраном, а также численных расчетов коэффициентов поглощения тепловых потоков в режимах «сухой» и «мокрой» сеток экрана;

– результаты численного и экспериментального определения характеристик форсунки, обеспечивающих равномерное заполнение межсеточного пространства экрана каплями распыляемой воды;

– результаты экспериментального определения оптимальных параметров теплозащитных экранов, обеспечивающих максимальную степень ослабления тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ, а также огнестойкости противопожарной преграды, выполненной на основе применения теплозащитных сетчатых экранов;

– модельный ряд противопожарных преград и теплозащитных экранов для защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ.

Степень достоверности полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается: обоснованностью выбора параметров и критериев, позволяющих сравнивать теоретические и экспериментальные данные; соответствием методик проведения экспериментальных исследований

реальным условиям эксплуатации противопожарных преград и теплозащитных экранов на пожаре; использованием аттестованной измерительной аппаратуры, апробированных методик измерения и обработки экспериментальных данных; внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с данными других исследователей.

Материалы диссертации реализованы при:

- разработке нормативного документа по пожарной безопасности «Рекомендации по применению теплозащитных экранов». М.: ВНИИПО, 2012 г.;
- разработке нормативного документа по пожарной безопасности «Рекомендации по пожаробезопасному применению малотоннажных установок хранения и распределения сжиженного природного газа». М.: ВНИИПО, 2014 г.;
- разработке свода правил СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности». М.: ВНИИПО, 2014 г.;
- разработке свода правил СП 231.1311500.2015 «Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности». М.: ВНИИПО, 2015 г.;
- практическом применении теплозащитных экранов для защиты персонала и оборудования объектов добычи, подготовки и транспорта газа на объектах ОАО «Газпром», 2015 г.;
- разработке и внедрении новых методов тушения нефтепродуктов в резервуарах и крупных площадных пожаров. Дзержинский: ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз», 2017 г.

Основные результаты работы доложены на:

- Международной научно-практической конференции «Организационные и научно-технические проблемы обеспечения пожарной безопасности» (г. Ташкент, ВТШПБ МВД РУз., 2008);
- Научно-практической конференции «Ориентированные фундаментальные исследования – от современной науки к технике будущего» в рамках 10-ой юбилейной специализированной выставки «Изделия и технологии двойного назначения. Диверсификация ОПК» (М.: Эксподизайн-Холдинг, 2009);

– XXIX Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России «Горение и проблемы тушения пожаров» (М.: ВНИИПО, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 149 страницах текста, включает в себя 5 таблиц, 58 рисунков, список литературы из 114 наименований.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ОПАСНЫХ ИНЦИДЕНТОВ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА, ТРЕБОВАНИЙ НОРМ К ПРОТИВОПОЖАРНЫМ ПРЕГРАДАМ И СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРЕГРАД

1.1 Анализ статистических данных об опасных инцидентах на объектах нефтегазового комплекса

Представленный ниже анализ данных об опасных инцидентах, произошедших на объектах НГК за период с 1998 по 2016 гг., выполнен на основе обработки ежегодной статистической информации об обстановке с пожарами в Российской Федерации, публикуемой ВНИИПО МЧС России, материалов, содержащихся в годовых отчетах и докладах о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), а также аналитических обзоров статистики по опасным инцидентам на объектах НГК [8–27].

Так, по сводным статистическим данным [12–24], за период с 2006 по 2016 гг., на объектах нефтегазодобычи (нефтедобыча, газодобыча, геологоразведка), предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, объектах нефтепродуктообеспечения, не связанных с объемом производства (нефтебазы, склады горюче-смазочных материалов), произошло 360 аварийных ситуаций, при которых погибли 288 человек (рисунки 1.1–1.2). В том числе на объектах нефтегазодобычи произошло 167 аварий (46,4 % от общего числа за рассматриваемый период), на нефтеперерабатывающих предприятиях – 98 аварий (27,2 %), на нефтехимических предприятиях – 40 аварий (11,1 %), на объектах нефтепродуктообеспечения – 55 аварий (15,3 %), то есть в среднем 33 пожара каждый год. При этом опасные ситуации в 80 случаях сопровождались взрывом, в 72 случаях был пожар и в 41 случае наблюдался выброс опасных веществ (рисунок 1.3).

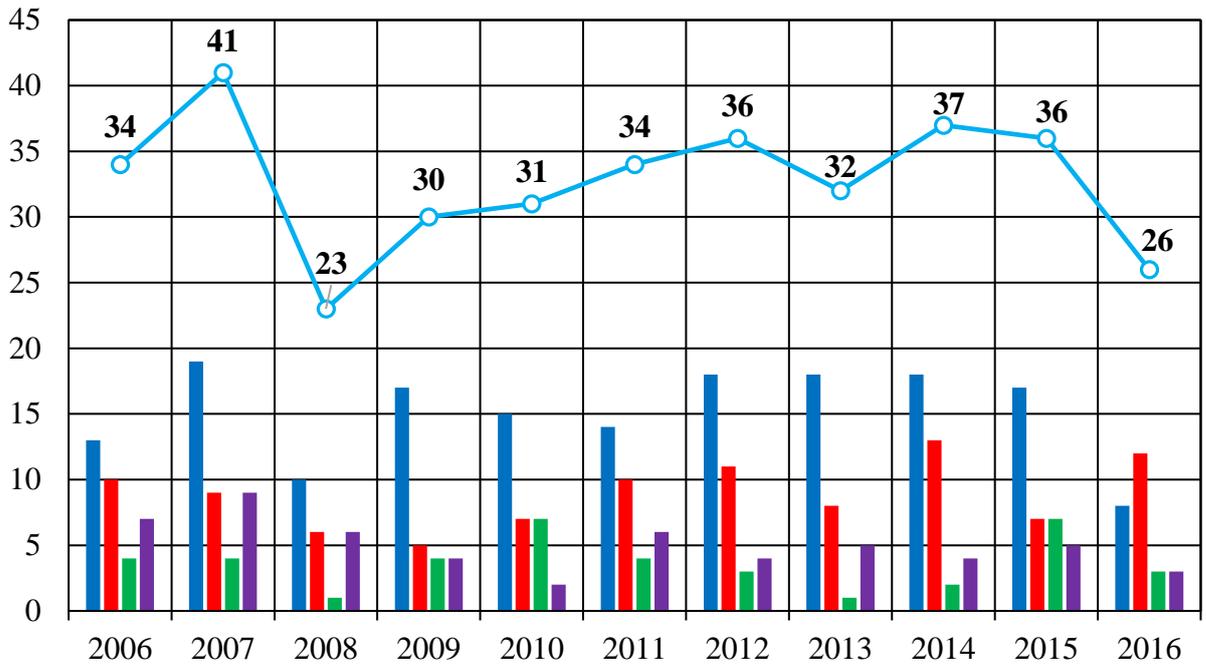


Рисунок 1.1 – Динамика аварий на объектах НГК за 2006–2016 гг.

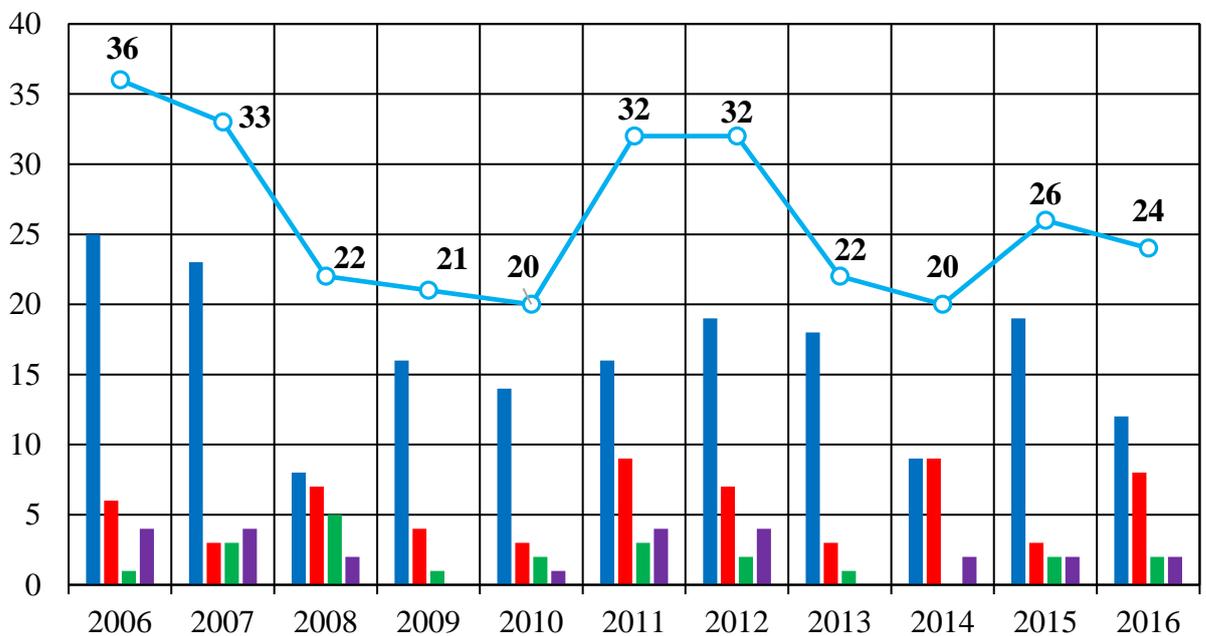
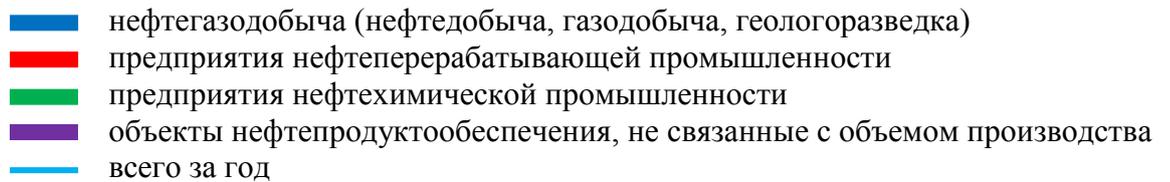
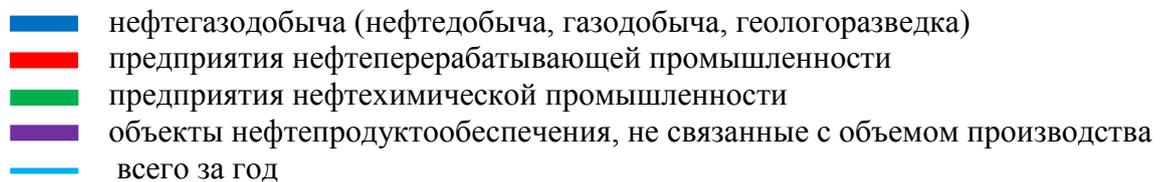


Рисунок 1.2 – Распределение числа погибших на объектах НГК



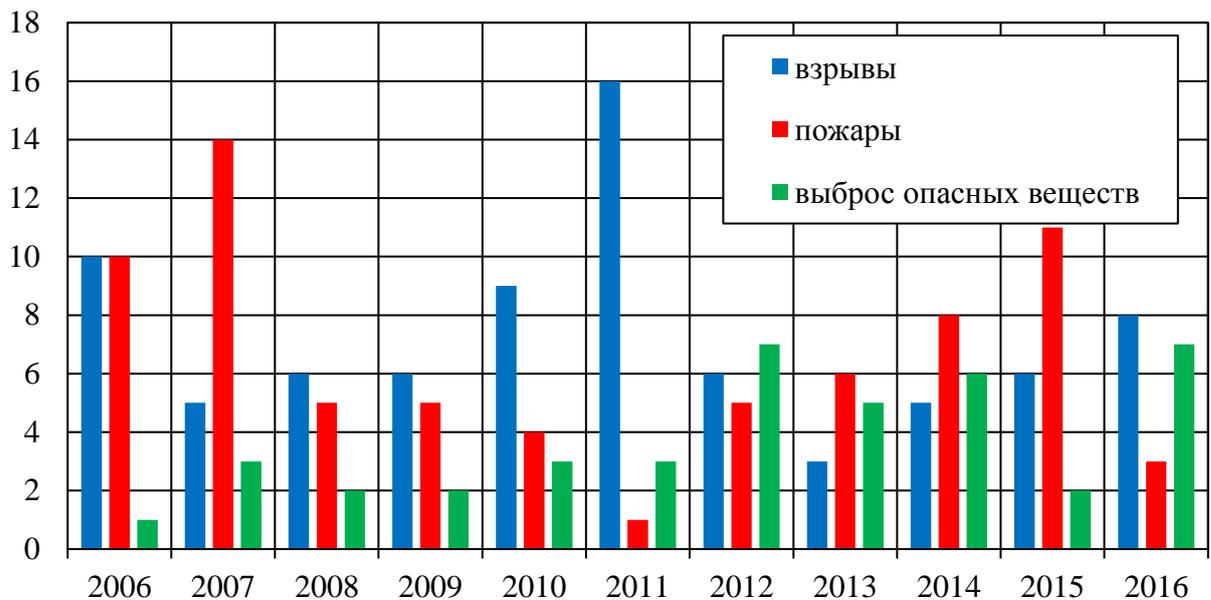


Рисунок 1.3 – Распределение инцидентов на объектах нефтепродуктообеспечения, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств

Важно отметить, что на производственных установках и сооружениях пожары возникали чаще всего из-за неисправности производственного оборудования.

Из публикации [11] следует, что на объектах нефтяной промышленности за период с 1998 по 2007 гг. произошло 242 аварии, при которых погибли 30 человек (рисунок 1.4). Более половины всех аварий (54,2 %) произошло на нефтепроводах, 15,7 % – на наружных технологических установках, 14,5 % – на резервуарах. При этом непосредственно возникновение пожаров зафиксировано в 62 случаях (25,6 %), а в 28 случаях (11,6 %) наблюдались взрывы топливно-воздушных смесей с последующим возгоранием углеводородов. В этой же работе отмечается, что в газовой промышленности за этот же временной период произошла 421 авария, в результате которых погибли 30 человек (рисунок 1.5). При этом 224 случая (53,2 %) возникновения аварий сопровождались возгораниями, при которых констатирована гибель 23 человек. Таким образом, можно отметить, что за анализируемый период времени на объектах нефтегазовой промышленности произошло 663 аварии, что составляет примерно 1 аварию в неделю, при этом половина аварий сопровождались пожарами и/или взрывами.

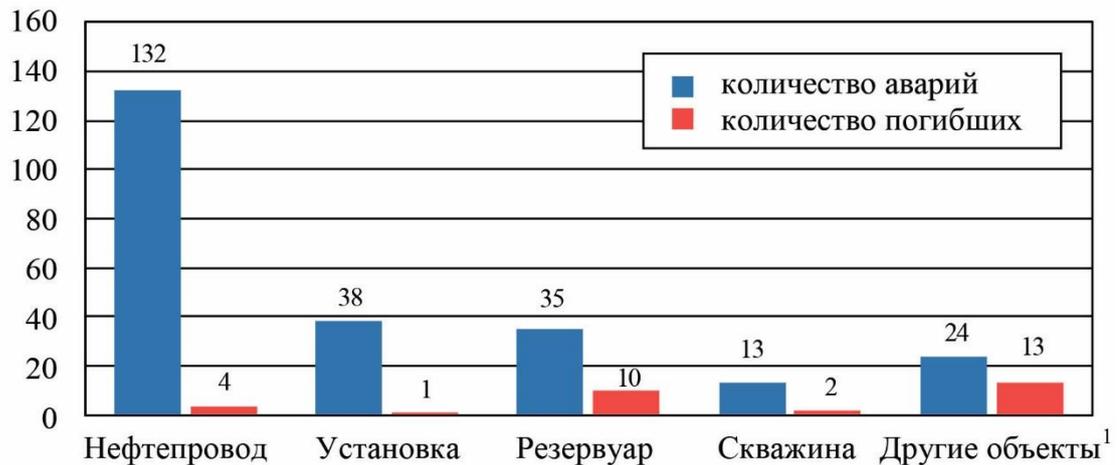


Рисунок 1.4 – Распределение аварий по объектам нефтяной промышленности, произошедших за период с 1998 по 2007 гг.

(¹ сливноналивные эстакады, насосные и компрессорные станции, производственные здания, промысловые сборные пункты)

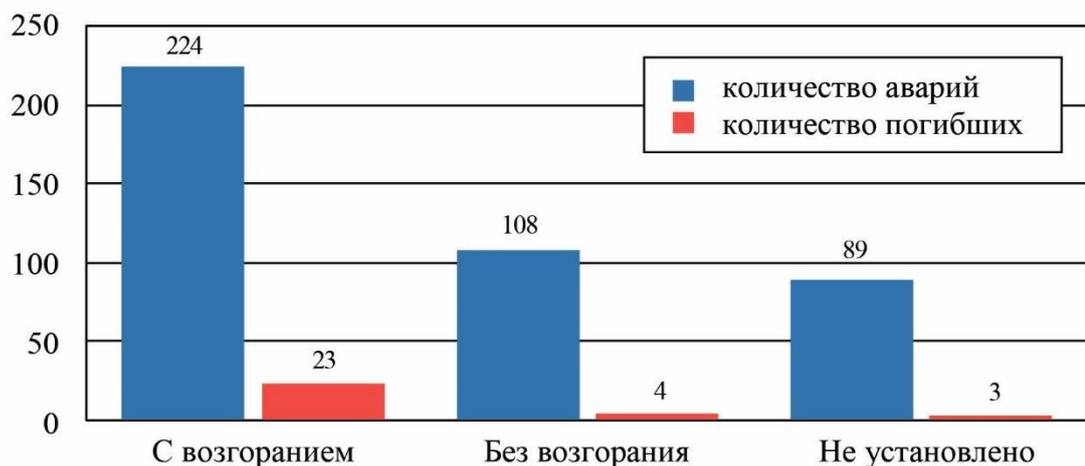


Рисунок 1.5 – Анализ последствий аварий в газовой промышленности, произошедших за период с 1998 по 2007 гг.

В работах [8–10] представлен аналитический обзор статистики опасных событий, произошедших на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности за период с 2006 по 2016 гг. Анализ приведенных данных показал, что за рассматриваемый период произошло 193 опасных события, при этом, 80 аварийных ситуаций сопровождались взрывом, в 72 случаях наблюдался пожар и в 41 случае – выброс опасных веществ. При этих событиях погибло 109 человек. Общий материальный ущерб от последствий аварий только за 2016 г. превысил 14,8 млрд. руб.

В целом, анализ статистических данных о пожарах, взрывах и авариях на объектах НГК показал, что такие опасные ситуации в большинстве случаев происходили из-за утечек горючих жидкостей или углеводородных газов из технологического оборудования по различным причинам, в частности, из-за износа оборудования, в том числе, коррозионного, применения недостаточно качественных сальниковых уплотнений и фланцевых соединений, дефектов сварочно-монтажных работ и др. В результате этих событий происходило образование парогазового облака с его дальнейшим воспламенением (взрывом) или пролив горючей жидкости с последующим возгоранием ее паров, а также токсическое заражение как промышленной, так и прилегающей к ней территорий. При этом большинство возникающих на этих объектах пожаров сопровождалось высокой интенсивностью тепловых потоков, воздействие которых приводило к уничтожению зданий, сооружений, технологического оборудования, разнообразной техники, затрудняло работу и обеспечение безопасности как персонала объекта, так и личного состава пожарных подразделений и аварийно-спасательных формирований.

Таким образом, одной из важнейших задач в системе противопожарной защиты объектов НГК является обеспечение их надежными противопожарными преградами, существенно снижающими плотность тепловых потоков. При этом важно отметить, что несмотря на существующее многообразие типов противопожарных преград, эффективно снижать тепловые потоки пожаров способны из них далеко не все. Поэтому специалистами постоянно ведутся разработки новых типов противопожарных преград, защищающих объекты и персонал от пожаров и взрывов, а также поиски новых методов, способов и средств, позволяющих существенно снизить риски всех вышеперечисленных деструктивных событий.

1.2 Основные нормативные требования, предъявляемые к противопожарным преградам

В соответствии с установленными в [28, 29] основными понятиями под противопожарной преградой понимается строительная конструкция с нормированными

пределом огнестойкости и классом конструктивной пожарной опасности конструкции, объемный элемент здания или иное инженерное решение, предназначенные для предотвращения распространения пожара из одной части здания, сооружения в другую или между зданиями, сооружениями, зелеными насаждениями.

Противопожарные преграды в зависимости от способа предотвращения распространения опасных факторов пожара (ОФП) подразделяются на следующие типы [28]:

- противопожарные стены;
- противопожарные перегородки;
- противопожарные перекрытия;
- противопожарные разрывы;
- противопожарные занавесы, шторы и экраны;
- противопожарные водяные завесы;
- противопожарные минерализованные полосы.

Противопожарные стены, перегородки и перекрытия, заполнения проемов в противопожарных преградах (противопожарные двери, ворота, люки, клапаны, окна, шторы, занавесы) в зависимости от пределов огнестойкости их ограждающей части, а также тамбур-шлюзы, предусмотренные в проемах противопожарных преград в зависимости от типов элементов тамбур-шлюзов, подразделяются на следующие типы [28]:

- стены (1-й или 2-й тип);
- перегородки (1-й или 2-й тип);
- перекрытия (1, 2, 3 или 4-й тип);
- двери, ворота, люки, клапаны, экраны, шторы (1, 2 или 3-й тип);
- окна (1, 2 или 3-й тип);
- занавесы (1-й тип);
- тамбур-шлюзы (1-й или 2-й тип).

Отнесение противопожарных преград к тому или иному типу в зависимости от пределов огнестойкости элементов противопожарных преград и типов заполнения проемов в них осуществляется в соответствии с требованиями [28].

В соответствии с [28, 30] противопожарные преграды классифицируются по способу предотвращения распространения ОФП и характеризуются огнестойкостью и пожарной опасностью. Огнестойкость противопожарной преграды определяется огнестойкостью ее элементов: ограждающей части; конструкций, обеспечивающих устойчивость преграды; конструкций, на которые она опирается; узлов крепления и сочленения конструкций между собой.

Пределы огнестойкости определяются в условиях стандартных испытаний или в результате расчетов и устанавливаются по времени достижения одного или последовательно нескольких из следующих признаков предельных состояний: потеря несущей способности (R); потеря целостности (E); потеря теплоизолирующей способности вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции до предельных значений (I) или достижения предельной величины плотности теплового потока на нормируемом расстоянии от необогреваемой поверхности конструкции (W).

Предел огнестойкости в противопожарных преградах наступает при потере целостности (E), теплоизолирующей способности (I), достижении предельной величины плотности теплового потока (W) и/или дымогазонепроницаемости (S).

Пределы огнестойкости конструкций, обеспечивающих устойчивость преграды, конструкций, на которые она опирается, и узлов крепления и сочленения конструкций между собой по признаку R , должны быть не менее требуемого предела огнестойкости ограждающей части противопожарной преграды.

Противопожарные преграды выполняют многоцелевое назначение, что обуславливает их эффективность и экономическую целесообразность. Например, противопожарные стены, перегородки и перекрытия в нормальных условиях эксплуатации зданий со взрыво- и пожаровзрывоопасными процессами исключают перетекание взрывоопасных смесей из одного помещения в другое, выполняя при этом технологические, санитарные и противопожарные функции. При возникновении пожара противопожарные преграды ограничивают возможную площадь горения, обеспечивая этим условия для успешного тушения пожара и уменьшения ущерба от него.

1.3 Анализ существующих конструкций противопожарных и теплозащитных преград

Наиболее полно перечень различных видов ограждающих конструкций, в том числе и преград, и применяемых материалов для их создания, а также рекомендации по их возможному применению в целях повышения пожаробезопасности объектов, безопасности и эффективности работ по локализации и тушению пожаров, представлен в монографии М.Я. Ройтмана [31]. В работе отмечается, что теплозащитная преграда представляет собой устройство, предназначенное для отражения и/или поглощения лучистой энергии. Лучистая энергия способствует усилению взаимного теплообмена и распространению пожара. Наличие экранов способствует ослаблению влияния теплообмена и ограничению распространения пожара, также преграды могут быть использованы как средство, предупреждающее возникновение пожара. Применяются преграды без теплового сопротивления, отражающие только лучистую энергию, и теплоотводящие преграды, которые поглощают тепло или охлаждают нагретые поверхности водяной завесой. Теплозащитные преграды-завесы относят к поглотительным экранам, так как их эффективность оценивают количеством поглощенной теплоты. Различают прозрачные завесы, полупрозрачные и практически непрозрачные (аэродисперсные). Водяные завесы, создаваемые спринклерными или дренчерными головками, являются прозрачными, так как поглощают лишь 20 % энергии, расходуемой на нагревание и испарение воды, и пропускают незначительно уменьшенный лучистый поток (до 80 %). Эффективность таких завес достигается при их сочетании с жесткими экранами или при значительных расходах воды и большой толщине экрана. Однако, исходя из того, что суммарный расход воды, требуемый на создание завесы, достигает больших значений, применение указанного способа в составе других установок автоматического пожаротушения может создать проблему бесперебойной подачи воды при действующей водопроводной системе на объекте [32]. Поэтому в качестве самостоятельных противопожарных преград они не могут быть рекомендованы.

Водяные завесы устраивают для того, чтобы исключить возможность перехода огня, например, по сгораемым веществам или через расположенные под противопожарной зоной материалы и оборудование путем смачивания, а также с целью охлаждения жестких преград. В частности, известен способ создания противопожарной полупрозрачной цепной завесы (сетчатой) из проволоки, охлаждаемой водой [32]. Защитное действие такой завесы из металлической проволоки заключается в том, что сетка локализует конвективные потоки, а, следовательно, и передачу тепла конвекцией.

Непрозрачные (аэродисперсные) водяные завесы могут быть получены при достижении определенной дисперсности водяной струи. Они снижают на 90 % лучистый поток. Эффективность таких завес зависит от степени дисперсности воды, ее расхода и толщины завесы [33]. Основные параметры такой завесы применительно к защите рабочих от теплового излучения в металлургической промышленности установлены опытным путем, а также могут быть определены расчетом. При этом отмечается, что при крупности частиц от 5 до 20 мкм толщину завесы принимают не менее 0,82 м [34–36].

Необходимость и полезность экранов постоянно стимулировала поиск новых решений данной проблемы. Так, в работах [37–39] предлагаются для использования различные виды теплозащитных экранов простейших конструкций. В первом случае предлагается конструкция, состоящая из модульных панелей, образованных из огнестойкого волокнистого материала с закрепленными на фронтальной поверхности алюминиевыми пластинами. Второе изобретение предлагает в качестве средства для предотвращения распространения лесного пожара использовать металлическое сеточное полотно, закрепляемое к вертикальным стойкам, вбитым в землю. В третьем патенте предлагается в качестве теплозащитного ограждения для личного состава пожарной охраны при тушении газо-нефтяных фонтанов использовать вертикально установленные металлические экраны, составленные из двух параллельных профилированных металлических пластин, закрепленных между собой таким образом, что между ними образуется воздушная прослойка.

Однако все эти и подобные им не охлаждаемые конструкции выполняют функцию лишь простой преграды тепловому потоку. При высоких значениях тепловых потоков эти преграды, нагреваясь, становятся источником вторичного теплового излучения или подвергаются термическому разрушению.

Большая группа работ [40–47] была посвящена разработкам комбинированных экранов в виде огнезащитных перегородок, дверей или завес. Большинство из предлагаемых экранов образованы не менее чем из двух эластичных полотнищ, между которыми подаются специальные реагенты: охлаждающая жидкость, воздушно-механическая или химическая пена, сыпучие или гелеобразные теплопоглотители. В качестве материала этих полотнищ предлагается использовать различные виды металлических сеток, текстильных гигроскопических материалов. Преимуществом подобных преград является высокая степень ослабления тепловых потоков и относительно быстрая возможность установить их при пожаре и убрать после его ликвидации (свернуть полотнища в рулон, выдвинуть или опустить завесы). Недостатками всех этих изобретений является то, что конструкции, реализующие их, требуют сложную и дорогую технику, а также экологически небезопасные и дорогие реагенты, обеспечивающие их работоспособность. Кроме этого, такие преграды непрозрачны, громоздки и имеют ограниченную сферу применения (только внутри помещений, сооружений).

В работах [48–50] рассматриваются устройства с возможностью проявления синергически интенсивного процесса непрерывного физического эффекта испарительного охлаждения. Так, в [48] предлагается использование в противопожарных целях металлических конструкций, включающих металлическую сетку, металлическую вату или металлические переплетения, сквозь которые могут легко проходить газы. Эти конструкции могут быть в форме пожарогасящих покрытий, включающих комбинацию простых и имеющих определенную форму сеток, чередующихся в этом покрытии. При этом верхняя сторона покрытия предпочтительно должна быть закрыта металлической фольгой для быстрого гашения пожаров от воспламенения пролитых жидкостей. На эти сетки или на конструкции в форме жестких панелей может распыляться вода.

Подобные металлические конструкции могут быть использованы для пассивной противопожарной защиты в виде противопожарных переборок, противопожарных крышек топливных баков и противостоящих огню оболочек пассажирского салона, посадочных мест для пассажиров и кабины экипажа в самолете, транспортных средствах, на судах и подводных лодках.

В работах [49, 50] теплоогнезащитный экран предлагается выполнить с теплостойкими слоями из иглопробивного материала на основе кремнеземных или базальтовых волокон диаметром от 2 до 15 мкм или их комбинации. Плотность теплостойких слоев распределена с увеличением в направлении поверхности огневого воздействия от 70 до 700 г/м², а также с наружными огнестойкими слоями из ткани на основе кремнеземных или базальтовых волокон диаметром от 5 до 15 мкм или их комбинации, поверхностной плотностью от 120 до 700 г/м², с сеткой размерами ячеек от 5×5 до 25×25 мм из стальной проволоки диаметром от 0,1 до 1,0 мм под наружным огнестойким слоем со стороны огневого воздействия. Экран имеет трубчатый каркас с сообщающимися каналами и форсунками для подачи воды на поверхность огневого воздействия экрана. Следует отметить, что такие преграды при длительной эксплуатации могут впитывать в себя пары нефтепродуктов или пыль, что может резко ухудшить их эксплуатационные качества.

Исследование действия теплового излучения на пожарные машины и повышения их теплоустойчивости рассматривалось в работах [51–62]. Актуальность данных исследований обусловлена тем, что выход из строя пожарной техники при тушении пожара может привести к непоправимым последствиям. Преобладающим из всех ОФП, который приводит к повреждениям пожарной техники, является лучистый тепловой поток. Нагрев элементов пожарной техники до аномальных температур при плотностях теплового потока около 10 кВт/м² происходит быстрее времени боевой работы, а уже при значении 14 кВт/м² – загорается пожарный автомобиль. Значения же тепловых потоков, например, при горении крупных газонефтяных фонтанов, могут достигать более 40 кВт/м².

Высокие значения тепловых потоков наблюдаются также при горении леса и пожарах на лесоскладах. На основании анализа описаний пожаров на лесоскладах [63–65] установлено, что в технологических разрывах между штабелями (10 м) поверхностная плотность лучистого теплового потока может достигать 20–25 кВт/м² уже в начальной стадии пожара (на 3–5 мин.), а при развившемся пожаре (на 10–30 мин.) – значительно больших величин. По этой причине практически невозможно вводить пожарную технику в нормативно установленные разрывы между штабелями леса, чтобы локализовать пожар в границах противопожарных разрывов между кварталами лесоскладов (50–100 м), что приводит к значительным убыткам. Важно также отметить, что при тепловых испытаниях пожарного танка ПЛВ 6-17, предполагаемого к применению для тушения пожаров в зоне действия теплового облучения 20–25 кВт/м² [65], было установлено следующее:

- нагрев элементов конструкции кабины в течение 5 мин. достигает значений в диапазоне от 100 до 420 °С;
- внутренние поверхности нагреваются в течение 3–6 мин. до температуры в диапазоне от 90 до 240 °С;
- температура воздуха в кабине на уровне головы водителя превышает предельно допустимые значения в 45 °С на 50–100 %;
- поверхностная плотность лучистого теплового потока, проникающего в кабину достигает 10–12 кВт/м², что значительно превышает предельно переносимые значения для организма человека без специальных средств защиты.

В этой же работе отмечается, что ствольщик в теплоотражательном костюме управляющий лафетным стволом с поверхности цистерны танка вынужден покинуть рабочее место уже через 3–4 мин., так как плотность теплового облучения более чем в четыре раза превышает допустимые значения (6 кВт/м²).

Современные конструкции пожарных автомобилей имеют устройства теплозащиты в соответствии с классификацией, предложенной Ю.В. Полежаевым [66], предусматривающей сочетание как пассивной (теплоотражательное покрытие), так и активной теплозащиты, в которой вода, используемая для тушения пожара, служит охладителем.

Эффективность активной теплозащиты с помощью стекающих по обшивке пожарного автомобиля водяных пленок рассмотрена в работе [67]. Однако этот способ не позволяет защитить элементы конструкции автомобиля, которые имеют сложную геометрическую конфигурацию.

В работах [65, 68–70] изучена и апробирована возможность использования мелкодисперсных водяных капельных завес для обеспечения тепловой защиты боевых расчетов пожарных танков и автомобилей от воздействия теплового излучения пожаров на лесоскладах и других объектах, где возможна высокая интенсивность теплового излучения. В работе [65] показано, что при тушении пожаров на лесоскладах до 62 % тепла, воздействующего на пожарный танк, приходится на электромагнитное излучение пожара. Энергетический спектр электромагнитного излучения лесоматериалов с температурой пламени порядка 1000 °С смещен в значительной степени в сторону инфракрасного излучения (ИК), так что видимая часть спектра составляет лишь доли процента от полной энергии излучения. Последнее обстоятельство позволило автору этой работы в результате теоретических расчетов, основываясь на теории поглощения и рассеяния электромагнитных волн малыми частицами [33, 71] и экспериментальных исследований по оптимизации расхода и диаметра капель распыляемой воды, разработать и практически реализовать устройства по созданию водо-капельной завесы, ослабляющей тепловую радиацию в 3–5 раз. В частности, отмечается, что капли, попадая на поверхность ограждения пожарной техники и стекая по ней, значительно охлаждают сложные конфигурации конструкций пожарных машин, защищают соседние штабели леса от лучистого теплового потока, дотушивают горящие головни и увлажняют почву между штабелями лесоматериалов.

В работе [61] предложено устройство, создающее водяной занавес по всей высоте и ширине горизонтальной шахты для остановки распространения пламени и дыма за пределы водяного занавеса. Однако, данная разработка (простое разбрызгивание воды с помощью форсунок) значительно уступает устройствам, представленным в работах [68–70], по характеристикам водяного занавеса, а также отличается высоким требуемым расходом воды и дорогостоящим исполнением.

В изобретении [72] предлагается создание экрана для двух операторов ручных пожарных стволов. Теплозащитная преграда представляет собой сборно-разборный трубчатый каркас с периодически расположенными по длине трубок отверстиями, через которые разбрызгивается подаваемая под давлением вода. Основными недостатками данной конструкции являются низкая степень ослабления тепловой радиации (не более чем в 1,5–2,0 раза), большой расход воды, значительный вес конструкции, неудобство передислокации, которые сильно ограничивают тактические возможности пожарного звена.

Заслуживает также внимания композиционный способ, основанный на сочетании слоев из пористо-волокнистых материалов со слоями, содержащими разлагающуюся при нагревании кристаллическую воду [73–75]. Сухой теплоизоляционный материал за счет низкой теплопроводности позволяет постепенно снизить температуру от окружающей среды при пожаре до некоторой величины. При этом в содержащем воду слое поддерживается постоянная температура в 100 °С. Данное техническое решение позволяет продлить эффект стабилизации температуры и, следовательно, повысить предел огнестойкости, либо снизить массу конструкции. Однако, применительно к конструкции рабочего полотна противопожарной шторы, повышение предела огнестойкости оказывается незначительным. Это связано с ограниченным количеством воды в соответствующем слое, который, вследствие относительно высокой плотности, подходящих для его формирования материалов и необходимости сохранения толщины и массы конструкции на приемлемом уровне, может иметь только достаточно малую толщину. Упомянутые материалы, как правило, представляют собой плиты и покрытия на основе минеральных вяжущих, и характеризуются, соответственно, существенной жесткостью и хрупкостью. Это затрудняет их применение в конструкции рабочего полотна, которая должна обладать достаточной гибкостью.

Для повышения эффективности рабочего полотна, применяющегося в конструкциях противопожарных штор и укрытий, в работах [76–80] предлагается способ обеспечения его огнестойкости, сочетающий в себе активный и пассивный способы, совмещение которых, должно усиливать действия каждого из них.

Этот способ заключается в создании в пористой структуре рабочего полотна паро-капельно-воздушной среды из охлаждающей жидкости, в результате чего должен проявляться непрерывный физический эффект испарительного охлаждения. Принцип функционирования рабочего полотна основан на блокировании радиационно-конвективного теплового потока от пламени на основе рационального сочетания физических эффектов: отражения и поглощения теплового излучения, испарительного охлаждения, а также теплоизолирующего эффекта рабочего полотна и воздушной прослойки между ним и расположенным за ним объектом. По принципу действия предлагаемый способ является комбинированным, поскольку в нем совмещены принципы активного и пассивного способов. Реализующее комбинированный способ обеспечения огнестойкости рабочее полотно предполагается изготавливать из волокнистых термостойких материалов по швейной технологии в виде слоистой конструкции. Для изготовления наружных слоев предлагается применять кремнеземную ткань. Внутренний капиллярно-пористый слой будет выполняться из нетканых рулонных материалов на основе базальтовых или кремнеземных волокон. Для упрочнения рабочего полотна, с целью предотвращения его преждевременного разрушения от воздействия механических нагрузок, в конструкцию может вводиться легкая стальная сетка или кварцевая ткань. Данные материалы могут применяться как в качестве наружных слоев, так и устанавливаться дополнительно в структуре внутреннего слоя. Предлагаемое рабочее полотно должно эффективно функционировать в условиях непрерывной (на протяжении всего времени огневого воздействия) подачи охлаждающей жидкости с помощью системы, встроенной в конструкцию противопожарной преграды. Из приведенного описания видно, что реализация комбинированного способа обеспечения огнестойкости представляется весьма сложной и потребует решения целого круга технических и технологических проблем и существенных материальных затрат.

Проведенный анализ показал, что существующие противопожарные преграды имеют ряд существенных недостатков, в частности, ограниченный предел огнестойкости, требование большого расхода воды, сложность конструкции,

неприемлемо высокая стоимость и др. При этом важно отметить, что простая модернизация любого из рассмотренных способов и средств обеспечения теплозащиты не позволяет существенно повысить их эффективность, что требует поиска новых технических решений.

В связи с изложенным, в настоящей работе, в качестве альтернативного способа защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров ГЖ и СПГ, к рассмотрению и разработке предлагаются противопожарные преграды на основе теплозащитных сетчатых экранов, принцип действия которых основан на многократном ослаблении плотности теплового излучения пламени.

1.4 Цель и задачи исследования

На основе рассмотренных в настоящей главе статистических материалов об опасных инцидентах, произошедших на объектах НГК, анализа требований нормативных правовых актов и нормативных документов по пожарной безопасности, предъявляемых к разработке противопожарных преград, а также критического анализа существующих конструкций теплозащитных преград, применяемых как в отечественной, так и в мировой практике, поставлена цель работы и сформулированы задачи исследования.

Целью работы являлась разработка высокоэффективных противопожарных преград на основе теплозащитных сетчатых экранов, принцип действия которых основан на многократном ослаблении плотности теплового излучения пламени пожаров проливов ГЖ и СПГ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– предложить альтернативный способ защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ на основе применения теплозащитных сетчатых экранов;

– выполнить теоретические исследования механизма теплопереноса, протекающего при взаимодействии потока энергии, излучаемого пожаром, с теплозащитным сетчатым экраном, а также численные оценки коэффициентов поглощения тепловых потоков в режимах «сухой» и «мокрой» сеток экрана;

– обосновать наиболее эффективный способ распыления воды в межсеточном пространстве экрана и оптимальную конструкцию форсунки с экспериментальным определением ее характеристик, направленных на обеспечение равномерного заполнения межсеточного пространства экрана каплями распыляемой воды;

– экспериментально определить оптимальные параметры теплозащитных экранов (материал сеток, диаметр проволоки, размеры ячеек, межсеточное расстояние, расход воды на 1 м² экрана), обеспечивающих максимальную степень ослабления тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ, а также огнестойкость противопожарной преграды, выполненной на основе применения теплозащитных сетчатых экранов;

– разработать модельный ряд противопожарных преград и теплозащитных экранов для защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ПРЕГРАД НА ОСНОВЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СЕТЧАТЫХ ЭКРАНОВ

2.1 Оценка коэффициента ослабления лучистого теплового потока теплозащитным экраном без водяного орошения

В общем виде конструкция предлагаемого в настоящей работе теплозащитного экрана представляет собой две сетки (I и II) из нержавеющей стали, высота которых равна l (рисунок 2.1). Сетки располагаются на расстоянии h друг от друга в диапазоне изменения межсеточного расстояния от 0,1 до 0,2 м. В пространство между сетчатыми панелями экрана подается вода, распыляемая через форсунку (III), генерируя воздушно-капельную среду со скоростью V . На сетку I падает тепловой поток с плотностью P_0 (Вт/м²).

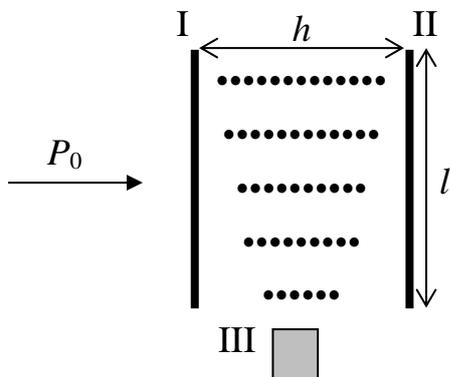


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение
теплозащитного экрана

Оптические явления и процессы тепло- и массопереноса в такой неоднородной системе носят существенно нелинейный характер и зависят от большого числа параметров. Следует отметить, что энергия горения передается в окружающую среду в основном посредством излучения пламенем пожара электромагнитных волн [81, 82]. При этом, в связи с тем, что температуры горения веществ и материалов не превышают, как правило, 1100–1800 °С [6, 83–87], в соответствии с оптической теорией излучения [88, 89] подавляющая часть теплового потока пожара приходится на инфракрасную область электромагнитных волн (ИК-спектр), длины волн которых значительно больше длин волн видимого спектра.

В зависимости от величины потока тепла и расхода воды в системе реализуются различные режимы теплозащиты. Различие в этих режимах связано, прежде всего, с условиями подвода тепла, подвода охлаждающего реагента (в данном случае воздушно-капельной смеси) и теплообмена на первой сетке. Если скорость подачи воды на поверхность сетки меньше скорости ее испарения, то реализуется режим «сухой» сетки. В противном случае часть поступившей на сетку воды сливается по ней, образуя защитный водяной слой – режим «мокрой» сетки. Анализ условий поглощения и отвода тепла теплозащитным экраном для различных режимов приведен ниже.

Процессы поглощения и рассеяния излучения с плотностью P_0 препятствием в виде «сухой» металлической сетки зависят, прежде всего, от ее геометрических параметров, то есть от отношения площади металлических участков к общей площади сетки (шаг сетки – 680 мкм, просвет – 480 мкм, диаметр 200 мкм). Для использованных в данном случае сеток этот коэффициент равен $\alpha_0 = 0,5$.

Определим коэффициент пропускания такой сетки, который, исходя из геометрической оптики [90, 91], должен был бы быть равен 0,5. Однако необходимо учесть эффекты рассеяния на краях отверстий, которые связаны, прежде всего, с «парадоксом экстинкции», заключающимся в том, что объект, размеры которого превышают длину волны излучения, поглощает из падающего пучка в два раза больше энергии, чем это следует из геометрической оптики [92]. Иными словами, сечение поглощения такого объекта равно удвоенной площади ее геометрического сечения. Кроме этого, из оптической теории следует, что при уменьшении площади источника излучения в β раз его интенсивность падает по закону:

$$I \sim I_0 \exp(1 - \beta). \quad (2.1)$$

Таким образом, плотность потока излучения, прошедшего через сетку, составляет:

$$Q_1^L \approx \frac{P_0}{\alpha_S} \approx \frac{P_0}{8}, \quad (2.2)$$

где α_S – коэффициент ослабления лучистого теплового потока сеткой.

Процессы поглощения ИК-излучения металлическими участками сетки приводят к увеличению ее температуры T_S , которую с достаточной точностью для инженерных расчетов можно определить из уравнения:

$$m_S c_{pS} \frac{dT_S}{d\tau} = \left(\frac{\alpha_S - 1}{\alpha_S} \right) P_0 F_S - \varepsilon_S \sigma \left(\left(\frac{T_S}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right) F_{Sm}, \quad (2.3)$$

где m_S – масса сетки; c_{pS} – удельная теплоемкость материала сетки; ε_S – степень черноты материала сетки; T_1 – температура окружающей среды; F_{Sm} – площадь металлических участков сетки; F_S – площадь сетки; $\sigma = 5,6687 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Нагретая поверхность сетки представляет собой источник вторичного теплового излучения с плотностью:

$$Q_E = \varepsilon_S \sigma \left(\left(\frac{T_S}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right) \frac{F_{Sm}}{F_S}. \quad (2.4)$$

Таким образом, плотность потока излучения, прошедшего через сетку, можно определить по формуле:

$$Q_S^L = Q_1^L + Q_E. \quad (2.5)$$

Однако, как видно из уравнения (2.4), плотность потока вторичного излучения зависит как от температуры самой сетки и размеров ячеек сетки, так и от температуры окружающей среды, которые в свою очередь зависят от режимов теплообмена на отдельных элементах конструкции.

2.2 Режим «сухой» сетки

2.2.1 Теплообмен на первой сетке

Теплообмен наружной поверхности сетки зависит от ее местонахождения. Если теплозащитный экран находится в непосредственной близости к факелу пламени пожара, тогда теплообменом наружной поверхности сетки можно пренебречь, так как температура раскаленных частиц факела пламени выше температуры сетки.

Далее будем рассматривать именно такую ситуацию, когда теплозащитный экран находится в зоне пожара или в непосредственной близости от него, где температура окружающей среды выше, либо равна температуре внешней поверхности сетки. Для дальнейшего анализа разделим вклад лучистого и конвективного теплообмена между конструктивными элементами сетки.

Для определения количества тепла Q_{21} прошедшего через сетку I, орошаемую водяными каплями (без создания устойчивой водяной пленки на ее поверхности), и при пренебрежении частью лучистого теплового потока, излучаемого сеткой и поглощаемого парами воды, запишем уравнение теплового баланса в следующем виде:

$$Q_{21} = P_0 F_S + Q_E - (Q_K + Q_H + Q_{Hп} + Q_m), \quad (2.6)$$

где Q_m – тепловая мощность, затрачиваемая на нагрев металла сетки I; Q_K – тепловая мощность, затрачиваемая на кипение воды; Q_H – тепловая мощность, затрачиваемая на нагревание воды, находящейся изначально при температуре 20 °С; $Q_{Hп}$ – тепловая мощность, затрачиваемая на нагревание (перегрев) водяного пара до его текущей температуры.

При выходе температуры сетки на постоянное значение уравнение (2.6) с учетом выражения (2.5) преобразуется к виду:

$$Q_{21} = Q_S^L - (Q_K + Q_H + Q_{Hп}). \quad (2.7)$$

Перепишем уравнение (2.6) в виде:

$$Q_{21} = P_0 F_S + Q_E - G_{1S} (\Delta H_K + c_p (T_{100} - T_{20}) + c_{pп} (T_{п} - T_{100})) - m_S c_{pS} \frac{dT_S}{dt}, \quad (2.8)$$

где G_{1S} – массовый расход воды на сетку I; ΔH_K – удельная теплота кипения воды; c_p – удельная теплоемкость воды; $c_{pп}$ – удельная теплоемкость водяного пара; $T_{п}$ – текущая температура водяного пара.

При пренебрежении лучистым тепловым потоком, излучаемым сеткой и частично поглощаемым парами воды, изменение температуры сетки, орошаемой водой, найдем из условия, что теплота, переданная нагретой поверхностью сетки (Δq_S) воде в единицу времени (Δt) равна теплоте, затраченной на нагревание и кипение воды, а также перегрев пара (Δq_B) за этот же промежуток времени:

$$\Delta q_S = \Delta q_B$$

или

$$\Delta T_S = \frac{G_S \Delta t}{m_S c_{pS}} \left(\Delta H_K + c_p (T_{100} - T_{20}) + c_{pn} (T_n - T_{100}) \right), \quad (2.9)$$

где $\Delta T_S = T_S - T_0$ – изменение температуры сетки; $T_0 = 20$ °С – начальная температура сетки; m_S – масса сетки; c_{pS} – удельная теплоемкость материала сетки.

Таким образом, температура сетки I в каждый момент времени равна:

$$T_{S1} = T_S - \Delta T_S, \quad (2.10)$$

где T_S – определяется из уравнения (2.3).

2.2.2 Теплопоглощение паро-воздушно-капельной средой

Для анализа процессов лучистого и конвективного теплопереноса через слой паро-воздушно-капельной среды необходимо с достаточной степенью точности знать параметры распыления. Полученная с помощью распылителя струя жидкости характеризуется размером капель, распределением их скоростей, углом конусности струи, дальностью и расходом жидкости.

Проведенные эксперименты по определению диаметров капель и их относительных скоростей движения в потоке при распылении струи жидкости, специально изготовленной для теплозащитного экрана форсункой, позволили получить данные, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты экспериментов по определению диаметров капель

Диаметр капли, мкм	Статистическое распределение в потоке, %	Расстояние локализации капель от плоскости распыления, см
15 – 30	11	25 – 60
250	18	60 – 120
500	27	120 – 180
650	28	180 – 240
800 и более	16	240 – 300

Для определения плотности теплового потока, прошедшего через паровоздушно-капельную среду (Q_B), воспользуемся следующей моделью, которая с достаточной степенью точности соответствует реальным процессам теплопоглощения, тепло- и массопереноса, происходящим в межсеточном пространстве теплозащитного экрана.

Теплоперенос осуществляется газовой средой, находящейся в непосредственном контакте с внутренней поверхностью сетки I и внутренней поверхностью сетки II. В объеме газовой среды находятся капли воды, скорость поступления и отвода единичной массы которых (V_K) зависит от параметров распыления.

Теплопроводность и плотность воздуха невелики, поэтому в режиме «сухой сетки» температура воздуха (T_B) в межсеточном пространстве определяется, прежде всего, температурой газа, поступающего через ячейки сетки со стороны факела пламени, и температурой водяного пара, образовавшегося на поверхности сетки I. Действительно, даже если температура воздуха увеличивается на 10 К/с объем воздуха за этот же период времени увеличивается на $1,037l^2L$, в то время как при скорости поступления конвективных потоков газов со стороны пожара равной порядка 1 м/с, объемная скорость газов через ячейки сетки составит 0,5 м³/с, то есть на 2–3 порядка выше скорости объемного расширения газа.

Объемная скорость образования паров воды может быть найдена из следующего уравнения:

$$V_V = \frac{\rho_B V_S}{\rho_V}, \quad (2.11)$$

где ρ_B – плотность воды; ρ_V – плотность водяного пара при температуре 100 °С; V_S – объемный расход воды.

Для определения температуры капель, покидающих межсеточное пространство (T_K), сделаны следующие допущения. Считаем, что все капли, находящиеся в объеме, имеют одинаковый размер (r_{cp}) и скорость движения (V_K), а значит и время пролета капли (t_K) в нагретой воздушной среде. Поэтому температуру капли можно определить с помощью краевой задачи:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}; \quad 0 < r < r_{\text{ср}}; \quad 0 < t < t_{\text{к}}, \quad (2.12)$$

с граничными условиями

$$-\kappa \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = \eta_{\text{вк}} (T_{\text{в}} - T); \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{ср}}} = 0; \quad T|_{t=0} = T_0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{t=t_{\text{к}}} = 0, \quad (2.13)$$

где κ – коэффициент теплопроводности воды; $\eta_{\text{вк}}$ – коэффициент теплоотдачи между поверхностью капли и воздушной средой.

Теоретически, при достаточно больших значениях плотности теплового потока, возникающего при пожарах, на второй сетке также может реализовываться режим «сухой сетки». Однако, для плотности теплового потока 15–25 кВт/м², при которых проводились описываемые экспериментальные исследования, на второй сетке всегда наблюдалась устойчивая водяная пленка. При этом толщина и скорость движения водяной пленки определяются скоростью подвода воды и гидродинамическими уравнениями движения слоев жидкости по вертикальной поверхности. Оценку толщины водяного слоя определяли из следующих условий. Скорость стекания единичного объема воды по вертикальной поверхности с учетом сил поверхностного натяжения (считая воду невязкой жидкостью), определяли по формуле:

$$mgH - \sigma_{\text{в}} lH = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2}, \quad (2.14)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – поверхностное натяжение воды.

Если принять скорость воды на самой верхней отметке сетки равной нулю ($V_1 = 0$), тогда $V_2 = \sqrt{2gH - \frac{2\sigma_{\text{в}} lH}{m}}$. Скорость подвода воды через поперечное

сечение сетки определяется как $V' = \frac{G_S}{\rho l h_p}$ (здесь G_S – массовый расход воды).

Из условия $V_2 = V'$ получим значения для толщины водяного слоя (h_p).

Уравнение теплового баланса для водяной пленки на поверхности сетки II имеет вид:

$$Q_{2P} = Q_B - c_p \frac{G_S}{lh_p} (T_p - T_0), \quad (2.15)$$

где T_p – текущая температура воды.

Температуру пленки можно определить с помощью стационарного уравнения теплопроводности:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad 0 < x < h_p; \quad 0 < t < t_p, \quad (2.16)$$

с граничными условиями

$$T|_{t=0} = T_0; \quad -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = Q_B + c_p \frac{G_S}{lh_p} (T_0 - T); \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{t=t_p} = 0; \quad \kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h_p} = \eta_{p2} (T - T_0), \quad (2.18)$$

где η_{p2} – коэффициент теплоотдачи между поверхностью пленки и поверхностью сетки II.

При установившемся режиме температура внешней и внутренней поверхностей сетки одинакова, так как ее толщина невелика (~1 мм), а коэффициент теплопроводности металлов очень высок [93, 94].

Таким образом, разработанная математическая модель, с достаточной степенью точности описывает процессы теплообмена и массопереноса системы в режиме первой «сухой сетки», поскольку согласно формуле (2.3) именно температурой сетки II (T_{S2}) определяется поток теплового излучения за теплозащитным экраном. Конвективным теплообменом внешней поверхности сетки с неограниченным объемом воздуха можно пренебречь. Ниже представлен анализ процессов поглощения и рассеяния теплового излучения теплозащитным экраном.

2.2.3 Прохождение ИК-излучения через систему

Как уже было показано выше плотность потока излучения, прошедшего через сухую сетку, определяется по формуле (2.6). Теперь определим значение воздушно-капельной среды в процессе поглощения и рассеяния излучения.

Будем считать, что в межсеточном пространстве в каждый момент времени присутствует N капель. С учетом «парадокса экстинкции» для капель, диаметр которых превышает длину волны излучения, коэффициент ослабления плотности потока излучения воздушно-капельной средой определяется по формуле:

$$\zeta = 2NL_{eff}(\alpha_B + \chi_B + \nu_B), \quad (2.19)$$

где α_B, χ_B, ν_B – соответственно коэффициенты рассеяния, поглощения и отражения излучения водой.

Эффективная длина среды, поглощающей излучение вдоль оси его распространения, равна:

$$L_{eff} = \frac{\sum n_i d_i}{Nk}, \quad i = 1, 2, 3 \dots k, \quad (2.20)$$

где $n_i = N\gamma_i$ – количество капель, имеющих одинаковый диаметр; γ_i – относительное число капель данного диаметра в общем количестве капель; d_i – диаметр капель; k – число статистически определенных диапазонов размеров капель.

Ослаблением излучения водяной пленкой на поверхности сетки можно пренебречь в силу незначительности этой величины. Поэтому коэффициент ослабления на второй сетке будет определяться по формуле (2.1).

Таким образом, плотность теплового потока, прошедшего через систему, с учетом (2.4) и (2.10) будет равна:

$$Q_F = \frac{Q_S^L}{8}(1 - \zeta) + Q_{E2}; \quad (2.21)$$

$$Q_{E2} = \varepsilon_s \sigma \left(\left(\frac{T_{S2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right) \frac{F_{Sm}}{F_s}, \quad (2.22)$$

где T_{S2} – температура сетки II.

2.3 Режим «мокрой сетки»

Рассмотрим теплообмен на сетке I. Уравнение теплового баланса на сетке I, по которой сливается водяная пленка, выглядит следующим образом (при пренебрежении теплотой нагрева водяного пара):

$$Q_{PI} = Q_1 - G_1 (\Delta H_K + c_p (T_{100} - T_0)) - G_{1p} c_p (T_{1p} - T_0), \quad (2.23)$$

где G_1 – массовый расход испарения воды с поверхности сетки; G_{1p} – массовый расход стекания водяной пленки толщиной h_{1p} , причем $G_1 + G_{1p} = G$, где G – массовый расход воды, а h_{1p} определяется аналогично (2.14); T_{1p} – температура, определяемая одномерным уравнением теплопроводности:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad 0 < x < h; \quad t > 0, \quad (2.24)$$

с граничными условиями

$$\kappa \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -\eta_{1p} (T_{100} - T_0) - \Delta H_K / S_{S1}; \quad (2.25)$$

$$\kappa \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=h} = -\eta_{PB} (T - T_0) \quad T|_{t=0} = T_0, \quad (2.26)$$

где η_{1p} – коэффициент теплоотдачи сетки с поверхностью водяной пленки; η_{PB} – коэффициент теплоотдачи внешней поверхности воды с окружающей средой.

Температуру сетки, по которой стекает водяная пленка, найдем аналогично (2.9) из (2.7):

$$\Delta T_S = \frac{G_S \Delta t}{m_S c_{pS}} (\Delta H_K + c_p (T_{100} - T_{20}) + c_{pn} (T_n - T_{100})); \quad (2.27)$$

$$T_{S1} = T_1 - \Delta T_S.$$

2.4 Численные оценки процессов поглощения и отвода тепла теплозащитным экраном

Для численных оценок коэффициента поглощения потока теплового излучения теплозащитным экраном необходимо получить количественные оценки средней скорости подвода воды на сетки, средней скорости движения капель и общего количества капель в объеме межсеточного пространства в каждый момент времени.

Средний размер капли найдем из экспериментально определенного для данного типа форсунок статистического распределения капель по таблице 2.1 – $d_{\text{ср}} \approx 500$ мкм. Тогда нетрудно определить общее количество вылетающих капель в единицу времени для каждой из форсунок при: 80 г/с – $12,2 \cdot 10^5$ шт./с; 65 г/с – $9,9 \cdot 10^5$ шт./с; 38 г/с – $5,8 \cdot 10^5$ шт./с.

Струя распыления воздушно-капельной смеси представляет собой перевернутый конус, в основании которого лежит эллипс (рисунок 2.2).

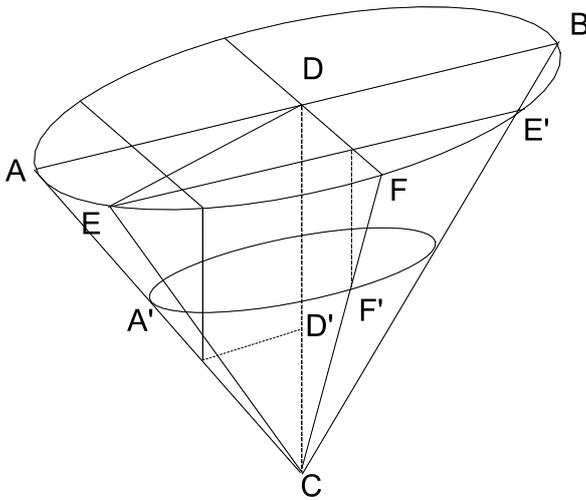


Рисунок 2.2 – Схематическое изображение струи распыления воздушно-капельной среды

Общий объем конуса распыления высотой 1 м равен:

$$Z = \frac{1}{3} \pi a b l, \quad (2.28)$$

где $a = AD$; $b = DF$.

Значения a и b найдем из решения треугольников CAD и CDF . Для $l = 1$ м, $\angle ACD = 50^\circ$; $\angle DCF = 5^\circ$:

$$a = \text{tg}(50^\circ) = 1,192 \text{ м}; \quad b = \text{tg}(5^\circ) = 0,0875 \text{ м}; \quad Z = 0,11 \text{ м}^3. \quad (2.29)$$

Найдем объем воздушно-капельной среды (Z_1), который беспрепятственно распространяется до высоты $l = 1$ м, не ударяясь о поверхности сеток и боковых стенок:

$$Z_1 = \frac{\pi}{3} 0,075 \cdot 0,5 \cdot 1 = 0,039 \approx 0,04 \text{ м}^3. \quad (2.30)$$

Для определения объема воздушно-капельной среды, которая стекает по боковым поверхностям ограничивающим межсеточное пространство (то есть объема капельной среды, которая не участвует в процессе теплообмена), заменим сегмент конуса с эллиптическим основанием, получающийся при этом на половину клина в основании которого – прямоугольник со сторонами $2DD'$ и $L/2$, высотой равной $a - l/2$. Длина отрезка DD' равна $(l - 0,5l \operatorname{ctg}(50^\circ)) = 0,58$ м. Тогда объем потерь капельно-воздушной среды равен:

$$Z_2 = \frac{L}{8} |DD'| (a - l/2) = \frac{0,15}{8} 0,58 \cdot 0,692 = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \quad (2.31)$$

Однако в реальных условиях объем потерь (Z_2) капельно-воздушной смеси больше на 10–20 %. Тогда объем воздушно-капельной среды, которая непосредственно попадает на поверхность каждой сетки, будет равен:

$$Z_p = \frac{1}{2} (Z - Z_1 - 2Z_2) \approx 0,026 \text{ м}^3. \quad (2.32)$$

Таким образом, для форсунки с расходом воды 80 г/с, с учетом того, что в межсеточном пространстве существуют два пересекающихся потока капель, в каждый момент времени в пространстве между сетками находится $12,2 \cdot 10^5 \frac{2Z_1}{Z} = 8,8 \cdot 10^5$ шт., а при расходах воды 65 и 38 г/с – $7,2 \cdot 10^5$ и $4,2 \cdot 10^5$ шт., соответственно.

Начальную скорость вылета капель определим из соотношения:

$$\frac{\rho V_{0к}^2}{2} = \Delta p. \quad (2.33)$$

При избыточном давлении $\Delta p = 0,3$ Мпа $V_{0к} = 24,5$ м/с. Однако реально, скорость выхода воды отличается от рассчитанной теоретически на значение коэффициента истечения, определяемого экспериментально для отверстий различной формы. В нашем случае $V_{0к} \approx 12$ м/с. Теоретическое значение вертикальной (составляющей среднего значения) скорости капли летящей вверх, без учета сил сопротивления воздуха, у верхней кромки сетки составляет:

$$V_{1к} = (V_{1к}(0^\circ) + V_{1к}(50^\circ)) / 2 = (11,1 + 6,3) / 2 = 8,7 \text{ м/с}. \quad (2.34)$$

Однако при концентрации капель порядка 10^6 – 10^7 в 1 м^3 , которая была реализована в эксперименте, реальная скорость капель ниже на 15–20 % из-за соударений капель друг с другом, то есть $V_{1к} = 7 \text{ м/с}$.

При неупругом столкновении капель с верхними и боковыми пластинами, ограждающими межсеточное пространство капли теряют до 80–90 % своей скорости, причем теперь имеется полный набор направлений скорости движения капель от 0° до 90° . Примем среднее направление движения капель 45° , тогда скорость движения капель вниз у нижней кромки сетки будет равна:

$$V_{2к} = 0,8\sqrt{(0,2V_{1к} \cos(45^\circ))^2 + 2gH} = 4,6 \text{ м/с}. \quad (2.35)$$

Отсюда нетрудно найти среднюю скорость движения капли в межсеточном пространстве в вертикальном направлении, а значит и время пролета капли:

$$V_{\text{крп}} \approx 5 \text{ м/с}, \quad t_{\text{к}} \approx 0,5 \text{ с}. \quad (2.36)$$

2.5 Численные оценки коэффициента поглощения тепловых потоков в режиме «сухой сетки»

Рассчитанная по уравнению (2.3) температура сетки I для удельного теплового потока в 50 кВт/м^2 и усредненных значений коэффициентов поглощения и серости, составляет $T = 825 \text{ К}$.

Результирующую плотность теплового потока и температуру сетки I, орошаемую водой, определим по формулам (2.8) и (2.9):

$$Q_{21} = 1,7 \text{ кВт/м}^2; \quad \Delta T \approx 55 \text{ К}; \quad T_{S1} = 770 \text{ К}. \quad (2.37)$$

Однако температура воздуха в межсеточном пространстве определяется не количеством теплоты, передаваемой от сетки I, а прежде всего, температурой газа, поступающего через ячейки сетки со стороны факела пламени и температурой водяного пара, образовавшегося на поверхности сетки I.

Объемная скорость образования паров воды равна:

$$V_v = \frac{38 \cdot 10^{-3} Z_p}{Z \rho_v} 2594,4 \cdot 10^3 = 17,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.38)$$

где ρ_V – плотность водяных паров при температуре 100 °С, определяемая из уравнения Клапейрона-Менделеева.

Скорость поступления горячего воздуха с температурой $T_G \sim 800\text{--}900$ К через ячейки сетки составляет примерно 0,1 м/с. Тогда объемная скорость равна 0,05 м³/с.

Исходя из выше сказанного, температура паро-воздушной среды (T_B) в межсеточном пространстве приблизительно равна 410–440 К.

Из решения краевой задачи определим температуру капель, покидающих межсеточное пространство. Так как средний радиус капель равен 250 мкм, а скорость теплопроводности выше скорости пролета капли, будем считать, что краевая задача сводится к решению уравнения теплопроводности для термически тонкой пластины. Тогда можно получить точное аналитическое решение:

$$T_K(t) = \left[1 + \frac{t a \eta_{BK}}{\kappa r_{cp}} \right]^{-1} \left(T_B \frac{t a \eta_{BK}}{\kappa r_{cp}} + T_0 \right); \quad 0 < t < t_k. \quad (2.39)$$

Определим значение параметров, входящих в это уравнение:

$$a = \frac{\kappa}{c_p \rho_V} = 0,154 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (2.40)$$

Коэффициент теплоотдачи η_{BK} – это плотность теплового потока, который газ (воздух) массой $m_G = \rho_G Z_G$, имеющий температуру T_B , передает каплям через поверхность NS_K в единицу времени Δt (здесь N – количество капель в межсеточном пространстве; S_K – площадь поверхности капли; ρ_G – плотность газа, определяемая из уравнения Клапейрона-Менделеева) при разнице температур капли и газа (воздуха) 1 К.

Таким образом, коэффициент теплоотдачи будет равен:

$$\eta_{BK} = \frac{c_{pG} \rho_G Z_G}{NS_K \Delta t} = 402 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.41)$$

Тогда температура капель, покидающих межсеточное пространство, будет равна $T_K = 340$ К.

Если воздух массой $m_G = \rho_G Z_G$ в межсеточном пространстве, находящийся при температуре T_B обладает количеством теплоты q_B , тогда капли общей массой $m_K = \rho_B N Z_K$, покидающие межсеточное пространство с температурой T_K , уменьшают количество теплоты на величину Δq . Тогда эффективная плотность теплового потока Q_B передаваемая от паро-капельно-воздушной среды через площадь S_S водяной пленки в единицу времени Δt равна:

$$Q_B = \frac{1}{S_S \Delta t} (c_{pG} \rho_G Z_G T_B - c_p \rho_B N Z_K T_K) = 12,8 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2, \quad (2.42)$$

а эффективная температура паро-воздушной смеси равна:

$$T'_B = T_0 + \frac{Q_B S_S \Delta t}{c_{pG} m_G} = 375 \text{ К}. \quad (2.43)$$

Толщина водяной пленки на сетке II в установившемся режиме при скорости стекания $G_p \sim 9$ г/с равна приблизительно $h_p = 30$ мкм. Отсюда максимальное время нагревания водяной пленки составит $t_p = 3$ с.

Для водяной пленки толщиной порядка 10 мкм, также, как и выше, уравнение теплопроводности можно преобразовать в краевую задачу о нагреве термически тонкого слоя. Однако в отличие от нагрева капли здесь нельзя пренебрегать теплообменом за счет поступления холодной воды. Так как скорость распыления капель и скорость стекания пленки постоянна, перейдем к решению стационарного уравнения теплопроводности для нагрева термически тонкого слоя. Без учета теплообмена водяной пленки с сеткой II, температуру водяной пленки определим из следующего уравнения:

$$T_{P2}(t) = \frac{\alpha \eta_{BP} T_B + \alpha \eta_P T_0 + T_0}{1 + \alpha (\eta_{BP} + \eta_P)}; \quad \alpha = \frac{ta}{\kappa h_p}. \quad (2.44)$$

Коэффициент теплопередачи между воздухом и водяной пленкой и коэффициент теплоотдачи за счет подвода холодной воды на сетку II, соответственно равны:

$$\eta_{BP} = \frac{c_{pG} \rho_G Z_G}{S_S \Delta t} = 140,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}; \quad (2.45)$$

$$\eta_p = \frac{c_p V_p}{S_s} = 37,62 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.46)$$

Из уравнения (2.44) найдем численные оценки температуры водяной пленки:

$$T_{p2} = 346 \text{ К}. \quad (2.47)$$

В стационарном режиме средняя температура водяного слоя и температура сетки равны между собой.

Теперь вычислим коэффициент поглощения и рассеяния теплового излучения теплозащитным экраном. Сначала вычислим плотность потока излучения после сетки I по формулам (2.1), (2.3) и (2.4):

$$Q_s^L = 21,1 \text{ кВт}/\text{м}^2. \quad (2.48)$$

Тогда, рассеяние излучения паро-капельно-воздушной средой, с учетом полученных в этой главе численных оценок, необходимых для этого величин, будет равно:

$$Q_{\text{БК}}^L = \frac{Q_s^L}{2,2} = 9,6 \text{ кВт}/\text{м}^2. \quad (2.49)$$

Полученный коэффициент ослабления излучения воздушно-капельной средой выше примерно в 2 раза, чем данные экспериментов по распылению. Этот факт является следствием того, что в ограниченном пространстве между сетками находится в 2 раза больше капель, чем просто в неограниченном конусе распыления. Кроме того, скорость капель при свободном распылении превосходит скорость капель в межсеточном пространстве в несколько раз. Поэтому данный результат не противоречит полученным экспериментальным данным. Как уже отмечалось выше, коэффициентом поглощения и рассеяния теплового излучения водяной пленкой толщиной порядка 10 мкм можно пренебречь.

Прохождение излучения через сетку II определим по формулам (2.2), (2.3) и (2.4):

$$Q_{s2}^L = 1,52 \text{ кВт}/\text{м}^2. \quad (2.50)$$

Таким образом, теплозащитный экран снижает плотность теплового потока в режиме «сухой сетки» в 33 раза. Этот результат совпадает с данными огневых испытаний, в которых уменьшение теплового потока составляло до 35 раз.

2.6 Численные оценки коэффициента поглощения тепловых потоков в режиме «мокрой сетки»

Для расчета процессов поглощения и отвода тепловых потоков теплозащитным экраном в этом режиме примем значения для начальных параметров излучения и распыления, которые реализовывались во многих экспериментах, а именно: плотность теплового потока $P_0 = 20$ кВт/м²; расход воды 80 или 65 г/с. Тогда, средняя температура сетки I, определенная по формуле (2.3) равна 650 К, а скорость поступления воды на сетки $V_S \approx 19 \cdot 10^{-3}$ или $16 \cdot 10^{-3}$ кг/с, соответственно.

Скорость испарения определим из условия (перегревом пара выше 100 °С пренебрегаем):

$$\frac{P_0 S_S}{q_V} = G_V; \quad q_V = (\Delta H_K + c_p (T_{100} - T_{20})) = 2594,7 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}, \quad (2.51)$$

где S_S – площадь водяной пленки; ΔH_K – удельная теплота кипения воды.

Здесь взята полная плотность теплового потока, так как пленка покрывает всю поверхность сетки и в процессе испарения участвует полный поток излучения. Тогда, $G_V \approx 8 \cdot 10^{-3}$ кг/с, скорость движения пленки будет равна $G_S \approx 11 \cdot 10^{-3}$ и $8 \cdot 10^{-3}$ кг/с, толщина пленки соответственно $h_p = 32$ и 29 мкм, а максимальное время нагревания водяной пленки равно $t_p = 3,0$ и $3,6$ с.

Из уравнений (2.9) и (2.10) вычислим эффективную температуру сетки, с которой со скоростью G_V испаряется вода, – $T_{S1} = 635$ К.

Решение краевой задачи (2.12) в явном виде получить невозможно, так как здесь нельзя пренебрегать теплообменом ни на внешней поверхности водяной пленки, где происходит эффективное кипение воды, ни на внутренней поверхности, куда постоянно поступает холодная вода.

Однако попытаемся получить численные оценки для средней температуры сетки и водяной пленки, разделив процессы кипения воды на границе с сеткой и нагрева водяной пленки:

$$T_{P1}(t) = \frac{\alpha \eta_{VP} T_V + \alpha \eta_P T_0 + T_0}{1 + \alpha (\eta_{VP} + \eta_P)}, \quad \alpha = \frac{ta}{\kappa h_P}. \quad (2.52)$$

Коэффициент теплопередачи между паром и водяной пленкой и коэффициент теплоотдачи за счет подвода холодной воды на сетку II, соответственно равны:

$$\eta_{VP} = \frac{c_{pV} V_V}{S_S} = 18,34 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad (2.53)$$

$$\eta_P = \frac{c_p V_P}{S_S} = 45,98 \text{ и } 33,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (2.54)$$

Отсюда, при расходе воды 80 г/с – $T_{P1}(80) = 309 \text{ К}$, а при 65 г/с – $T_{P1}(65) = 314 \text{ К}$.

В отличие от режима «сухой сетки», в данном случае, температура воздуха определяется из решения краевой задачи:

$$T(x) = \left[\frac{x}{L} \left((\exp(1/\xi L) - 1)(T_{x0} - T_0) + T_0 \right)^2 - T_{x0}^2 \right] + T_{x0}^2 \Bigg]^{1/2}, \quad (2.55)$$

где $\xi = \frac{\eta_{PB}}{\kappa_B} - c_p \frac{\rho_V V_B}{\kappa_B l L}$; $\eta_{PB} = \frac{c_p m_B}{S_S \Delta t}$; $T_{x0} = T_{P1} = 309 \text{ К}$.

Так как $\eta_{PB} \gg c_{pV} \frac{\rho_V V_B}{l L}$ массопереносом воздуха за счет температурного расширения в стационарном режиме можно пренебречь.

Тогда $\xi = \text{const}$, а температура у сетки II определяется уравнением:

$$T_{xL} = \exp(1/\xi L - 1)(T_{x0} - T_0) + T_0. \quad (2.56)$$

Средняя температура воздуха в межсеточном пространстве будет равна: $T_B(80) = 299 \text{ К}$ и $T_B(65) = 305 \text{ К}$.

При таких значениях температуры воздуха в межсеточном пространстве нагревом капель, время которого составляет всего 0,5 с, можно пренебречь. Расчет температурного поля дает следующие оценки для средней температуры водяной пленки на сетке II:

$$T_B(80) = 299 \text{ К и } T_B(65) = 305 \text{ К}, \quad (2.57)$$

а значит и температура сетки II равна:

$$T_{S2}(80) = 299 \text{ К и } T_{S2}(65) = 305 \text{ К}. \quad (2.58)$$

Теперь вычислим коэффициент поглощения и рассеяния теплового излучения теплозащитным экраном. Плотность потока излучения после сетки I, вычисленная по формулам (2.1), (2.3) и (2.4) для расхода воды 80 г/с, равна:

$$Q_s^L = 9,2 \text{ кВт/м}^2. \quad (2.59)$$

Тогда, рассеяние излучения капельно-воздушной средой, с учетом полученных в этой главе численных оценок, необходимых для этого величин, будет равно:

$$Q_{\text{ВК}}^L = \frac{Q_s^L}{4,6} = 2,0 \text{ кВт/м}^2. \quad (2.60)$$

Так как температура сетки II равна температуре окружающего воздуха, то поглощение и рассеяние излучения на сетке II будет определяться только формулой (2.1):

$$Q_{S2}^L = \frac{2,0 \cdot 10^3}{8} = 250 \text{ Вт/м}^2. \quad (2.61)$$

Таким образом, теплозащитный экран снижает плотность теплового потока в режиме «мокрой сетки» при расходе воды 80 г/с в 80 раз. Проведенные расчеты для форсунки с расходом воды в 65 г/с показывают, что коэффициент ослабления плотности теплового потока теплозащитным экраном равен 66.

2.7 Оценка коэффициента ослабления лучистого теплового потока противопожарной преградой при «стандартном» пожаре

Для расчета уменьшения плотности теплового потока за счет установки противопожарной преграды, необходимо выполнить расчет теплопередачи от огневого пространства малогабаритной печи, в которой проводились сертификационные испытания (см. раздел 4.3.3 настоящей работы), через ее стенки и водяную завесу к наружному воздуху.

Уменьшение плотности лучистого теплового потока, проходящего через противопожарную преграду, оценим по величине коэффициента снижения плотности лучистого теплового потока:

$$k_{\text{л}} = \frac{q_{\text{л}}}{q}, \quad (2.62)$$

где $k_{\text{л}}$ – коэффициент снижения плотности лучистого теплового потока; $q_{\text{л}}$ – плотность лучистого теплового потока, падающего на поверхность противопожарной преграды со стороны огневого пространства печи, Вт/м²; q – плотность лучистого теплового потока на расстоянии 0,5 м от геометрического центра необогреваемой поверхности конструкции преграды, полученная по результатам сертификационных испытаний, Вт/м².

Из-за повышенной сложности теплофизической картины процесса испытаний расчет будем проводить различными методами с использованием результатов сертификационных испытаний.

Основой для расчета нагрева строительной конструкции от теплового излучения является уравнение лучистого теплообмена [95]:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[\left(\frac{T_{\text{и}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] \Psi_{21}, \quad (2.63)$$

где q – плотность лучистого теплового потока, падающего на поверхность конструкции, Вт/м²; $T_{\text{и}}$ – температура излучающей поверхности, К; $T_{\text{пов}}$ – температура на облучаемой поверхности конструкции, К; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,7 Вт/(м²·К⁴); Ψ_{21} – коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями, в который в неявной форме входит расстояние r по нормали между излучающей и облучаемой поверхностями.

Коэффициент облученности для одной четвертой части площади поверхности факела вычисляется по формуле [95]:

$$\Psi_{21} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + r^2}} \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + r^2}} \right), \quad (2.64)$$

где r – расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями по нормали, м; a и b – стороны прямоугольника пламени [95], м.

Уравнение теплового баланса термодинамической системы, ограниченной внутренними поверхностями печи, имеет вид:

$$Q_{\text{пож}} = Q_{\text{газ}} + Q_{\text{ок}} + Q_{\text{вых}}, \quad (2.65)$$

где $Q_{\text{пож}}$ – тепловая мощность, выделяющаяся при горении природного газа внутри печи, Вт; $Q_{\text{газ}}$ – тепловая мощность, идущая на нагрев газовой среды внутри печи, Вт; $Q_{\text{ок}}$ – тепловая мощность, отводящаяся в стенки печи и в противопожарную преграду, Вт; $Q_{\text{вых}}$ – тепловая мощность, уходящая со смесью газов через систему дымоудаления из печи, Вт.

Тепловая мощность, выделяющаяся при горении природного газа внутри печи равна: $Q_{\text{пож}} = W_{\text{газ}}Q = 2 \cdot 40 \cdot 10^3 / 3600 = 22,2$ кВт (здесь: $W_{\text{газ}} = 2$ м³/ч – объемный расход природного газа; $Q = 40$ МДж/м³ – низшая объемная теплота сгорания природного газа).

Тепловая мощность, идущая на нагрев газовой среды внутри печи, рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{газ}} = \rho c_p V \frac{dT}{d\tau}, \quad (2.66)$$

где ρ – среднеобъемная плотность газовой смеси внутри печи, кг/м³; c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость газовой смеси внутри печи, Дж/(кг·К); V – внутренний объем печи, м³; T – среднеобъемная температура газовой смеси внутри печи, К; τ – время от начала горения, с.

Тепловая мощность, уходящая со смесью газов через систему вентиляции из печи наружу равна:

$$Q_{\text{вых}} = \rho c_p T W_{\text{вен}}, \quad (2.67)$$

где $W_{\text{вен}}$ – объемный расход системы дымоудаления из печи, м³/с.

Тепловая мощность, отводящаяся в стенки печи и в противопожарную преграду, рассчитывается из решения уравнений (2.65) – (2.67), в которых среднеобъемная температура принимается равной температуре «стандартного» пожара. Результаты расчета вышеуказанной мощности показаны на рисунке 2.3.

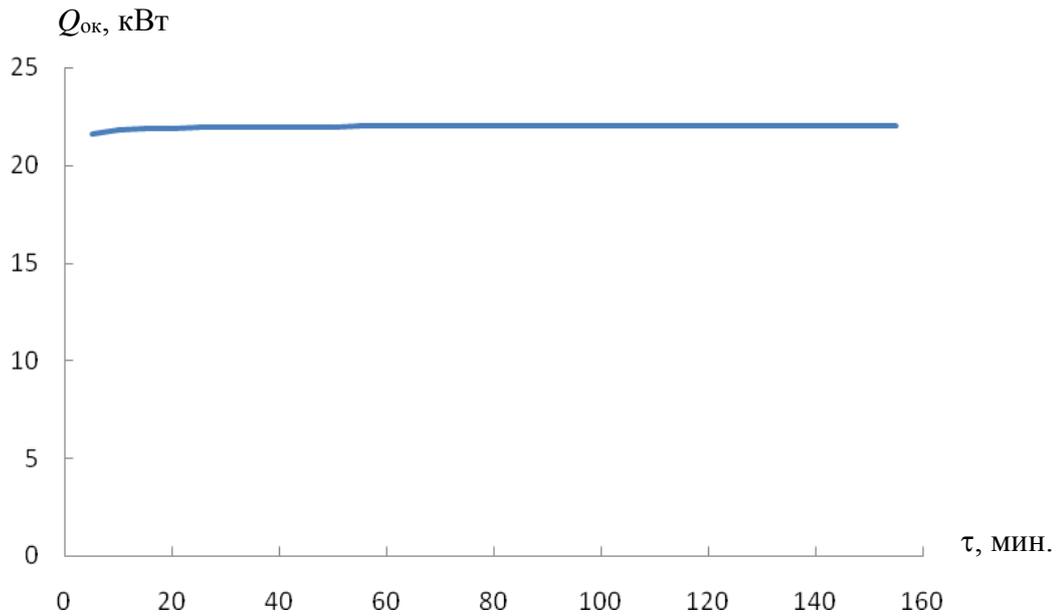


Рисунок 2.3 – Зависимость тепловой мощности, отводящейся в стенки печи и в противопожарную преграду, от времени с начала испытаний

Плотность теплового потока, отводящаяся в стенки печи и в противопожарную преграду, равна:

$$q_{ок} = Q_{ок} / F_{ок}, \quad (2.68)$$

где $F_{ок}$ – суммарная площадь внутренней поверхности стенок печи и противопожарной преграды, m^2 .

Выполним оценку физических механизмов ослабления лучистого теплового потока противопожарной преградой в режиме «мокрой» сетки.

Конвективный тепловой поток в сетку со стороны печи стремится к нулю, так как образующиеся пары воды являются преградой на пути движения продуктов горения к сетке (режим «оттеснения» пограничного слоя [96]).

Плотность лучистого теплового потока, падающего на поверхность противопожарной преграды, можно записать в виде:

$$q_{л} = q_{л.м} + q_{л.о}, \quad (2.69)$$

где $q_{л.м}$ – часть плотности лучистого теплового потока, падающая на металлическую поверхность преграды, охлаждаемую водой, $Вт/м^2$; $q_{л.о}$ – часть лучистого теплового потока, попадающая на отверстия металлической решетки, $Вт/м^2$.

Из геометрических соображений:

$$q_{л.м} = k_m q_{л}; \quad (2.70)$$

$$q_{л.о} = (1 - k_m) q_{л}, \quad (2.71)$$

где $k_m = F_m / F$ – коэффициент, равный отношению площади поверхности преграды, занимаемой металлом ($F_m, м^2$), к суммарной площади поверхности преграды ($F, м^2$).

При размерах металлической ячейки сетки $0,9 \times 0,9$ мм и квадратного отверстия ячейки $0,4 \times 0,4$ мм коэффициент $k_m = 0,6213$.

Таким образом, примерно 62,13 % суммарного лучистого теплового потока, падающего на противопожарную преграду, можно считать полностью поглощенной, отраженной и рассеянной металлической частью ячейки, и охлаждающей ее водой.

Этот вывод подтверждается результатами сертификационных испытаний, по которым температура на наружной поверхности металлической сетки, непосредственно контактирующей с газовой средой печи, не превышает 367 °С. При этой температуре величиной лучистого теплового потока, излучаемого наружной поверхностью вышеуказанной металлической сетки внутрь противопожарной преграды, по сравнению с падающим на преграду лучистым тепловым потоком, можно пренебречь.

Экспериментальное значение коэффициента снижения плотности лучистого теплового потока ($k_{л}$, выражение (2.62)) при температуре внутри печи 1000 °С равно:

$$k_{л} = 100 \quad (q_{л} = 20 \text{ кВт/м}^2; \quad q = 0,2 \text{ кВт/м}^2).$$

Тогда коэффициент ослабления части лучистого теплового потока, проходящей через отверстия в металлической решетке, с учетом выражений (2.62) и (2.71), равен:

$$k_o = \frac{q_{л.о}}{q} = \frac{(1 - k_m) q_{л} k_{л}}{q_{л}} = (1 - k_m) k_{л} = 36,87.$$

Таким образом, можно предположить, что примерно 36,87 % от падающего на поверхность преграды лучистого теплового потока, отражается и рассеивается за счет дифракционных явлений внутри противопожарной преграды и поглощается металлическими сетками и охлаждающей водой. Этот вывод можно объяснить тем, что порядка 70 % длина волны теплового излучения сопоставима с размерами квадратного отверстия ячейки металлической. Поэтому процессы отражения и рассеивания излучения превышают по своему эффекту процесс пропускания лучистой тепловой энергии [92]. Подробный механизм дифракции требует дополнительных исследований.

Таким образом, разработанная преграда поглощает, отражает и рассеивает 99 % падающего на нее лучистого теплового потока. На рисунке 2.4 приведена принципиальная схема ослабления лучистого теплового потока преградой при рассмотренных выше исходных данных.

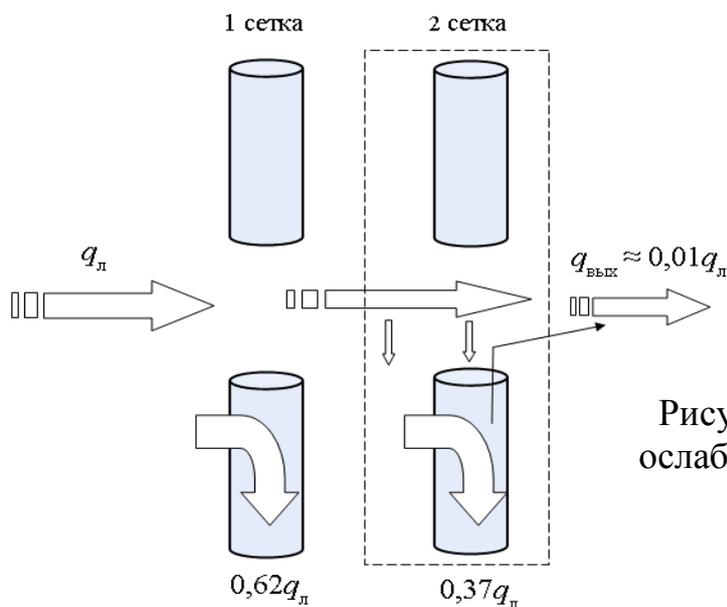


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема ослабления лучистого теплового потока противопожарной преградой

Выполним оценочный расчет коэффициента снижения плотности лучистого теплового потока противопожарной преградой (выражение (2.62)) с использованием выражений (2.63) и (2.64).

При горении природного газа основное выделение паров воды и углекислого газа происходит при реакции: $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$. При этом объемные доли углекислого газа и паров воды составляют, соответственно: $r_{CO_2} = 0,167$; $r_{H_2O} = 0,333$.

Степень черноты продуктов горения природного газа с учетом долей углекислого газа и паров воды для расчета приведенной степени черноты ($\epsilon_{пр}$) в выражении (2.63) определяли согласно литературе [96] с использованием соответствующих номограмм.

Результаты расчетов величины плотности лучистого теплового потока в геометрическом центре необогреваемой поверхности конструкции преграды с использованием формул (2.63) и (2.64) в случае, когда газовая среда печи излучает наружу через открытую стенку (противопожарной преграды нет), в случае «стандартного» пожара представлены на рисунке 2.5 (кривая 1). На рисунке 2.5 также приведена зависимость от времени величины плотности лучистого теплового потока на расстоянии 0,5 м от геометрического центра необогреваемой поверхности конструкции преграды (кривая 2), приведенная в протоколе сертификационных испытаний [109].

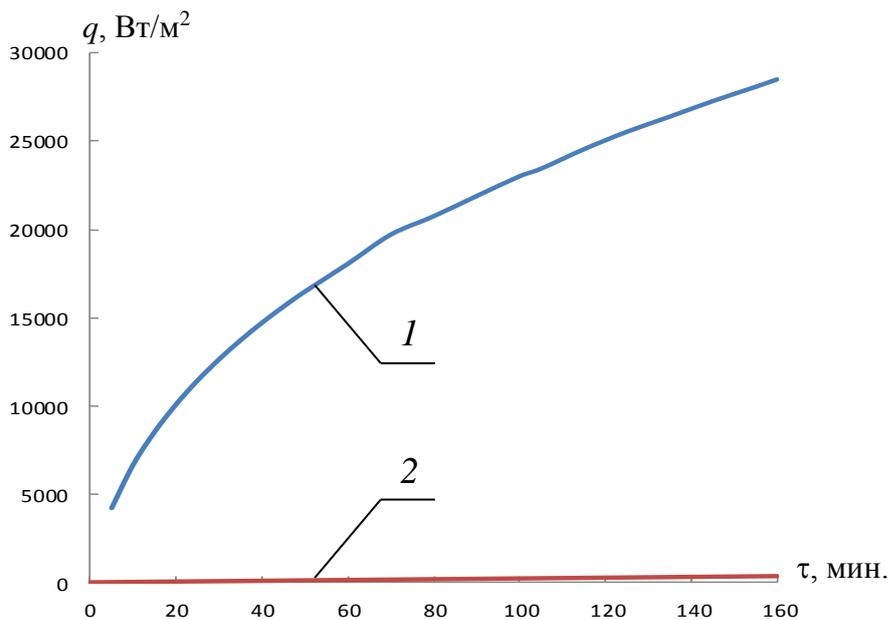


Рисунок 2.5 – Зависимости плотности теплового потока от времени при «стандартном» пожаре:

1 – плотность лучистого теплового потока при отсутствии противопожарной преграды в геометрическом центре необогреваемой поверхности конструкции преграды (выражения (2.63) и (2.64)); 2 – экспериментальная зависимость от времени величины плотности лучистого теплового потока на расстоянии 0,5 м от геометрического центра необогреваемой поверхности конструкции преграды

Зависимость коэффициента снижения плотности лучистого теплового потока, определяемого по формуле (2.62), представлена на рисунке 2.6

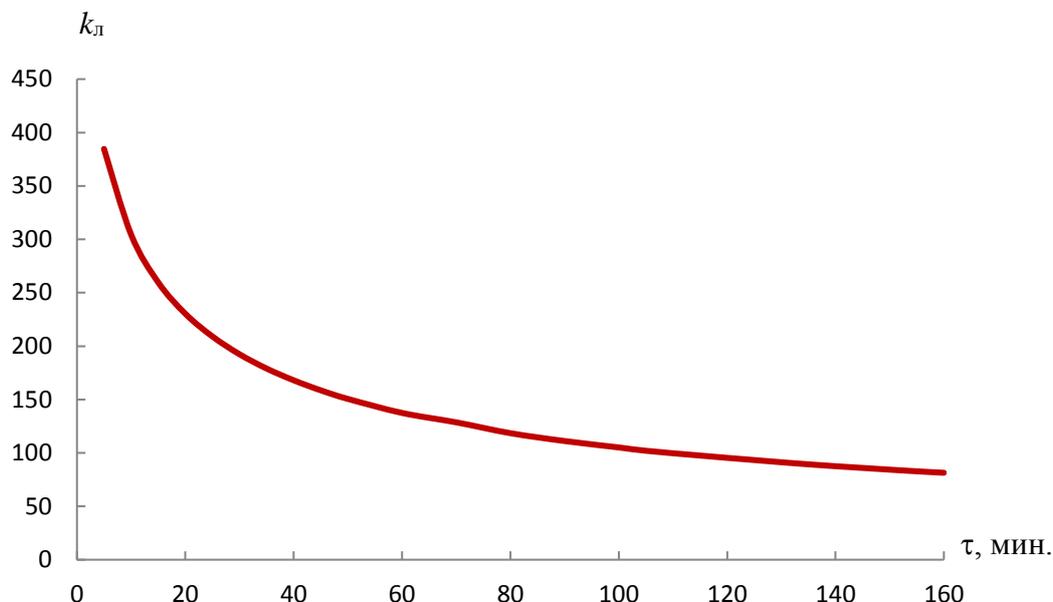


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента снижения плотности лучистого теплового потока от времени

Из рисунка 2.6 видно, что коэффициент снижения плотности лучистого теплового потока существенно зависит от времени с начала «стандартного» пожара.

Ниже приведены данные об изменении коэффициента снижения плотности лучистого теплового потока в зависимости от времени и температурных параметров (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Изменение коэффициента снижения плотности теплового потока в зависимости от времени и температуры

Промежуток времени от начала испытаний, мин.	Диапазон изменения среднеобъемной температуры, °С	Коэффициент снижения плотности лучистого теплового потока, $k_{л}$
$0 < \tau < 20$	$20 < T < 814,6$	$380 \div 230$
$20 \leq \tau < 40$	$814,6 \leq T < 884,7$	$230 \div 170$
$40 \leq \tau < 60$	$884,7 \leq T < 945,3$	$170 \div 140$
$60 \leq \tau < 80$	$945,3 \leq T < 988,4$	$140 \div 120$
$80 \leq \tau < 100$	$988,4 \leq T < 1021,8$	$120 \div 105$
$100 \leq \tau < 120$	$1021,8 \leq T < 1055,2$	$105 \div 95$
$120 \leq \tau < 140$	$1055,2 \leq T < 1092,1$	$95 \div 90$
$140 \leq \tau < 160$	$1055,2 \leq T < 1092,1$	$90 \div 80$

Таким образом, в случае «стандартного» пожара коэффициент ослабления лучистого теплового потока рассматриваемой преградой изменяется в зависимости от времени с начала горения и его минимальное значение равно $k_{л} = 80$.

ГЛАВА 3 СРЕДСТВА РАСПЫЛЕНИЯ ВОДЫ

3.1 Выбор способа распыления и вида распылителя

Процесс распыления струи жидкости заключается в дроблении струи (или пленки) жидкости на большое число капель и распределении их в пространстве [97, 98]. Сложный комплекс явлений, сопровождающих этот процесс, затрудняет создание надежной теории. В настоящее время существуют следующие основные точки зрения на механизм распыления [99–104]:

– распад под влиянием осесимметричных возмущений, возрастающих под воздействием капиллярных сил, может быть распространен на тонкие струи, движущиеся с малыми скоростями;

– распад под воздействием турбулентных пульсаций, приводящих к отрыву отдельных частиц жидкости;

– распад под воздействием кавитационных явлений, возникающих вследствие колебательных процессов, которые сопровождают течение жидкости перед распылением;

– распад под влиянием внешних инерционных сил, роль которых становится весьма существенной при высоких скоростях истечения.

Независимо от предлагаемого механизма (образование поверхностных микроволн, турбулентность жидкости, кавитация) причиной образования капель является колебательный процесс, развивающийся вблизи среза сопла распылителя. Основным внешним фактором считается воздействие на поверхность струи аэродинамической силы, стремящейся деформировать и разорвать струю. Внутренними причинами являются различного рода начальные возмущения, связанные с конструкцией распылителя, качеством его изготовления, нарушением цилиндрической формы струи при выходе из сопла, вибрации сопла и др. Под влиянием всех этих причин частицы жидкости, прилегающие к поверхности струи (пленки), смещаются, поверхность деформируется и отклоняется от равновесной формы.

Увеличение свободной энергии поверхности, связанное с деформацией струи, ведет к проявлению действия молекулярных сил, стремящихся сократить общую поверхность струи и придать ей форму, соответствующую равновесию. Частицы жидкости, выведенные из равновесного положения, стремятся вновь вернуться к нему. Проходя через положения равновесия по инерции, они вновь испытывают действие восстановительных сил и т. д. В результате таких возмущений на поверхности струи (пленки) возникают колебания, которые из-за существования множества возмущений могут накладываться друг на друга. При этом они могут затухать или возрастать в зависимости от физических параметров струи и окружающей среды, а также от условий истечения. С ростом амплитуды колебаний устойчивость струи нарушается, и она распадается на отдельные частицы.

Из физических параметров на распад струи жидкости наиболее существенно влияют вязкость ($\mu_{ж}$) и поверхностное натяжение (σ), а также плотности жидкости ($\rho_{ж}$) и окружающего газа ($\rho_{г}$). Вязкость оказывает стабилизирующее влияние на распад струи. При увеличении поверхностного натяжения наблюдается общее замедление распада струи (пленки) жидкости.

Значительное влияние на распад струи оказывает отношение плотностей газа и жидкости ($\rho_{г}/\rho_{ж}$) и критерий Вебера:

$$w_e = (w_{ж}\rho_{ж}d_{стр})/\sigma, \quad (3.1)$$

где $w_{ж}$ – относительная скорость струи; $d_{стр}$ – диаметр струи.

Из режимных параметров наиболее существенным является относительная скорость движения струи (пленки) жидкости в газовом потоке, которая, в свою очередь, во многом определяется способом распыления. Чаще всего распыление классифицируют исходя из условий перемещения струи. Учитывая это, можно выделить следующие способы распыления жидкости: гидравлическое, механическое, пневматическое, пульсационное, ультразвуковое и электрическое.

Гидравлическое распыление. По этому способу жидкость дробится за счет давления нагнетания при свободном распаде струи (пленки или первичных крупных капель), вытекающей с большой скоростью из соплового отверстия распылителя.

Распыливающие устройства, с помощью которых реализуется этот способ, широко известны под названием механических (гидравлических) форсунок. В зависимости от скорости истечения жидкости из форсунки различают несколько видов распада струи (рисунок 3.1).

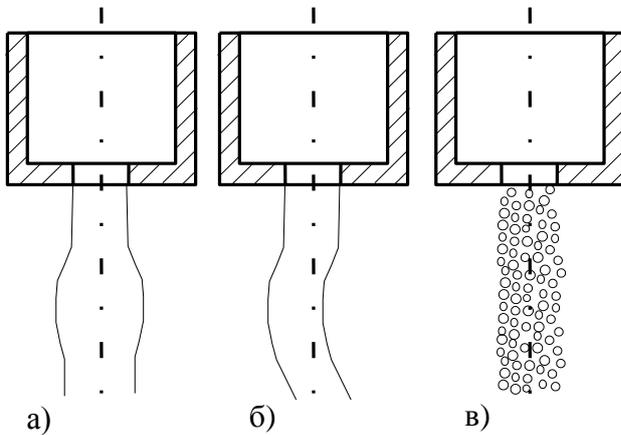


Рисунок 3.1 – Виды распада жидкостной струи при гидравлическом распылении:
а) осесимметричный распад;
б) волнообразный распад;
в) распыление

При малых скоростях струя на некотором расстоянии от сопла благодаря возникающим осесимметричным деформациям, амплитуда которых постепенно возрастает, распадается на отдельные крупные капли равных диаметров. С увеличением скорости истечения жидкости возникают волнообразные деформации, ось струи искривляется, эти деформации усиливаются и приводят к волнообразному распаду. Наконец, при дальнейшем увеличении скорости струи длина распавшегося участка резко сокращается и струя начинает распадаться вблизи сопла. Последний вид распада называют распылением. Аналогично распадаются жидкостные пленки.

Результаты опытов, проведенных в лабораториях сверхвысоких давлений РАН [99], показали, что не распавшийся участок струи сохраняется даже при очень высоких давлениях. По оценочным расчетам, нарушение сплошности для воды наблюдается примерно при давлении $5 \cdot 10^5$ кПа.

Распад капель также зависит от скорости истечения. При малой скорости капли не дробятся и увлекаются воздухом. С увеличением скорости капли теряют устойчивость и распадаются на более мелкие. При очень больших скоростях капля под влиянием перепада давления на ее поверхности образует тело, похожее на эллипсоид, которое быстро сплющивается в центре и превращается в жидкое

кольцо с тонкой оболочкой, носящей название «мешок». Диаметр кольца все более увеличивается, «мешок» разрушается и появляется множество мельчайших капель. Наконец и само кольцо дробится на мелкие капли.

Гидравлическое распыление является наиболее экономичным (2–4 кВт на 1 т жидкости), однако создаваемый при этом распыл довольно грубый и неоднородный, затруднено регулирование расхода при заданном качестве дробления, а также распыление высоковязких жидкостей в холодном состоянии. Вместе с тем, этот способ наиболее широко распространен вследствие сравнительной его простоты.

Механическое распыление осуществляется с помощью механизмов, вращающихся от специального привода. Жидкость приобретает кинетическую энергию вследствие действия центробежных сил. Как и в случае гидравлического распыления, в зависимости от конструкции распыляющего механизма (диск, стакан, конус и др.), дроблению подвергается струя или пленка жидкости. Характер дробления жидкости в данном случае, в значительной мере, определяется ее расходом. При очень малом расходе на кромке вращающегося диска возникает жидкий тор, который под действием центробежных сил деформируется и на нем образуются шаровидные узлы, которые затем отрываются в виде отдельных капель. При увеличении расхода эти узлы вытягиваются в тонкие струи и нити. Число нитей увеличивается, достигая постоянной величины. При дальнейшем увеличении расхода нити не могут пропустить всю жидкость из тора, он сбрасывается с кромки и образует пленку. Вначале эта пленка вытягивается на определенное расстояние от кромки, затем распадается на нити и крупные капли.

К достоинствам этого способа следует отнести возможность распыления высоковязких и загрязненных жидкостей и широкого регулирования производительности распылителя без существенного изменения дисперсности. К основным недостаткам относятся дороговизна вращающихся распылителей, которые сложны в изготовлении и эксплуатации, более энергоемки (15 кВт на 1 т жидкости) и, кроме того, обладают вентиляционным эффектом. Механическое распыление используют главным образом для дробления вязких жидкостей и суспензий.

Пневматическое распыление. В этом случае диспергирование является следствием динамического взаимодействия потока распыляемой жидкости с потоком распыливающего газа (пара). Последний выходит из канала с большой скоростью (50–300 м/с), скорость же истечения струи жидкости невелика. При большой относительной скорости потоков между струями газа и жидкости возникает трение, вследствие чего струя жидкости, будучи как бы закрепленной с одной стороны, вытягивается в отдельные тонкие нити. Эти нити в местах утоньшения быстро распадаются и образуют мелкие капли. Длительность существования статически неустойчивой формы в виде нитей зависит от скорости газа и физических свойств жидкости. Чем больше скорость, тем тоньше нить, тем меньше период ее существования и тем более дисперсным получается распыл.

К достоинствам пневматического способа относятся малая, по сравнению с гидравлическим, зависимость качества распыления от расхода жидкости, надежность в эксплуатации, возможность распыления высоковязких жидкостей. Недостатки: повышенный расход энергии на распыление (50–60 кВт на 1 т жидкости), необходимость в распыливающем агенте и в связанном с ним оборудовании.

Электрическое распыление. Струю (пленку) жидкости подают в область сильного электрического поля. Под действием этого поля на поверхности жидкости происходит некоторое распределение давления, которое деформирует струю. Деформации могут достичь большой амплитуды и привести к образованию тонких струй, которые затем дробятся.

Недостатки электрического распыления: необходимость в громоздком и дорогостоящем оборудовании, его высокая энергоемкость, а также весьма незначительная производительность и сложность обслуживания. Вместе с тем, этот метод находит применение в некоторых распылительных сушилках и в процессах окраски методом распыления.

Ультразвуковое распыление. Различают две схемы ультразвукового распыления. В первом случае струя (пленка) жидкости подается на колеблющийся элемент пьезоэлектрического или магнитострикционного генератора, во втором – она подвергается действию ультразвуковых колебаний воздуха.

По сущности протекающих процессов – это два различных способа, которые объединяет лишь наложение на жидкость колебаний сверхзвуковых частот. Поэтому первый способ распыления называется ультразвуковым, а второй – акустическим.

Недостатками пьезоэлектрических и магнитострикционных устройств являются их малая производительность (от 0,5 до 6,0 л/ч) и необходимость применения сложного дорогостоящего оборудования. Ультразвуковое распыление является более экономичным и перспективным по сравнению с пневматическим, хотя и сохраняет все недостатки последнего. Однако конструкция ультразвуковых распылителей несколько сложнее.

Пульсационное распыление заключается в том, что возмущения, вызывающие дробление струи (пленки) жидкости, усиливаются за счет пульсаций давления и изменения расхода, которые создаются периодическим перекрытием проходных каналов (или соплового отверстия) распылителя. Пульсации давления приводят к увеличению поверхностной энергии струи, быстрой потере устойчивости и, как следствие, к более тонкому распылению, чем при первых трех способах.

Пульсационное распыление может сочетаться с любым из рассмотренных выше способов, то есть может быть реализовано пульсационно-гидравлическое, пульсационно-механическое, пульсационно-пневматическое распыление и т. д. При этом преимущества того или иного способа дополняются повышением качества и однородности дробления, происходящем в ряде случаев без увеличения энергозатрат и при незначительном усложнении конструкции распылителей.

Анализ рассмотренных выше способов распыления жидкостей позволяет сделать следующие выводы:

– течение жидкости перед распылением должно быть преобразовано в такие формы (струя, пленка), которые обладают наибольшей поверхностной энергией, а поэтому неустойчивы и быстро распадаются;

– распыление жидкости при любых способах обусловлено потерей устойчивости течения в струях или пленках в связи с возникновением на поверхности раздела жидкости и газа неустойчивых волн.

В зависимости от конкретных условий производства и требований к качеству и дисперсности готового продукта наиболее экономичным может оказаться любой из рассмотренных способов.

3.1.1 Характеристики распылов

От качества распыления жидкости зависит эффективность многих технологических процессов в аппаратах и системах различных отраслей народного хозяйства. Многообразие требований, предъявляемых к процессу распыления жидкостей при решении конкретных технических задач, вызвало необходимость всесторонних исследований процесса распыления как физического явления, которое обуславливает следующие основные показатели [97–104]:

- дисперсные характеристики, определяющие распыл как некоторую совокупность частиц различных размеров;
- характеристики распределения, показывающие распределение капель жидкости по сечению факела распыла;
- характеристики формы, позволяющие оценить размеры и конфигурацию факела;
- расходные характеристики, обеспечивающие возможность определения пропускной способности распыливающего устройства;
- гидродинамические параметры, характеризующие распыл как некоторую динамическую двухфазную систему, состоящую из капель и газа (который заключен в полости факела) и взаимодействующую с окружающим газом;
- энергетические характеристики, определяющие экономическую эффективность способа распыления и конструкцию распыливающего устройства.

При этом, важно отметить, что только расходные и энергетические характеристики связаны с конструкцией распыливающего устройства, а все остальные относятся к уже сформировавшемуся распылу [36, 97, 101].

Рассмотрим более подробно выше перечисленные показатели.

Дисперсные характеристики. Форсунки, как известно, дробят жидкость на миллиарды капель различных размеров, суммарная поверхность которых измеряется десятками квадратных метров. Степень распыления (дисперсности) определяют методами математической статистики.

Весь спектр капель разбивают на ряд фракций с постоянным шагом Δd , определяемым шириной спектра, то есть разностью между максимальным и минимальным диаметрами капель в распыле таким образом, чтобы число фракций было достаточно велико (обычно от 10 до 15 и более). В качестве диаметра, характеризующего фракцию, как правило, принимается его среднеарифметическое значение, обозначаемое d_i , где индекс i – номер фракции. Таким образом, непрерывная совокупность капель заменяется некоторой дискретной последовательностью с определенной численностью частиц, соответствующей каждому интервалу.

Теперь, если нанести на график число капель (n_i), имеющих диаметр d_i , то получим кривую распределения числа капель по диаметрам, которую принято называть кривой частот. Если нанести на график суммарное число капель с диаметрами, меньшими данного (d_i), то получим суммарную кривую распределения числа капель по диаметрам.

Чаще всего используют относительные частоты распределения числа (или поверхности или объема) капель по диаметрам. Тогда при $P = 0$ получаем кривую относительных частот распределения числа капель (I_0); при $P = 2$ – кривую относительных частот распределения поверхностей капель (I_2); при $P = 3$ – кривую относительных частот распределения объемов капель (I_3). Эти кривые называют дифференциальными кривыми распределения.

В практике обычно используют суммарные (интегральные) кривые распределения, которые менее чувствительны к колебаниям числа и размера капель и легче «выравниваются» при графическом интегрировании. Суммарные кривые показывают относительное количество (поверхность, объем) капель, диаметры которых меньше заданного.

Для описания кривых распределения предложены различные зависимости. Наибольшее распространение нашло уравнение Розина-Раммлера [100, 101], которое хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными, полученными для самых различных распылителей:

$$R_3 = \exp[-(d_i / a_m)^n], \quad (3.2)$$

где R_3 – объемная доля капель, диаметр которых больше d_i ; a_m – постоянная размера, то есть средний диаметр капель, соответствующий определенному значению $R_3(0,3679)$; n – постоянная распределения, характеризующая степень разнородности распыла.

При $d_i = a_m$ имеем $R_3 = 0,3679$, то есть 36,79 % (масс.) капель имеют диаметр больше d_i . При наличии опытной кривой распределения константы a_m и n легко находятся.

Таким образом, дисперсность распыла можно полностью оценить, если известны константы в уравнении кривой распределения и два средних диаметра. Задача значительно упрощается, когда распределение подчиняется уравнению Розина-Раммлера, так как оно позволяет определить любой средний диаметр.

В инженерной практике часто не представляется возможным экспериментально исследовать мелкость распыления. Для определения дисперсных характеристик используют эмпирические (критериальные) уравнения, связывающие эти характеристики с основными факторами и полученные при обобщении экспериментальных материалов для каждой конструкции или класса распылителей. К основным факторам относятся: геометрические параметры распылителя, скорость истечения жидкости, ее физические свойства, а также физические свойства окружающего газа. Геометрические параметры зависят, прежде всего, от типа и конструкции распыливающего устройства, более подробному рассмотрению которых, посвящены последующие разделы настоящей работы. Из физических свойств жидкости наиболее существенными являются вязкость и поверхностное натяжение, а из физических свойств газа – вязкость и плотность. Ниже рассматриваются некоторые основные факторы, влияющие на дисперсность [97, 99, 102–104].

Влияние вязкости жидкости. При увеличении вязкости распыливаемой жидкости распыл становится более грубым, но и более однородным. Однако, показатель степени при $\mu_{ж}$ колеблется в широких пределах (от 0,2 до 0,9), что объясняется зависимостью степени влияния вязкости от диапазона и области ее варьирования. При малых вязкостях (до 300–500 Па·с) ее влияние незначительно, но при дальнейшем увеличении оно начинает быстро возрастать.

Влияние поверхностного натяжения. В процессе дробления жидкости с возрастанием поверхностного натяжения размер капель увеличивается.

Влияние плотности жидкости. Роль плотности жидкости достаточно мала, что объясняется ее изменением в малом диапазоне практически для всех распыляемых жидкостей.

Влияние вязкости газа. Увеличение вязкости газовой среды вызывает некоторое уменьшение размера капель.

Влияние плотности газа. При струйном истечении жидкости из распылителя в случае увеличения плотности (давления) газовой среды, в которую распыляется жидкость, в 2–3 раза, размер капель несколько уменьшается. При дальнейшем же ее увеличении (в 6–20 раз) диаметр капель перестает зависеть от изменения плотности газа.

Влияние скорости истечения жидкости. Качественная зависимость мелкости распыления от скорости истечения хорошо согласуется с экспериментальными данными. С увеличением скорости истечения жидкости размер капель уменьшается вначале быстро, а затем, более плавно.

Таким образом, необходимо отметить, что при выборе той или иной зависимости для расчета дисперсных характеристик нужно учитывать не только конструкцию распылителя и режим его работы, но и физические свойства распыляемой жидкости и газовой среды.

Характеристики распределения. Распределение жидкости в факеле распыла характеризуется полем удельных потоков плотностей орошения в различных точках факела. Удельным потоком жидкости называют отношение ее секундного расхода к величине площадки, перпендикулярной направлению движения капель.

Поскольку траектории полетов капель значительно отличаются от прямолинейных траекторий, на практике удельным потоком считают отношение секундного расхода жидкости к величине площадки, перпендикулярной оси сопла, то есть $q = \Delta V_{\text{ж}} / \Delta f$.

Качественно оценить характер распределения можно по графикам, а для количественной оценки используются коэффициенты радиальной ($k_{\text{рп}}$) и окружной ($k_{\text{а}}$) неравномерности. Радиальную неравномерность называют иначе степенью заполнения факела, которая показывает, насколько поле удельных потоков в контрольном сечении отличается от идеального равномерного распределения, для которого $q = \text{const}$. Окружная неравномерность показывает, насколько факел распыла симметричен относительно его оси. Поэтому коэффициент окружной неравномерности называют еще показателем асимметрии.

Характеристики распределения обуславливаются, прежде всего, классом и конструкцией распыляющего устройства, а, количественно, еще и расстоянием от распылителя до контрольного сечения, так как все распылы при удалении от распылителя имеют склонность к выравниванию. Некоторому выравниванию способствует также и увеличение скорости истечения.

Характеристика формы. К характеристикам формы относятся угол, дальнобойность и диаметр факела. За величину угла факела (β), как правило, принимается угол вылета капель из распылителя (рисунок 3.2), который также принято называть корневым. Корневой угол факела зависит главным образом от класса и конструкции распыливающего устройства. Он мало зависит от физических свойств жидкости (за исключением очень высокой вязкости) и незначительно изменяется при изменении скорости истечения, причем в зависимости от распределения жидкости в факеле он может при этом несколько увеличиваться или уменьшаться. Дальнобойность факела определяется как расстояние ($L_{\text{ф}}$) от кромки распылителя, горизонтально установленного на высоте H_0 от плоскости выпадения капель, до перпендикуляра, восстановленного из центра сечения факела этой плоскостью (рисунок 3.3). Дальнобойность факела зависит, в основном, от скорости истечения и размера капель.

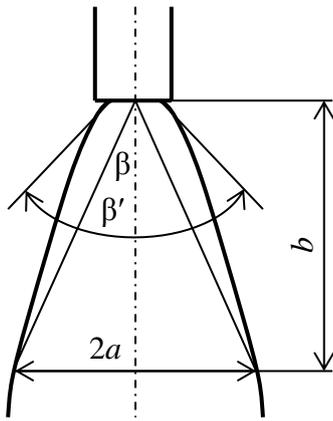


Рисунок 3.2 – Определение корневого угла факела

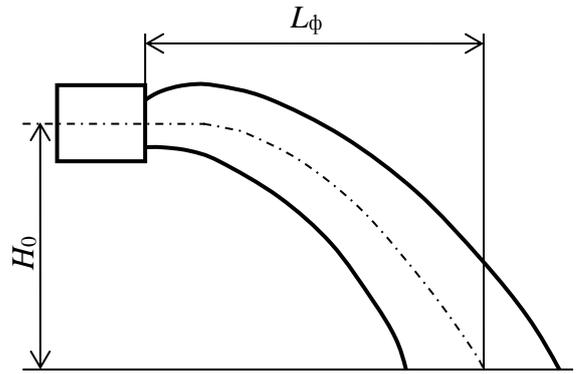


Рисунок 3.3 – Определение дальности факела

Как характеристику диаметр факела можно определить однозначно только при направлении распыла вертикально сверху вниз на таком расстоянии от распылителя, когда факел с достаточной точностью можно считать цилиндрическим. Иногда за диаметр факела принимают диаметр сечения D_{99} , внутри которого протекает не менее 99 % всей жидкости. В этом случае необходимо оговаривать положение контрольного сечения и направление распыления.

Гидродинамические параметры. К ним относятся: скорость капель ($w_{ж}$) и газа (w_r) в любом сечении факела, а также порозность факела ($\varepsilon_{ф}$), определяемая как отношение объемного расхода газа через какое-либо сечение к суммарному объемному расходу жидкости и газа через это же сечение. Гидродинамические параметры описывают формирование и развитие двухфазной газожидкостной системы и определяются начальной скоростью жидкости и формой факела, а также свойствами газовой среды, аэродинамической обстановкой на границе распыла, размером частиц и некоторыми другими факторами. Они необходимы для расчета тепло-массообменных процессов, протекающих в распылах.

Расходные характеристики. Теоретически расход жидкости через распылитель определяется как произведение скорости истечения на площадь выходного сечения. Практически расход заметно отличается от этой величины, поскольку скорость истечения обычно меньше теоретически возможной, а рабочее сечение часто используется не полностью вследствие сжатия струи или образования воздушного вихря.

Отношение действительной скорости истечения $w_{\text{жд}}$ (часто обозначаемой просто $w_{\text{ж}}$) к теоретической, называется коэффициентом скорости: $\varphi = w_{\text{ж}} / w_{\text{т}}$.

Отношение площади сечения струи (пленки) жидкости на выходе из распылителя к площади сечения выходного отверстия распылителя (для дисковых распылителей – к площади, равной произведению периметра диска на теоретически возможную толщину пленки) называют коэффициентом заполнения сечения (ε).

Произведение коэффициента скорости на коэффициент заполнения сечения показывает во сколько раз действительный расход отличается от теоретически возможного. Это произведение называется коэффициентом расхода:

$$\mu = \varphi \varepsilon. \quad (3.3)$$

Коэффициент расхода зависит от класса и конструкции распылителя, качества его изготовления, скорости истечения и вязкости жидкости.

Коэффициент скорости имеет и самостоятельное значение. Он позволяет определить действительную скорость истечения по теоретической, которую нетрудно рассчитать. Скорость истечения жидкости является необходимым начальным условием для гидродинамического расчета распыла.

Энергетические характеристики необходимы для оценки экономичности того или иного способа распыления и распыливающего устройства. Иногда экономичность распылителей оценивают по величине энергозатрат на распыление 1 м³ (или 1 т) жидкости. Так указывают, что один распылитель требует больших энергозатрат на распыление, чем другой. При сравнении энергозатрат необходимо учитывать качество распыления, то есть судить о затратах энергии при условии одинаковой дисперсности.

Для оценки совершенства какого-либо распыливающего устройства можно ввести понятие коэффициента полезного действия. За идеальный распылитель принимают устройство, в котором вся энергия, затрачиваемая на распыление, преобразуется в кинетическую энергию жидкости, то есть определяющим параметром является скоростной напор струи.

Рассмотрим, на какие виды расходуется энергия, поступающая для распыления в реальное устройство.

1) Энергия, необходимая для преодоления поверхностного натяжения при образовании развитой поверхности капель (энергия распыления):

$$E_p = \sigma S_k, \quad (3.4)$$

где S_k – суммарная поверхность образовавшихся капель.

2) Энергия, необходимая для сообщения жидкости поступательного движения (гидравлическая энергия):

$$E_r = (m_{ж} w_{ж}^2) / 2. \quad (3.5)$$

3) Энергия, необходимая на преодоление сил трения в распылителе, и энергия диссипации (энергия потерь, E_n). Полную энергию, подводимую к распылителю, обозначим E . Тогда, исходя из приведенного определения идеального распылителя, можно вывести два понятия коэффициента полезного действия: КПД распыления (η_p) и гидравлический КПД (η_r).

Гидравлический КПД равен отношению E_r / E . Переходя к мощностям действительной и идеальной струи, и учитывая, что:

$$N_r = (V_r \rho_{ж} w_r^2) / 2; \quad (3.6)$$

$$N_d = (V_{ж} \rho_{ж} w_{ж}^2) / 2; \quad (3.7)$$

$$V_{ж} = \mu V_r; \quad (3.8)$$

$$w_{ж}^2 = \varphi w_r^2, \quad (3.9)$$

получим:

$$\eta_r = \mu \varphi^2 = \varepsilon \varphi^2. \quad (3.10)$$

КПД распыления равен отношению E_p / E , или иначе:

$$\eta_p = 12\sigma / (d_{ср} \rho \varphi^2 w_r). \quad (3.11)$$

Энергия, затрачиваемая на образование новой поверхности, весьма невелика – КПД распыления не превышает обычно сотых долей процента (наибольший КПД у гидравлических форсунок – порядка 0,04 %) и зависит, прежде всего, от физических свойств жидкости.

Гидравлический КПД характеризует потери энергии в распылителе и зависит, главным образом, от его конструкции, качества изготовления и скорости жидкости.

3.1.2 Классификация форсунок

Четкая классификация форсунок позволяет правильно подойти к выбору принципиальной схемы, конструированию и применению такого рода устройств в конкретных аппаратах. Наиболее правильной является классификация, основанная на принципе работы форсунки. По этому принципу гидравлические форсунки можно разделить на шесть основных классов: струйные, центробежные, центробежно-струйные, ударно-струйные, с соударением струй и комбинированные. Рассмотрим принцип работы форсунок из числа предлагаемых классов [97–104].

Струйные форсунки представляют собой насадок с цилиндрическим соплом (или несколькими соплами), из которого вытекает струя жидкости, распадающаяся на капли относительно крупного размера и образующая факел с малым корневым углом и значительной дальностью струи (рисунок 3.4).

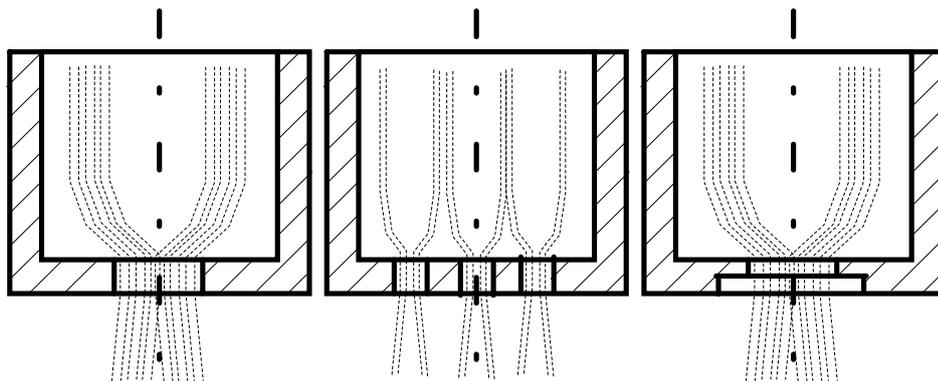


Рисунок 3.4 – Схематическое изображение струйных форсунок

К струйным относятся также веерные форсунки, у которых на торцевой стороне насадка выполнены прорезы или каналы. Иногда выходное сопло выполняют в виде щели – щелевые форсунки. В этом случае жидкость истекает из сопла форсунки, образуя плоскую струю в виде веера, которая затем распадается на капли.

Центробежные форсунки. В этих форсунках создается закрутка подаваемой через нее жидкости (рисунок 3.5). В сопловом канале, вдоль его стенки, жидкость движется в виде вращающейся пленки, а центр заполняет так называемый воздушный вихрь. При истечении из сопла жидкостная пленка распадается, образуя факел в виде полого конуса.

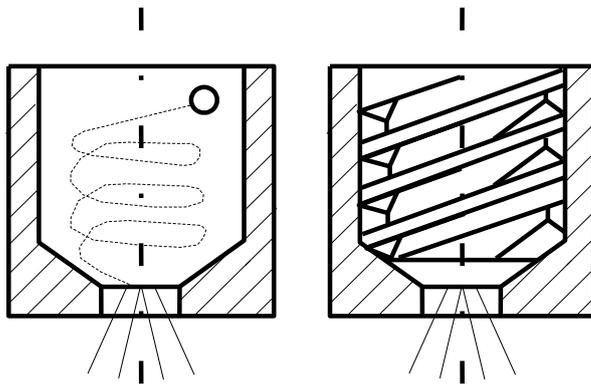


Рисунок 3.5 – Схематическое изображение центробежных форсунок

По способу получения закрутки потока жидкости центробежные форсунки делятся на тангенциальные, с завихрителем-шнеком и спиральные (эвольвентные). В центробежной тангенциальной форсунке жидкость входит в полость форсунки через отверстие, ось которого перпендикулярна оси форсунки, но не пересекается с ней. В результате этого жидкость получает закрутку относительно оси форсунки. В центробежной форсунке с завихрителем закрутка создается с помощью цилиндрической вставки с винтовой нарезкой на ее наружной поверхности. Двигаясь по винтовой нарезке, жидкость приобретает закрутку относительно оси форсунки. В эвольвентной форсунке канал для подвода жидкости переходит в спираль с сопловым отверстием с одной или двух сторон.

Центробежно-струйные форсунки. Форсунки этого класса отличаются от центробежных наличием двух потоков подводимой жидкости. Часть жидкости подводится тангенциально в камеру закручивания или проходит по винтовым периферийным каналам вставки, образуя вращающийся поток. Другая часть проходит через центральное отверстие вставки, образуя сплошную струю, причем ее диаметр должен быть несколько больше внутреннего диаметра кольцевого потока, вращающегося в сопловом канале. Тогда за счет взаимодействия вращающаяся жидкость будет закручивать центральную струю, создавая единый поток, который на выходе из сопла образует факел в виде сплошного конуса.

Ударно-струйные форсунки. В этих форсунках распыление происходит вне корпуса насадка за счет удара струи об отражатель, расположенный напротив соплового отверстия. В зависимости от конструкции отражателя образуется факел в виде одиночного полого конуса (нескольких конусов), как бы вставленных друг в друга.

В первом случае отражатель выполняется сплошным и может иметь различные конфигурации, во втором – со струи последовательно «срезаются» внешние слои жидкости при ее прохождении через расположенные друг под другом отражатели с отверстиями в центре. У каждого последующего отражателя диаметр отверстия несколько меньше, чем у предыдущего.

Форсунки с соударением струй. Работа этих форсунок основана на взаимном разбивании струй на отдельные капли за пределами корпуса форсунки. Из точки столкновения двух струй жидкость растекается радиально, образуя пленку, распадающуюся на капли. Сечение такого факела имеет эллиптическую форму. При столкновении трех и более струй форма факела становится конической. Конструктивно форсунки выполняются с одной парой (тройкой и т. д.) сталкивающихся струй или с несколькими парами струй.

Комбинированные форсунки. Эти форсунки состоят из двух или более различных по принципу действия форсунок, объединенных общим корпусом, в зависимости от требований, предъявляемых к распылу, и условий работы. Чаще всего комбинируются центробежная форсунка и форсунка с соударением струй или центробежно-струйная форсунка и форсунка с соударением струй.

Кроме сказанного выше все форсунки в своих классах можно также подразделять и на подклассы. В настоящее время существует достаточно большое количество конструктивных схем форсунок, некоторые из которых даже выпадают из данной классификации.

3.1.3 Обоснование способа распыления жидкости

Как указано выше, существует шесть способов распыления жидкости. Учитывая назначение конструируемого стенда, такие способы распыления, как механическое, пневматическое, электрическое и ультразвуковое, можно исключить из рассмотрения. Для создания электрического и ультразвукового распыления необходимо использовать либо электрическое, либо ультразвуковое поле,

что является неприемлемым, так как требует применения электрического оборудования. Механическое распыление сопряжено с применением специальных механизмов, осуществляющих вращение распыливающего устройства, что приводит к применению в данном способе дополнительного оборудования, как правило, электрического. Пневматическое же распыление не применимо вследствие того, что в данном способе используется газ для улучшения качества распыла. Применение газов в данной системе может привести к снижению кратности тепловых потоков. Тем самым, с одной стороны пневматическое распыление будет улучшать качество распыла, вследствие чего будет происходить увеличение кратности тепловых потоков, а с другой стороны применение газов будет вести к снижению кратности тепловых потоков, в результате, основное преимущество пневматического распыления нивелируется.

Применение пульсационного распыления связано с применением оборудования, регулирующего изменение давления и расхода жидкости, которую приводят к пульсациям, улучшающим качество распыла жидкости. Использование данного способа распыления, бесспорно, приводит к улучшению качества распыла, но, в свою очередь, влечет за собой увеличение энергозатрат и значительно усложняет конструкцию распылителя.

В результате проведенного анализа форсунок выбор был остановлен на гидравлическом способе распыления жидкости. Данный способ дает возможность получить достаточно хорошее качество распыления, а также технологически упрощает изготовление распылителя, позволяет выйти на оптимальную величину КПД распыления, снизить до минимума энергозатраты, в связи с чем способ является экономически обоснованным и соответствует требованиям, предъявляемым к качеству распыления.

Гидравлический способ распыления жидкости реализуется средствами гидравлических форсунок. В зависимости от условий распыла и требований к качеству распыла имеет смысл рассмотреть различные классы гидравлических форсунок применительно к поставленной задаче.

Как отмечено выше, гидравлические форсунки делят на шесть классов. Рассмотрев достоинства и недостатки всех шести классов гидравлических форсунок, можно сделать следующие выводы о возможности их использования в данных условиях.

Использование ударно-струйных форсунок исключено в связи с тем, что в процессе распыления используются отражатели, которые могут привести к возникновению тепловых потоков на границе распыла, так как за пределами модуля имеется достаточно большое количество лучистой энергии.

Использование центробежных и центробежно-струйных форсунок, как правило, обусловлено использованием смесеобразования различных видов жидкости, поэтому применение форсунок данных классов не представляется рациональным в условиях поставленной задачи.

Работа форсунок с соударением струй основана на взаимном разбиении струй на отдельные капли. Данный процесс является эффективным только при использовании больших давлений жидкости в системе подачи. Учитывая, что насосы, применяемые в пожарных системах, обеспечивают сравнительно небольшое давление подачи жидкости (в среднем 5 атм), то применение форсунок данного класса неприемлемо.

В результате, наиболее подходящим классом распылителей является класс струйных форсунок. Как указано выше, этот класс форсунок включает в себя три их вида: веерные; щелевые; струйные.

Для использования форсунок в конструируемом стенде их продольная дальность должна быть не более 1 м. В связи с этим, использование собственно струйных форсунок, является нерациональным.

Использование веерных форсунок сопряжено с достаточно сложным технологическим процессом изготовления данных устройств, что в условиях серийного производства приведет к достаточно высокой стоимости данного вида форсунок.

Таким образом, наиболее целесообразным является применение щелевых форсунок.

3.2 Конструкция форсунки

Одним из главных условий эффективной работы защитного экрана, то есть уменьшения теплового потока, проходящего сквозь экран, является повышение степени поглощения и рассеяния энергии теплового излучения паро-капельно-воздушной смесью, создаваемой в межсеточном пространстве. Очевидно, что эффективность такой защиты зависит от многих факторов, в числе которых следует, в первую очередь, отметить:

- диаметр капель смеси;
- статистическое распределение капель различных диаметров в потоке распыляемой воды, то есть их количественный состав в процентном отношении;
- равномерность распределения паро-капельно-воздушной смеси в объеме межсеточного пространства;
- расход воды в единицу времени.

Исходя из этого, поиск наиболее эффективной конструкции форсунки, отвечающей всем перечисленным требованиям, сводится к задаче по оптимизации этих важных факторов. Известно, что наибольшей рассеивающей способностью обладают капли с диаметром, сравнимым или близким к длине волны ИК-области спектра ($\lambda \approx 3\text{--}15$ мкм) [97, 101]. Однако получение таких капель в преобладающем процентном отношении сопряжено с рядом объективных трудностей, к числу которых следует отнести, в первую очередь, необходимое высокое давление воды в системе на уровне 150 атм (15 МПа), в то время как среднее значение давления, обеспечиваемое пожарными насосами, лежит в пределах 5–12 атм (до 1,2 МПа) и реальное среднее значение диаметров капель составляет 300–600 мкм. Тем не менее, как показали предварительные оценочные эксперименты с наиболее приемлемой конструкцией форсунки, даже при давлениях на уровне 3–5 атм в потоке распыляемой воды присутствует около 10–15 % капель с диаметром порядка 15–20 мкм. Эта фракция капель, представляющая собой водяную пыль, в силу своей малой массы и, соответственно, импульса, распыляется, в основном, на небольшое расстояние (до 0,5 м).

Важным фактором от которого зависит эффективность рассеивающего эффекта является равномерность распределения паро-капельно-воздушной смеси в объеме межсеточного пространства, что, в свою очередь, ставит вопрос об оптимальном расположении форсунок и их ориентации. Одно из условий – обеспечение взаимоперекрывания потоков от разных форсунок, что позволит, во-первых, увеличить плотность смеси в объеме, а, во-вторых, уменьшить вероятность образования «мертвых зон», где эта плотность сравнительно низка или близка к нулю.

Исходя из выше указанных факторов, велся поиск оптимальной конструкции форсунки. В общей сложности были проверены около 50 вариантов двух базовых типов форсунок. Первый тип форсунки представлен на рисунке 3.6.

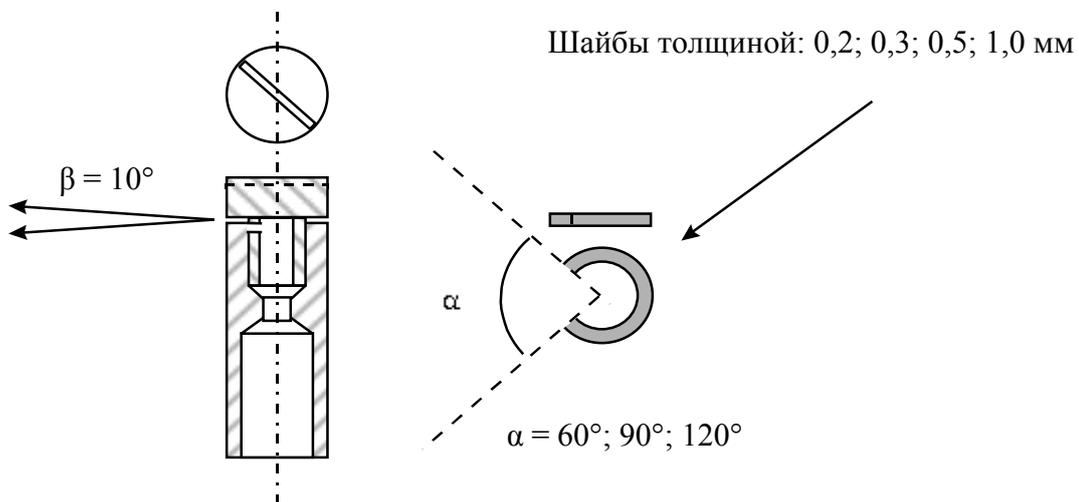


Рисунок 3.6 – Первый тип форсунки, испытанный на годность для применения в испытательном стенде

Форсунка состоит из цилиндрического корпуса диаметром 14 мм и высотой 35 мм с навинчивающейся головкой, имеющей отверстие диаметром около 1 мм. Высота щели регулируется металлическими прокладками в виде шайб с секторным вырезом. Были проведены испытания форсунок со следующими изменяющимися характеристиками: высота прокладок – 0,2; 0,3; 0,5; 1,0 мм; углы секторов – 60; 90; 120°; диаметры отверстий – 0,8; 1,2 мм. Всего испытано 24 варианта форсунки. В первую очередь оценивалось значение угла α , которое должно лежать в пределах 80–100°. Испытания показали, что данный тип форсунки не отвечает в полной мере необходимым требованиям.

Второй тип форсунки представлен на рисунке 3.7.

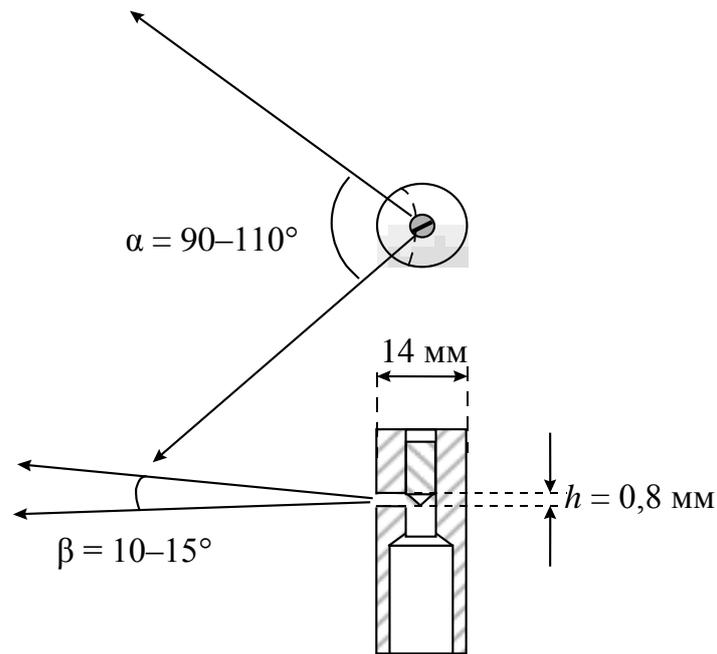


Рисунок 3.7 – Второй тип форсунки, испытанный на годность для применения в испытательном стенде

Форсунка также состоит из цилиндрического корпуса диаметром 14 мм и высотой 38 мм с регулирующим винтом, имеющим на нижнем конце острие, заточенное под углом 70° . Расход воды регулируется вращением винта. Выходное отверстие в виде щели высотой 0,8 мм и шириной 5 мм получают фрезеровкой корпуса стандартной дисковой фрезой диаметром 63 мм. Величина угла $\alpha = 90^\circ$ выбрана с точки зрения оптимального расположения форсунок, а именно, в углах защитного экрана, а величина угла $\beta \approx 10-15^\circ$ объясняется относительно узкой областью межсеточного пространства.

Другой важной рабочей характеристикой форсунки является расход воды в единицу времени. Исходя из величины среднего значения давления в системе на уровне 5 атм (0,5 МПа) и результатов предварительных натурных испытаний теплозащитных экранов была определена величина расхода воды на одну форсунку (примерно 100 г/с). Указанная величина расхода, естественно, является средней, поскольку давление в системе не остается постоянным, а варьируется в зависимости от многих внешних факторов.

Исходя из этого расход воды в разработанной форсунке удовлетворяет вышеуказанным условиям, поскольку лежит в диапазоне от 60 до 100 г/с. Меньшее значение расхода воды не рекомендуется вследствие недостаточности общей массы воды, распыляемой в межсеточном пространстве для эффективного рассеяния теплового излучения.

С целью удовлетворения всем вышеназванным условиям, были проведены эксперименты по распылению воды форсунками с различными конфигурациями и характеристиками. Ранее полученная конструктивная схема распыливающего устройства была определена как щелевая форсунка, и первые варианты в действительности соответствовали данному определению. Как известно, расчет щелевых форсунок является достаточно сложной задачей в виду того, что нет однозначной методики определения параметров распылителя и характеристик распыла данного вида форсунок [97, 102, 103, 107].

Это связано, прежде всего, с тем, что щелевые форсунки не имеют достаточного распространения, вследствие чего этот вид распыливающего устройства рассматривают как частный случай струйной форсунки, где цилиндрическое сопло заменяется на щелевидное. Однако в процессе опытно-конструкторской работы конструкция подвергалась неоднократному изменению, в результате чего была получена некая гибридная конструктивная схема распыливающего устройства, отличающаяся от схемы щелевой форсунки, так как в конструкции присутствуют также элементы форсунок другого класса. Необходимо отметить, что это обычная практика получения гибридных конструктивных схем, связанная с конкретно поставленными задачами.

В результате проведения всех изменений на основе экспериментальной отработки распыляющих устройств, в конструкции появились элементы нескольких классов форсунок (струйная, с соударением струй, а также имеющая признаки ударно струйной форсунки, объединенных в одном корпусе).

На рисунке 3.8 показаны продольный разрез и сечение конфигурации форсунки, позволяющей образовать водяной факел веерообразной формы с максимальным углом раскрытия 180° .

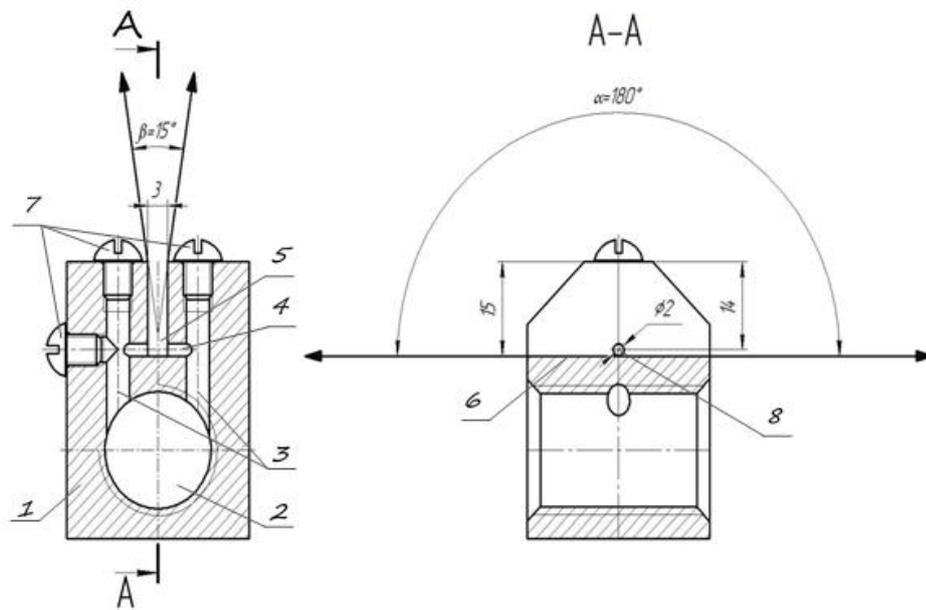


Рисунок 3.8 – Продольный разрез форсунки и его сечение

Корпус форсунки *1* выполнен из алюминиевого деформируемого сплава Д16 в виде параллелепипеда со скошенными гранями в верхней части. Корпус содержит основную магистраль подачи воды *2*, взаимопараллельные водоподводящие каналы *3*, сообщающиеся с каналом *4* для формирования факела воды, паз *5* с плоским дном *6*. Для очистки форсунки имеются винты-заглушки *7*. Выходные цилиндрические отверстия *8*, образованные пересечением паза *5* с каналом *4* расположены на одной оси строго друг против друга.

На рисунке 3.9 показана принципиальная схема работы форсунки.

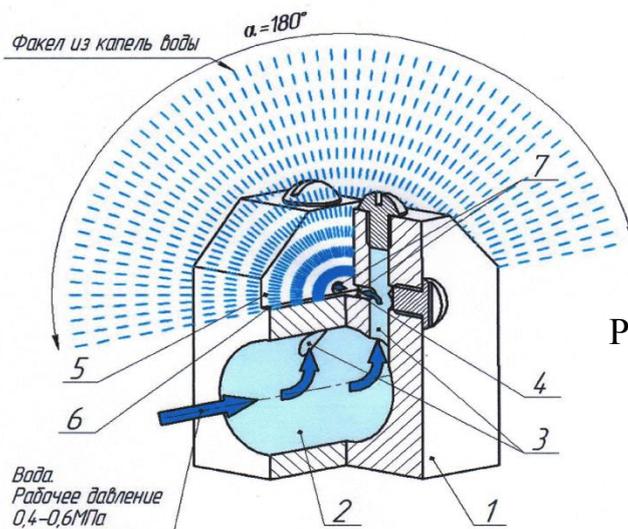


Рисунок 3.9 – Принципиальная схема работы форсунки

Вода под давлением поступает из основной магистрали 2 корпуса 1 по взаимопараллельным каналам 3 в канал 4, который пересечен пазом 5. В месте пересечения канала 4 и паза 5 происходит соударение встречных струй воды, истекающих из цилиндрических отверстий 7. Соударение струй происходит по строго встречным направлениям, образуя плоский факел. Угол раскрытия факела в 180° ограничивается плоским дном 6 паза 5.

Вода, покидая цилиндрические каналы (сопла) образует струи (*класс струйной форсунки*), расположенные соосно друг другу цилиндрические струи соударяются, образуя в точке столкновения радиально растекающийся поток в виде плоской пленки, распадающийся на капли (*класс форсунок с соударением струй*). Стенки паза (5) выполняют функцию отражателя и дальнейшее распыливание происходит за счет удара капель о стенки (6) (*класс ударно-струйной форсунки*), и ограниченные плоским дном паза образуют веерообразный факел с углом раскрытия 180° градусов.

Задача по уменьшению теплового потока с помощью теплозащитных экранов, использующих паро-капельную смесь, требует оптимизации по такому важному фактору, как объем воды, расходуемый на 1 м^2 площади экрана или расход воды на одну форсунку. Данное обстоятельство обусловлено тем, что в силу определенных факторов, а именно дефицита воды, необходимо определить тот минимальный уровень расхода, при котором сохраняются эффективные защитные свойства экрана. Предварительные натурные испытания показали, что расход воды через форсунку порядка 80 г/с ($4,8 \text{ л/мин.}$) для площади $1,125 \text{ м}^2$ является фактически достаточным для уменьшения теплового потока примерно в 80 раз.

Для достижения минимального значения расхода воды ставится задача по оптимизации конструкции форсунки, которая наряду с простотой изготовления, имела бы легко регулируемый конструктивный параметр, напрямую влияющий на расход воды. Как уже отмечалось, для изменения расхода воды достаточно изменить диаметр канала форсунки. В этой связи необходимо знать зависимость расхода воды от давления в системе при различных диаметрах канала.

Такая информация позволит выбирать необходимый диаметр канала форсунки при ее изготовлении для каждого конкретного случая потребления воды в зависимости от внешних факторов и условий эксплуатации. Для выявления такой зависимости были проведены эксперименты по определению расхода воды при разных значениях давления с форсунками, имеющими различные диаметры каналов, результаты которых приведены на рисунке 3.10.

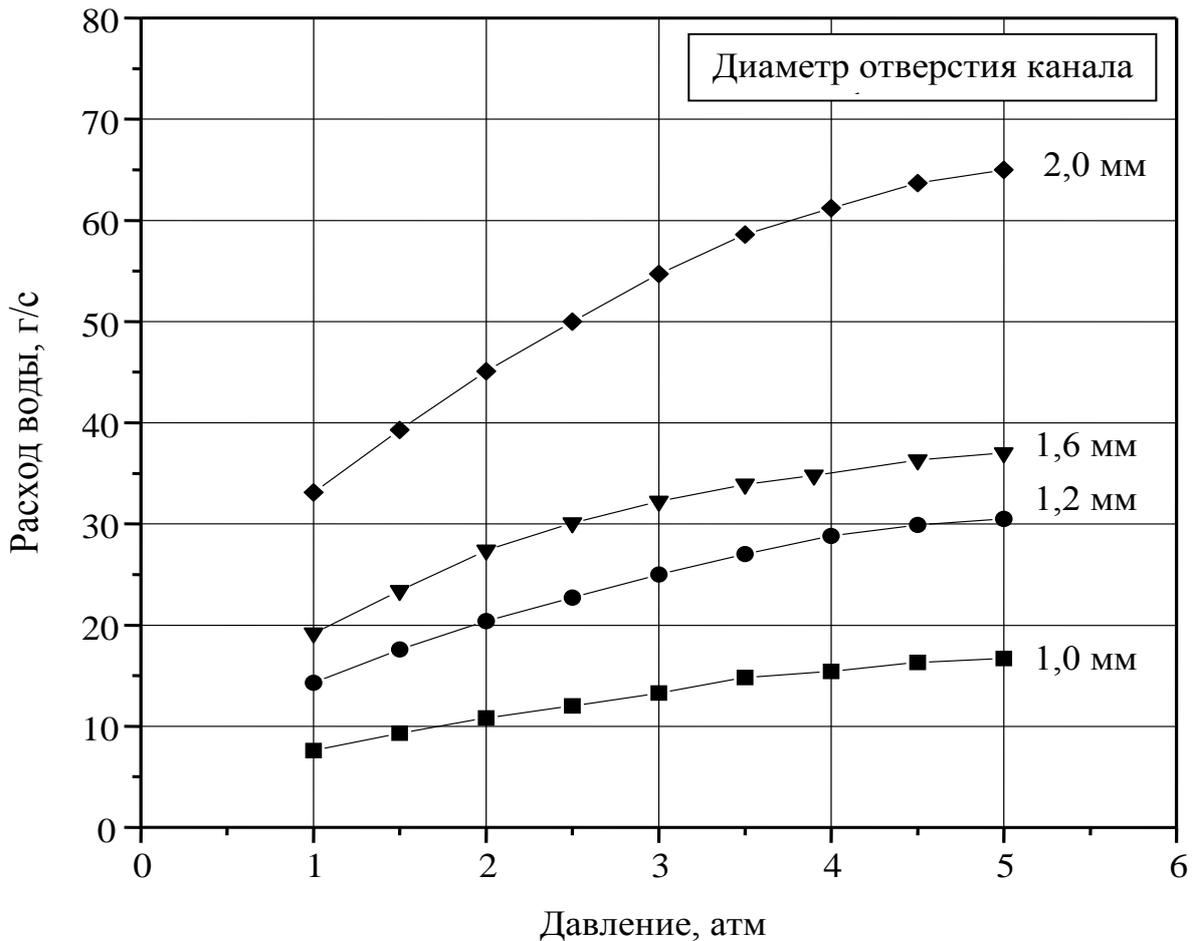


Рисунок 3.10 – Зависимости расхода воды от давления в системе для форсунок с разными диаметрами отверстия канала

Из рисунка 3.10 видно, что расход воды при давлении около 5 атм выходит на «плато» и в дальнейшем практически не увеличивается. Таким образом, зная требуемый расход и диапазон рабочего давления в системе, можно подобрать необходимый диаметр канала форсунки, отвечающий этим условиям.

3.3 Экспериментальное определение характеристик форсунок

3.3.1 Стенд для испытания форсунок

Программа испытаний форсунок включала в себя определение следующих параметров:

- угла факела форсунки;
- диаметра капель в струе распыляемой форсункой;
- статистического распределения капель, распыляемых форсункой, по размеру (диаметру);
- зависимости расхода воды на форсунку от давления воды в системе;
- измерение параметров факела форсунки при оптимальном давлении и расходе воды.

Программа предназначалась для выбора оптимальной конструкции форсунки, удовлетворяющей заданным требованиям как по основным параметрам форсунки (размер факела, угол раскрытия, размер капель), так и по величинам расхода и давления воды. Манометр предназначался для определения давления подводимой воды, а ротаметры – для определения расхода воды, проходящей через форсунку. Ротаметры проградуированы в трех диапазонах: 10–100, 50–500 и 250–1500 мл/с с точностью $\pm 10\%$ по нижнему пределу каждого диапазона. Конструктивные особенности стенда позволяли определять давление и расход воды, подаваемой через водораспределительный контур в межсеточное пространство экрана. Поскольку при испытании форсунок на стенде предполагалось использование фотоаппаратуры для контроля основных параметров форсунки, то форсунка укреплялась на поворотной головке с целью придания струе необходимого наклона.

3.3.2 Дисперсность распыляемой воды

Определение диаметров капель, распыляемых форсункой, максимально отвечающих установленным требованиям, производилось прямым методом

с использованием микроскопа МБС-2 со встроенной шкалой измерения, наблюдаемой в окуляр при увеличении в 32 раза. Данная методика широко применяется в различных отраслях науки и техники и отличается простотой, надежностью и воспроизводимостью.

В качестве подложки, используемой для осаждения капель воды и последующего измерения, применялась стеклянная пластина размером $10 \times 15 \text{ см}^2$ с несмазываемой поверхностью. Для этого на одну из поверхностей наносился тонкий слой технического масла толщиной 2–3 мкм. Пластина, ориентированная горизонтально, вносилась на 1 с в область, расположенную ниже горизонтальной оси, вдоль которой производится распыление на различных удалениях от форсунки (рисунок 3.11). В результате, на пластине происходило осаждение капель всех возможных диаметров, которые «улавливались» на излете своей траектории.

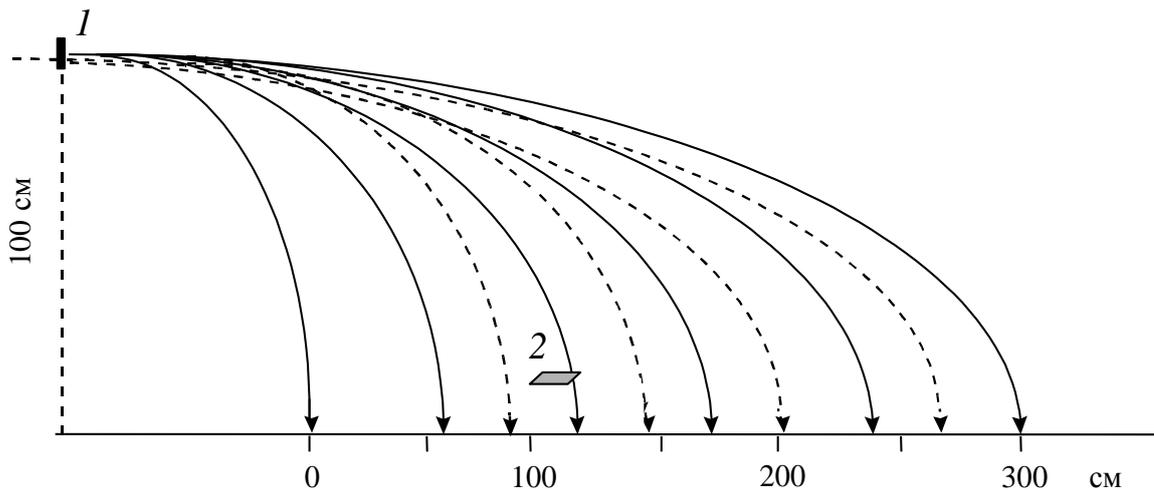


Рисунок 3.11 – Принципиальная схема определения диаметра капель, создаваемых форсункой:

1 – форсунка; 2 – пластина для «улавливания» капель

Данное обстоятельство позволяло избежать разбрызгивания капель и их «слияния». В микроскоп хорошо наблюдались отдельные капли различных диаметров, в зависимости от удаления пластины от форсунки. Во избежание испарения капель визуальные измерения проводились непосредственно сразу после осаждения капель на пластину.

При измерениях диаметра капли необходимо учесть фактор отличия формы реальных капель от идеальной сферы, особенно для крупных капель.

Известно, что капля малых размеров на несмачиваемой поверхности имеет форму, близкую к сферической (рисунок 3.12а), когда сила поверхностного натяжения больше силы тяжести капли, и другими силами, действующими на нее, можно пренебречь. В противном случае, наблюдается сплющивание капли (рисунок 3.12б) [105].

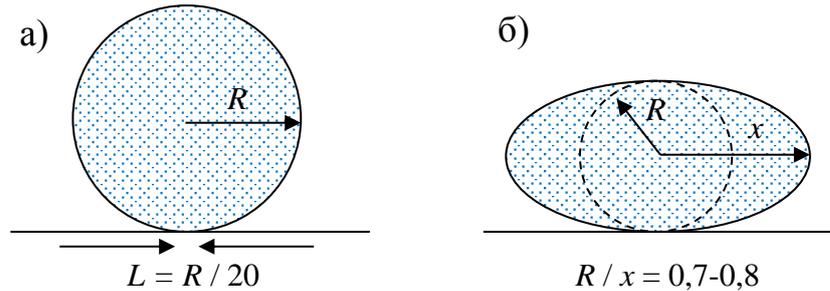


Рисунок 3.12 – Форма капли воды для случаев, когда сила поверхностного натяжения больше (а) и меньше (б) силы тяжести

Оценим максимальный диаметр, при котором капля имеет сферическую форму.

На неподвижную каплю радиусом R действуют две силы:

– сила поверхностного натяжения $F_n = \sigma L$;

– сила тяжести $F_t = mg$,

где σ – коэффициент поверхностного натяжения (для воды при 20 °С $\sigma = 72,7 \cdot 10^{-3}$ Н/м); L – длина границы соприкосновения капли и плоскости; m – масса капли; g – ускорение свободного падения.

Принимая, что $F_n = F_t$, $m = V\rho = 4/3\pi R^3\rho$ (здесь $\rho = 1000$ кг/м³ – плотность воды), $L = R/20$, получаем $R = (3\sigma / 80\pi\rho g)^{1/2}$ или $R = 294$ мкм ≈ 300 мкм, $d = 600$ мкм.

Таким образом, при диаметрах капель до 600 мкм их можно считать сферическими. При размерах капли, наблюдаемой в микроскоп, более 600 мкм необходимо вносить поправку на сжатие (рисунок 3.12б), которая определяется как отношение $R/x = 0,7-0,8$.

В распыленной струе присутствуют капли с диаметрами в самом широком диапазоне от 15 до 800 и более мкм. Зафиксировано присутствие капель со следующими наиболее распространенными значениями диаметров, которые были определены с учетом вышеизложенного: 15; 30; 100; 125; 175; 200; 250; 300; 350; 375; 500; 625; 700; 750; 850; 1000 мкм.

Для удобства оценки эти значения диаметров можно объединить в группы:

- капли с диаметром 15–30 мкм локализованы в основном на расстояниях от 25 до 60 см;
- капли с диаметром 250 мкм (от 60 до 120 см);
- капли с диаметром 500 мкм (от 120 до 180 см);
- капли с диаметром 650 мкм (от 180 до 240 см);
- капли с диаметром 800 и более мкм (от 240 до 300 см).

Таким образом, данная методика позволяет с большой точностью (до 10 % погрешности) определять все возможные диаметры капель, присутствующие в потоке. Однако указанная методика не может дать ответ на вопрос о статистическом распределении капель с разными диаметрами в потоке. Для этой цели была применена другая методика.

3.3.3 Статистическое распределение капель с разными диаметрами в потоке

Методика основана на измерении количества жидкости, собираемой горизонтально расположенными улавливающими емкостями, и последующего определения ее объема V (массы). Схожая методика используется в метеорологии при определении уровня выпавших осадков [106]. В основу методики положен физический факт, при котором дальность «полета» капли прямо пропорциональна массе капли и, следовательно, ее диаметру, и зависит от импульса капли. При этом считается, что начальная скорость вылета для всех капель одинакова. Другими словами, капли меньшей массы теряют свою кинетическую энергию на более близких расстояниях, чем капли большей массы.

На горизонтальной плоскости расположенной ниже оси распыления на 100 см через каждые 20 см располагались улавливающие и собирающие жидкость емкости с одинаковой площадью входных окон 70 см^2 (рисунок 3.13).

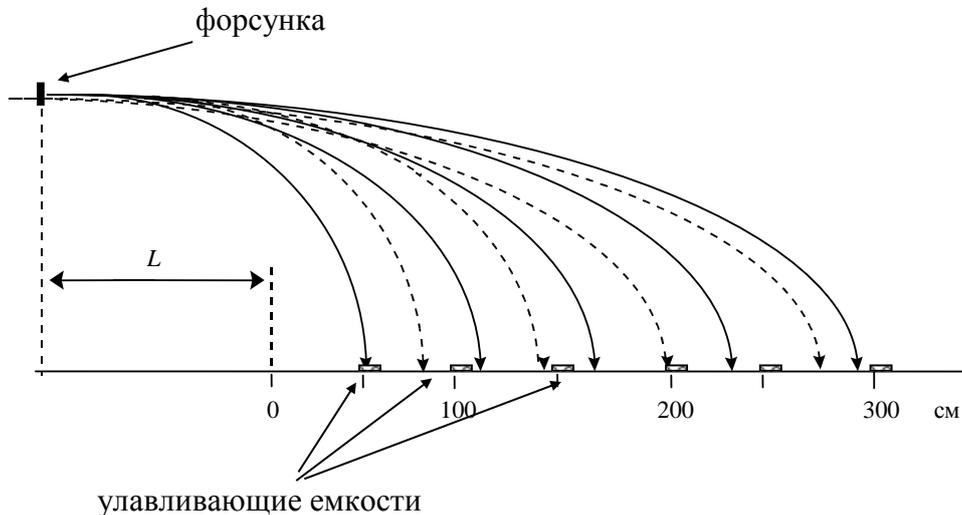


Рисунок 3.13 – Принципиальная схема к способу определения статистического распределения капель с разными диаметрами в потоке, создаваемом форсункой

Следует отметить, что нулевое положение шкалы, по которой отмечались положения емкостей, не совпадает с вертикальной проекцией положения форсунки на горизонтальную ось, а сдвинуто на расстояние L до точки, соответствующей границе выпадения наименее «легких» капель воды. Таким образом, можно считать, что расстояние от «0» на горизонтальной шкале до той точки, где происходит осаждение капель, соответствует расстоянию от форсунки до области, где капли начинают терять свою кинетическую энергию. В процессе распыления в каждой емкости собирается вода, состоящая в основном из капель одной фракции, то есть имеющих примерно одинаковую массу и диаметр. Другими словами, происходит сепарация капель по массе, так как попадание более «тяжелых» капель в ближние емкости практически исключено.

Здесь необходимо сделать оговорку, что всегда имеется некоторое количество капель малых диаметров, которые будут попадать в дальние емкости. Это происходит вследствие того, что распыление происходит на протяжении всего полета капли, то есть крупные капли продолжают разделяться на более мелкие фракции.

Данное обстоятельство было зафиксировано с помощью микроскопа, когда на пластине, вносимой в осаждаемый поток на расстояниях от 1 до 3 м присутствовали капли с диаметром от 15 до 100 мкм. Однако, вклад этих капель в общий объем воды, собираемой в отдельной дальней емкости значительно меньше вклада основной (крупной) фракции.

Распыление проводилось в течение разных промежутков времени: 5; 8; 10 мин. Причем длительность распыления не имеет значения и лимитирована только количеством воды, собираемой в самой «ближней» емкости, достаточной для определения ее массы (объема). После окончания распыления определяется количество воды во всех емкостях. Зная суммарное количество воды (V_s) и принимая его за 100 %, можно легко рассчитать количество воды в каждой емкости в процентном отношении (рисунок 3.14).

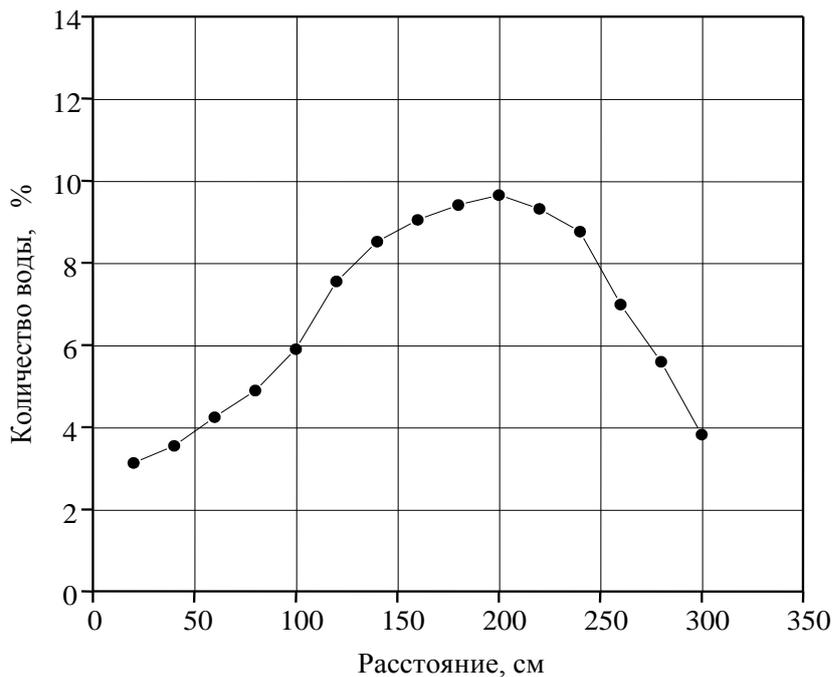


Рисунок 3.14 – Зависимость количества воды в каждой емкости от расстояния до нее

Так как в одну емкость попадают капли с близкими по значению диаметрами, можно всю шкалу разбить на несколько зон, каждая из которых состоит из трех соседних, а количество воды, собираемой в каждой зоне, представляет собой количество воды трех емкостей в процентах.

Аналогичная операция по объединению в группы была сделана для капель с различными диаметрами в предыдущей методике.

Дополняя полученные данные результатами предыдущего эксперимента по определению всех возможных диаметров капель, присутствующих в потоке, может быть сделан следующий вывод о примерном количественном (статистическом) распределении капель различных диаметров в потоке. В потоке присутствуют: около 11 % капель с диаметром 15–30 мкм; около 18 % капель с диаметром 250 мкм; около 27 % капель с диаметром 500 мкм; около 28 % капель с диаметром 650 мкм; около 16 % капель с диаметром 800 мкм и более.

Погрешность при применении данной методики для определения статистического распределения капель различных диаметров в потоке распыляемой воды не превышала 15 %, что можно считать вполне приемлемой величиной при оценке параметров, носящих статистический характер.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРОТИВОПОЖАРНЫМИ ПРЕГРАДАМИ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СЕТЧАТЫХ ЭКРАНОВ

4.1 Задачи экспериментальных исследований и требования к разработке экспериментальных стендов

Основными задачами экспериментальных исследований являлись изучение процессов, протекающих при взаимодействии потока энергии, излучаемого пожаром, с противопожарной преградой на базе теплозащитных сетчатых экранов, и определение параметров, обеспечивающих максимальную эффективность теплозащитных экранов в широком диапазоне плотности тепловых потоков, характерном для условий реальных пожаров.

На основании анализа, представленного в предыдущих разделах настоящей работы, были выбраны следующие направления экспериментальных исследований:

- определение параметров и характеристик теплозащитных экранов, обеспечивающих максимальную степень ослабления тепловых потоков;
- определение характеристик противопожарных преград и теплозащитных экранов в условиях горения ГЖ и лесопиломатериалов с плотностью теплового излучения пламени до 75 кВт/м^2 ;
- определение характеристик противопожарных преград в условиях горения пролива СПГ с плотностью теплового излучения пламени до 220 кВт/м^2 .

Экспериментальные стенды для проведения выше рассмотренных исследований должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- измерительные системы должны осуществлять контроль и телеметрию основных исследуемых параметров (интенсивность теплового излучения перед и за экраном, температура продуктов горения, расход и температура воды, параметры атмосферы и т. п.);

- расходные и напорные характеристики водяных насосов экспериментальных установок должны обеспечивать эффективную работу распылителей;
- запасы воды должны обеспечивать непрерывную работу систем в течение расчетного времени проведения экспериментов;
- должна быть предусмотрена возможность подачи воды на противопожарную преграду и теплозащитный экран от пожарных автомобилей по штатным рукавным линиям для создания водяной пленки.

Кроме этого, непосредственно при проведении экспериментов, должна быть обеспечена безопасность персонала с учетом особенностей используемой горючей нагрузки. В ходе экспериментов производилась видео- и фотосъемка с целью фиксации результатов.

В соответствии с поставленными задачами и учитывая выше рассмотренные требования, были разработаны три экспериментальных стенда, соответственно для:

- определения параметров и характеристик теплозащитных экранов, обеспечивающих максимальную степень ослабления тепловых потоков;
- исследования характеристик противопожарных преград и теплозащитных экранов в условиях горения пролива ГЖ и лесопиломатериалов;
- исследования характеристик противопожарных преград в условиях горения пролива СПГ.

4.2 Экспериментальное определение параметров и характеристик теплозащитных экранов, обеспечивающих максимальную степень ослабления тепловых потоков

4.2.1 Разработка экспериментального стенда и методики исследований

Экспериментальный стенд для определения параметров и характеристик теплозащитных экранов, обеспечивающих максимальную степень ослабления тепловых потоков (рисунок 4.1), состоял из следующих основных элементов:

- источника теплового излучения с плотностью теплового потока до 25 кВт/м^2 ;
- передвижной платформы с модулем теплозащитного экрана;
- средств подачи воды;
- измерительного комплекса.

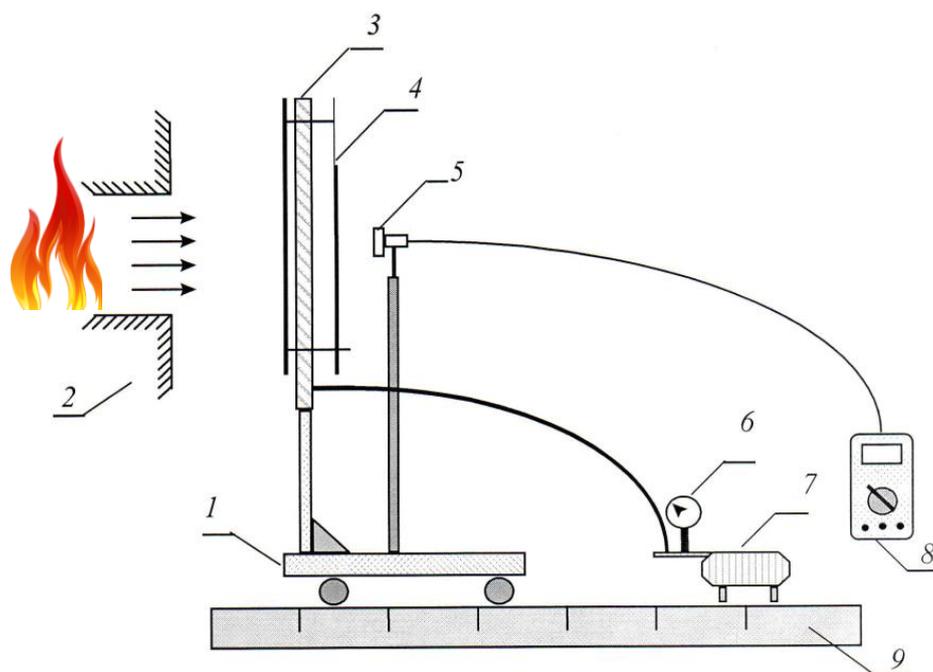


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема экспериментального стенда:
 1 – платформа; 2 – источник теплового излучения; 3 – каркас; 4 – модуль защитного экрана; 5 – датчик теплового потока; 6 – манометр; 7 – водяной насос; 8 – регистрирующая аппаратура; 9 – направляющие рельсы

Модуль теплозащитного экрана представлял собой две металлические сетчатые поверхности с размером $1,0 \times 1,0 \text{ м}$, закрепленные на каркасе параллельно друг другу. Конструкция стенда позволяла:

- использовать сетки из различных материалов и с разными размерами ячеек;
- использовать различные форсунки;
- варьировать межсеточное расстояние и расстояние от источника теплового потока до экрана;
- варьировать давление и расход воды, подаваемой на форсунки;
- обеспечивать измерения теплового потока в диапазоне от $0,05$ до 25 кВт/м^2 с точностью не менее $0,01 \text{ кВт/м}^2$;
- проводить измерения температуры водной пленки на поверхностях сеток.

Разработанный стенд имел следующие технические характеристики:

- тепловой поток, создаваемый источником, до 25 кВт/м²;
- температура пламени источника теплового потока 800–1200 °С;
- расстояние до датчика теплового потока 75–275 см;
- диапазон измерения теплового потока датчиком 0,05–25 кВт/м²;
- чувствительность датчика теплового потока 50 мВ м²/кВт;
- быстродействие датчика теплового потока 0,2–0,5 с;
- точность измерения теплового потока 0,01 кВт/м²;
- диапазон изменения межсеточного расстояния 5–20 см;
- давление воды в системе, до 15 атм;
- обеспечиваемый расход воды, до 24 л/мин;
- количество форсунок, до 4;
- диапазон измерения температуры сеток 15–100 °С;
- точность измерения температуры сеток 0,1 °С;
- площадь испытываемого экрана, до 1,5 м²;
- характеристики форсунок:
 - расход воды на одну форсунку 80–100 г/с;
 - угловые параметры распыления $\alpha = 90\text{--}180^\circ$; $\beta = 12\text{--}15^\circ$;
 - дисперсность 15–500 мкм.

Испытания выполнялись с применением источника теплового излучения, входящего в состав испытательного стенда (печь с размерами окна 60×90 см²; температура пламени 900–1000 °С). Перед проведением испытаний были определены значения теплового потока на различном расстоянии от источника теплового излучения (рисунок 4.2)

Проведение экспериментов осуществлялось по следующей методике. Модуль теплозащитного экрана (4) устанавливается на платформе (1) на фиксированном расстоянии от источника теплового потока (2). Подготавливаются к работе измерительные (5) и регистрирующие (8) приборы. Включается насос подачи воды (7) и регистрируется давление воды в магистрали по манометру (6). С помощью датчика (5) фиксируются значения плотности теплового потока за модулем экрана.

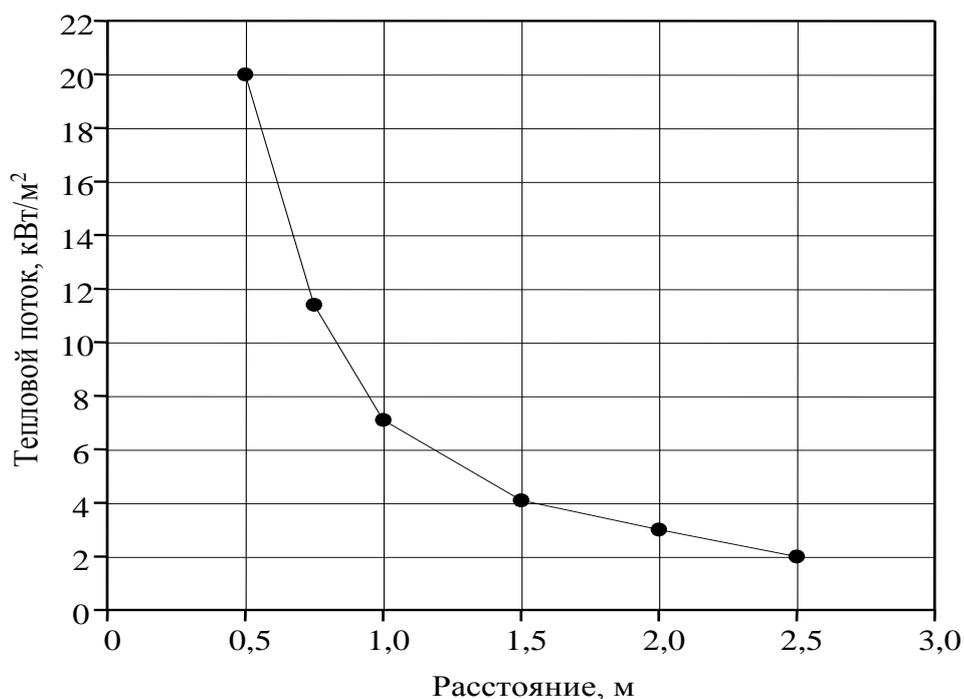


Рисунок 4.2 – Зависимость теплового потока от расстояния до окна кузнечной печи

Эксперимент продолжается до получения стационарных значений плотности теплового потока за модулем защитного экрана. После окончания опыта, приведения установки в первоначальное состояние и изменения одного из начальных условий эксперимента (расход воды, расстояние от модуля теплозащитного экрана до источника теплового потока, размер ячеек сетки, тип форсунки, межсеточное расстояние и т. п.) процедура опыта повторяется вновь.

4.2.2 Результаты экспериментов и обработка полученных данных

Экспериментальные исследования по определению параметров и характеристик теплозащитных экранов, обеспечивающих максимальную степень ослабления тепловых потоков, выполнялись в три этапа:

- 1) определение оптимальных параметров внешней и внутренней сеток теплозащитного экрана (диаметр проволоки, размер ячейки);
- 2) определение оптимальных расходов воды;
- 3) определение оптимальных расстояний между сетками экрана.

4.2.2.1 Определение оптимальных параметров сеток теплозащитного экрана

В данной серии экспериментов использовался модуль теплозащитного экрана, представляющий собой две металлические сетчатые поверхности, каждая размером $1,0 \times 1,0$ м, закрепленные параллельно друг другу на удерживающем их каркасе. В межсеточное пространство через форсунки подавалась вода. Конструкция стенда позволяла использовать сетки из различных материалов и с разными размерами ячеек, заменять форсунки, изменять межсеточное расстояние, подавать на форсунки воду с расходом от 0,02 до 0,2 л/с на 1 м^2 экрана при давлении воды до 1,0 МПа.

Критерием определения оптимальных параметров внешней и внутренней сеток теплозащитного экрана (диаметр проволоки, размер ячейки) являлось образование устойчивых и сплошных пленок воды на сетчатых поверхностях.

Экспериментальные исследования, проведенные в широком диапазоне изменения параметров сеток, показали, что в результате подбора оптимальных параметров сеток теплозащитного экрана происходит образование устойчивых и сплошных пленок воды на сетчатых поверхностях при различных температурах и расходах воды.

4.2.2.2 Определение оптимальных расходов воды

В данной серии экспериментов использовался модуль экрана, представляющий собой две металлические сетчатые поверхности, каждая размером $1,0 \times 1,0$ м, закрепленные параллельно друг другу на удерживающем их каркасе. В межсеточное пространство через форсунки подавалась вода.

Конструкция стенда позволяла изменять межсеточное расстояние, подавать на форсунки воду с расходом от 0,02 до 0,2 л/с на 1 м^2 экрана при давлении воды до 1 МПа, обеспечивать измерения теплового потока в диапазоне от 0,05 до 25 кВт/м^2 с точностью до $0,01 \text{ кВт/м}^2$.

Для измерения температуры водяной пленки на поверхностях сеток в диапазоне от 0 до 100 °С с точностью до 0,1 °С был использован специально разработанный термощуп.

Экспериментальные исследования по определению оптимальных расходов воды с использованием форсунок при максимальном значении падающего на экран теплового потока в 25 кВт/м² показали, что:

- при расходах воды до 38 г/с на 1 м² экрана соударяющиеся с сильно нагретыми сетками капли частично отражаются, распадаясь на более мелкие, и частично испаряются, не создавая водяную пленку;

- при расходах воды от 40 до 70 г/с на 1 м² экрана происходило появление на сетчатых поверхностях отдельных водо-пленочных образований;

- при расходе воды в 80 г/с на 1 м² экрана процесс многократного отражения капель, определяемый направлением и величиной вектора импульса каждой капли, при определенных расстояниях между сетками приводит к почти скачкообразному образованию сплошных устойчивых пленок воды, которая стекает по поверхности сеток;

- при расходах воды более 80 г/с на 1 м² экрана процесс протекает аналогично предыдущему, но с более интенсивным стеканием воды по поверхности сеток.

Таким образом оптимальным представляется расход воды от 80 до 100 г/с на 1 м² экрана.

4.2.2.3 Определение оптимальных расстояний между сетками

В данной серии экспериментов использовался модуль экрана, представляющий собой две металлические сетчатые поверхности, каждая размером 1,0×1,0 м, закрепленные параллельно друг другу на удерживающем их каркасе.

В межсеточное пространство через форсунки подавалась вода. Конструкция стенда позволяла изменять межсеточное расстояние, обеспечивать измерения теплового потока в диапазоне от 0,05 до 25 кВт/м² с точностью до 0,01 кВт/м².

Результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных расстояний между сетками представлены на рисунке 4.3 в виде зависимости коэффициента ослабления теплового потока (k) от расстояния между сетчатыми поверхностями (h) и расхода воды (Q), подаваемой форсунками в межсеточное пространство (здесь $k = P_0 / P$, где P_0 и P – соответственно, значения теплового потока, падающего на экран и проходящего через него).

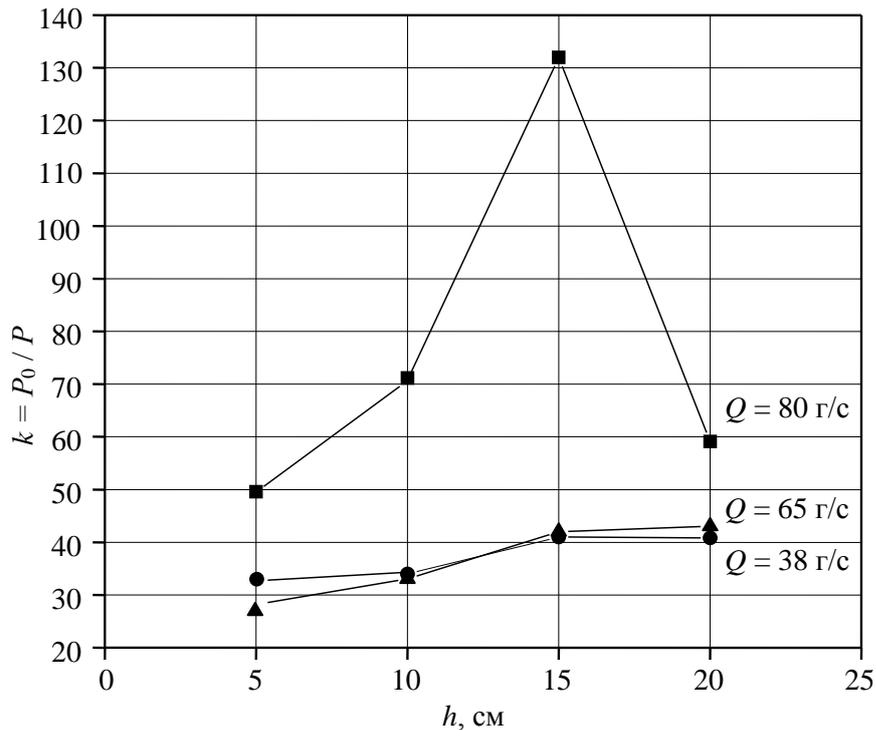


Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициента ослабления теплового потока (k) от межсеточного расстояния (h) и расхода воды (Q)

Как видно из представленных результатов экспериментальных исследований, оптимальное расстояние между сетками составляет 0,15 м.

В данной серии экспериментов были также определены значения коэффициента ослабления теплового потока (k) в зависимости от интенсивности падающего теплового потока при оптимальном расходе воды (80 г/с) и межсеточном расстоянии, равном оптимальному значению – 0,15 м.

На основании анализа результатов экспериментов можно сделать вывод о том, что модули теплозащитного экрана, выполненные с оптимальным межсеточным расстоянием, являются эффективным средством ослабления теплового потока при относительно небольшом (оптимальном) расходе воды в 80 г/с.

4.3 Экспериментальное исследование характеристик противопожарных преград и теплозащитных экранов в условиях горения пролива горючих жидкостей и лесопиломатериалов с плотностью теплового излучения пламени до 75 кВт/м²

4.3.1 Разработка экспериментального стенда и методики исследований

Экспериментальный стенд для исследования характеристик противопожарных преград и теплозащитных экранов в условиях горения ГЖ и лесопиломатериалов с плотностью теплового излучения пламени до 75 кВт/м² разрабатывался для проведения исследований на производственных объектах в условиях, приближенных к реальным пожарам.

Испытательный стенд включал в себя следующие основные элементы:

- очаг горения ГЖ;
- очаг горения лесопиломатериалов;
- противопожарная преграда в виде теплозащитного коридора;
- теплозащитные экраны;
- средства подачи воды (кольцевая водопроводная сеть диаметром 200 мм с запорной арматурой и насосной станцией, две автоцистерны АЦ–40);
- измерительный комплекс.

Принципиальная схема стенда представлена на рисунке 4.4.

Проведение экспериментов осуществлялось по следующей методике. Противопожарная преграда в виде теплозащитного коридора (1) и теплозащитные экраны (2-5) устанавливаются на испытательной площадке. Размещаются противень с ГЖ и опытный штабель лесопиломатериалов, предварительно пропитанный горючей жидкостью (ТГМ) (6-7). Подготавливаются к работе измерительные и регистрирующие приборы (8-9). Поджигаются источники теплового излучения (ТГМ и ГЖ) и включается насос подачи воды. Регистрируется давление воды в магистрали, фиксируются значения плотности теплового потока внутри теплозащитного коридора.

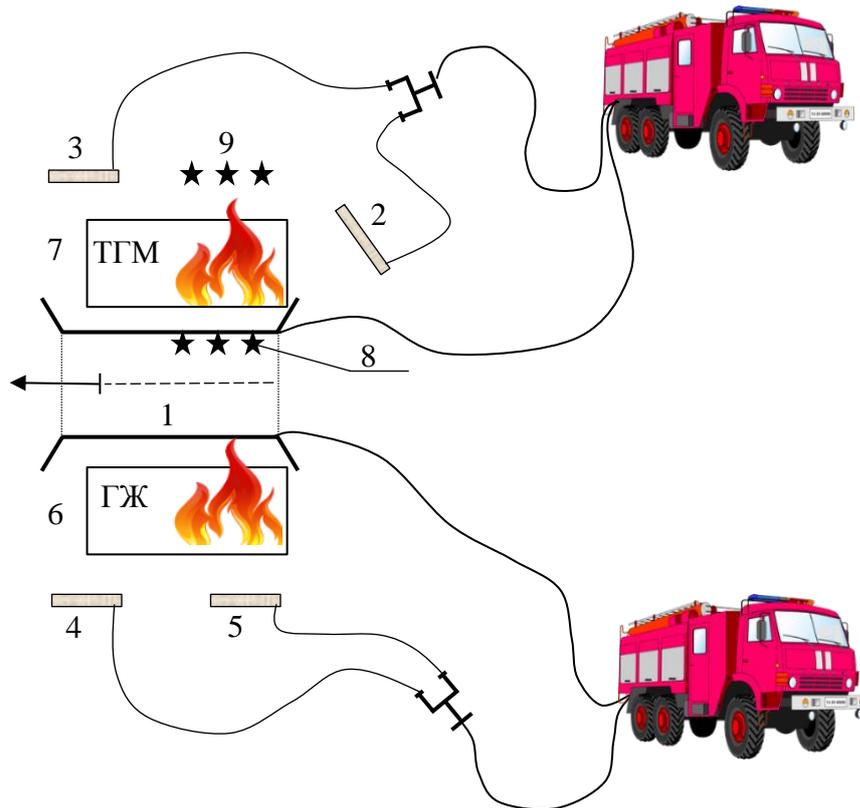


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема экспериментального стенда для исследования характеристик противопожарной преграды и теплозащитных экранов в условиях горения ГЖ и лесопиломатериалов:
 1 – теплозащитный коридор; 2–5 – теплозащитные экраны; 6 – противень с ГЖ; 7 – ТГМ; 8–9 – измерительные и регистрирующие приборы

Эксперимент продолжается до получения стационарных значений плотности теплового потока внутри теплозащитного коридора.

После окончания опыта, приведения установки в первоначальное состояние и изменения одного из начальных условий эксперимента (расход воды, расстояние от противопожарных преград до источников теплового потока, размеров и массы пожарной нагрузки и т. п.) процедура опыта повторяется вновь.

4.3.2 Результаты экспериментов и обработка полученных данных

При проведении опытов ставилась цель максимально возможного приближения экспериментальных исследований к реальным условиям развития пожара, в частности:

– при проведении экспериментов были задействованы силы и технические средства пожарной охраны, а именно, вода на распылители подавалась непосредственно от насосов пожарных автомобилей;

– в качестве пожарной нагрузки использовались нефтепродукты, залитые в противень размером $3,0 \times 2,0 \times 0,3$ м, а также лесопиломатериалы в виде штабелей размером $2,0 \times 3,0 \times 1,6$ м.

– отрабатывалась методика тушения пожара с использованием теплозащитных экранов и т. п.

Экспериментальные исследования характеристик противопожарной преграды в условиях горения ГЖ и лесопиломатериалов с плотностью теплового излучения пламени до 75 кВт/м^2 выполнялись с противопожарной преградой, выполненной в виде теплозащитного коридора (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Общий вид теплозащитного коридора

4.3.2.1 Испытания противопожарной преграды в виде теплозащитного коридора

В ходе испытаний головной элемент коридора подвергался одновременному тепловому воздействию пламени от двух очагов горения, размещенных у боковых

стен коридора – горящих штабелей лесопиломатериалов размером $2,0 \times 3,0 \times 1,6$ м, на расстоянии 0,6 м, и горячей смеси бензина и дизтоплива, залитой в противень размером $3,0 \times 2,0 \times 0,3$ м, на расстоянии 0,8 м.

В процессе испытаний регистрировались величины плотности потока теплового излучения на различном расстоянии от источника огня и плотности потока теплового излучения за экраном. Коэффициент ослабления величины теплового потока при наибольших его значениях вычислялся как отношение величины теплового потока на расстоянии 0,8 м от источника огня к величине теплового потока за экраном на таком же расстоянии.

В целях тепловой защиты измерительные провода и гибкие шланги водоохлаждающей системы датчика были закрыты стеклотканью. Измерения проводились по мере приближения к источнику огня. Показания датчиков теплового излучения фиксировались на различных расстояниях с интервалом в один метр в диапазоне от 7,8 до 0,8 м. Наименьшее расстояние от датчика до штабеля ТГМ было равно 0,8 м, что соответствовало расстоянию от стенки штабеля до датчика, используемого за экраном, в случае проведения дальнейших измерений и возможности регистрации второго параметра.

Изменение плотности потока теплового излучения в зависимости от расстояния до источника огня приведено на рисунке 4.6.

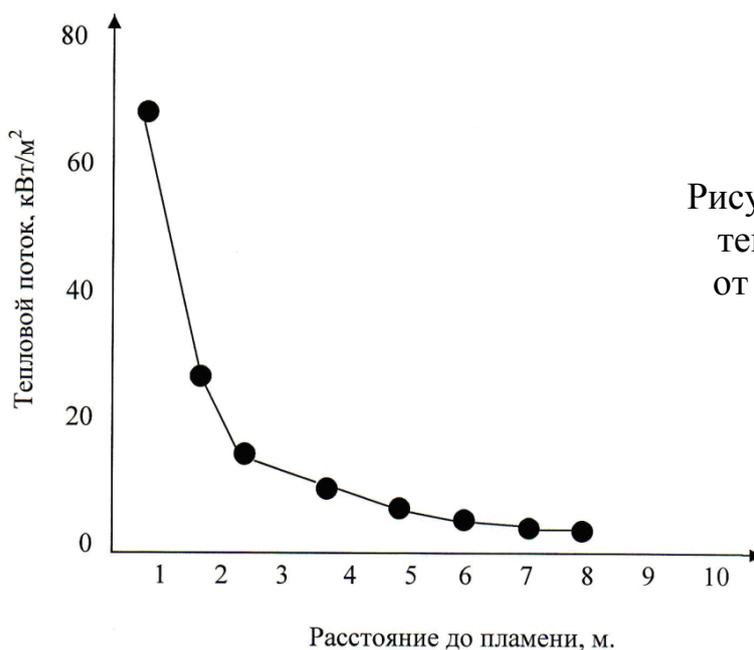


Рисунок 4.6 – Изменение плотности теплового потока в зависимости от расстояния до источника огня

В ходе экспериментальных исследований регистрация теплового потока, проходящего через экран, проводилась в 12 точках. На рисунке 4.7 представлены результаты измерений теплового потока, которые указаны рядом с каждой точкой, где устанавливался соответствующий датчик теплового потока.

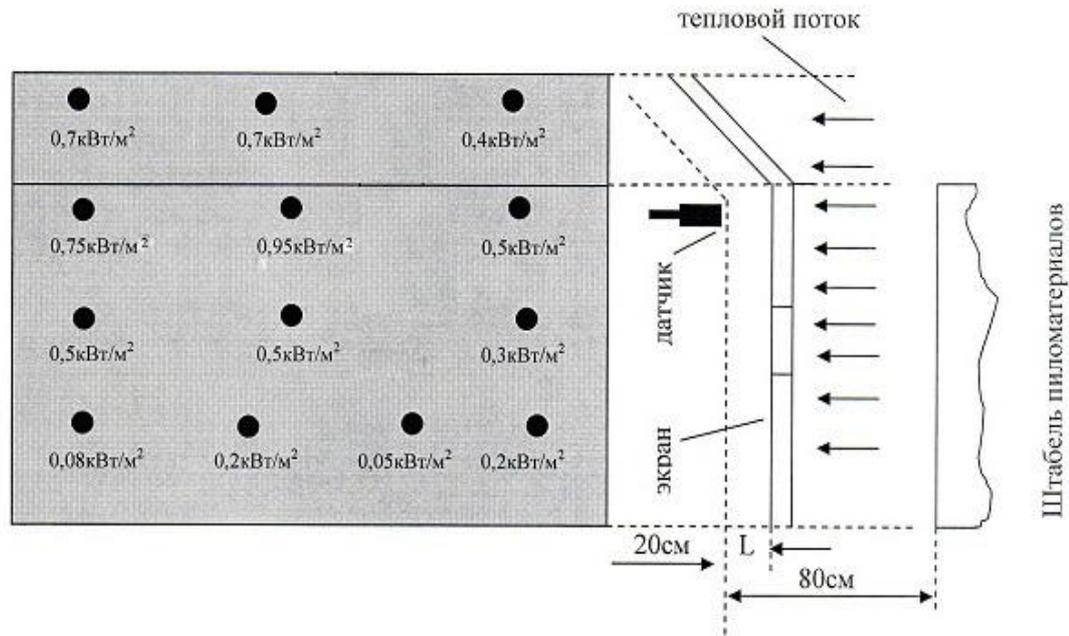


Рисунок 4.7 – Распределение значений теплового потока внутри теплозащитного коридора

Датчик регистрирующего прибора располагался на удалении $L = 0,2$ м от внутренней стенки экрана. Это расстояние, дополненное расстоянием в 0,6 м до поверхности штабеля, соответствовало максимально близкому расстоянию (0,8 м), на котором фиксировалось значение плотности теплового потока без экранов.

Анализ распределения величин тепловых потоков показал, что наибольший проходящий тепловой поток (на уровне 0,5–0,7 кВт/м²) имел место на высоте свыше 1,5 м от уровня земли, при этом минимальное значение коэффициента ослабления теплового потока (k) составляло примерно 80.

Величина плотности теплового потока падающего на стены теплозащитного коридора достигала 75 кВт/м². При этом, значения тепловых потоков, измеренные в 12 точках на расстоянии 0,2 м от внутренней стенки коридора, не превышали 1,0 кВт/м², что является безопасным для человека, то есть не вызывает негативных последствий в течение длительного времени [4].

4.3.3 Испытания противопожарной преграды на огнестойкость

С целью возможности применения разработанных теплозащитных сетчатых экранов на практике в качестве противопожарных преград были проведены их сертификационные испытания на огнестойкость в испытательной лаборатории ООО «КОМПОМАГ» [109].

Образец для испытаний представлял собой стационарную противопожарную преграду размерами 1500×1500 мм (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Общий вид образца преграды до проведения испытаний

Конструкция образца преграды состояла из девяти блок-панелей с фильтрами, основу которых составляли сетки нормальной точности из нержавеющей стали. В нижней части конструкции преграды с необогреваемой стороны устанавливались соединительные напорные головки с резиновыми кольцами, к которым подсоединялись напорные рукава для подачи воды к распыляющим форсункам, расположенным в верхней части конструкции. Давление воды в системе при испытаниях составляло 0,4 МПа (рабочее давление от 0,4 до 0,6 МПа).

Испытания проводились в соответствии с методами, нормируемыми ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции» [110] и ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования» [111].

В соответствии с требованиями [28, 110, 112] для нормирования пределов огнестойкости для ненесущих и внутренних стен и перегородок используют предельное состояние по потере целостности (E), теплоизолирующей способности (I) или достижения предельной величины плотности теплового потока на нормируемом расстоянии от необогреваемой поверхности конструкции (W).

Предельным состоянием по E является образование в конструкции сквозных трещин или отверстий, через которые на необогреваемую поверхность проникают продукты горения или пламя. В процессе испытания потерю целостности ограждающей конструкции определяют при помощи ватного тампона по [111], который помещают в металлическую рамку с держателем и подносят к местам, где ожидается проникновение пламени или продуктов горения, и в течение 10 с фиксируют на расстоянии 20–25 мм от поверхности образца. Время от начала испытания до воспламенения или возникновения тления со свечением тампона является пределом огнестойкости конструкции по признаку потери целостности, при этом обугливание тампона, происходящее без воспламенения или без тления со свечением, не учитывают.

Предельными состояниями по I являются повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции в среднем более чем на 140 °С или в любой точке этой поверхности более чем на 180 °С в сравнении с температурой конструкции до испытания или более 220 °С независимо от температуры конструкции до испытания. При оценке достижения допустимой величины плотности теплового потока W , равной 3,5 кВт/м² (с отклонением ± 5 %), измерения проводятся на расстоянии 0,5 м от геометрического центра необогреваемой поверхности конструкции преграды.

Для определения численных значений критериев отнесения рассматриваемой преграды к соответствующему классу пожарной опасности [28] использовался метод,

приведенный в ГОСТ 30403-2012 «Конструкции строительные. Метод испытаний на пожарную опасность» [113], в соответствии с которым, без испытаний конструкций допускается устанавливать следующие классы пожарной опасности:

К0 – для конструкций, выполненных только из материалов группы горючести НГ;

К3 – для конструкций, выполненных только из материалов группы горючести Г4.

Для остальных конструкций классы пожарной опасности могут быть установлены только в результате огневых испытаний.

Испытания образцов проводились при температуре окружающей среды от 8 до 15 °С, атмосферном давлении от 98,6 до 100,2 кПа и относительной влажности 43–51 %. Измерения этих величин проводились перед началом испытаний на расстоянии 1,2 м от необогреваемой поверхности образцов.

Процедура испытаний заключалась в следующем. Осуществлялся жесткий монтаж преграды в держателе образца (испытательной раме), к которому заранее были приварены четыре металлические пластины. Посредством использования саморезов по металлу через пластины образец крепился к испытательной раме. Зазор между торцами и обрамлением держателя образца заделывался огнеупорным керамическим стекловолокном. Держатель с образцом устанавливался в технологическом проеме вертикальной печи для испытания строительных конструкций на огнестойкость. Горячие спаи печных термоэлектрических преобразователей (термопар), в количестве пяти штук, устанавливались равномерно по площади вертикального огневого проема на удалении не менее 200 мм от стен, пола и потолка огневого проема и на расстоянии 100 ± 10 мм от обогреваемой поверхности образца. На необогреваемой поверхности одну термопару располагали в центре, а остальные – в середине прямых, соединяющих центр и углы огневого проема печи (рисунок 4.9).

Испытания проводились на метрологически аттестованной малогабаритной печи для испытания строительных конструкций на огнестойкость с использованием поверенных средств измерений (таблица 4.1).

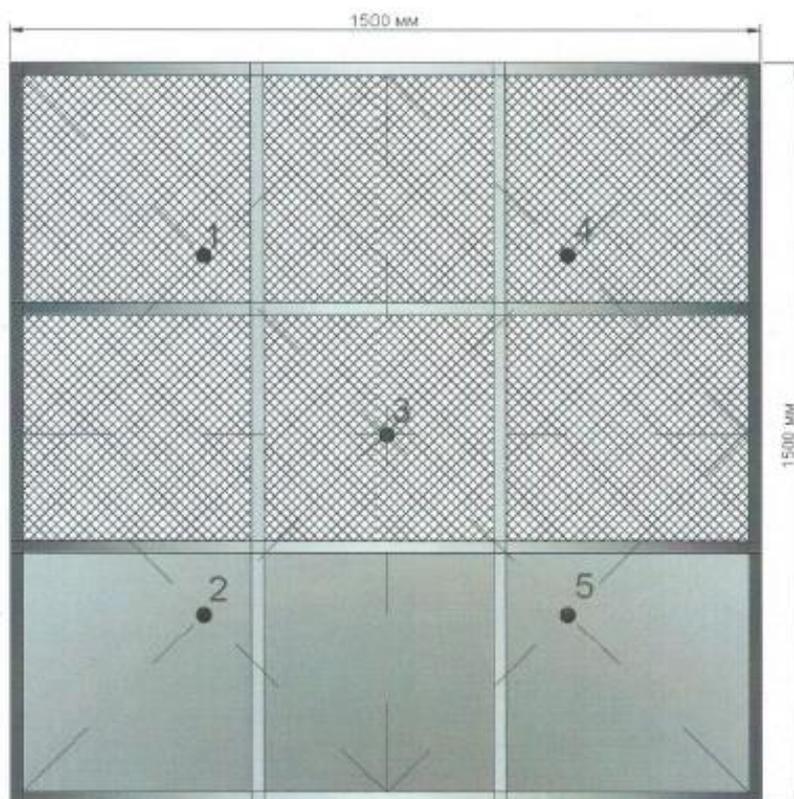


Рисунок 4.9 – Схема расположения термопар на необогреваемой поверхности образца преграды

Таблица 4.1 – Перечень и основные характеристики средств измерений

Наименование средств измерения	Пределы измерений	Класс точности
Секундомер механический «СОСпр-2б-2-010»	0-60 мин. Цена деления: секундной – 0,2 с.; минутной – 1 мин.	Второй
Линейка измерительная металлическая	0 – 1000 мм	Ц. д. 1 мм
Рулетка измерительная металлическая	0 – 3 м	Ц. д. 1 мм
Анемометр АТТ 1004	0,1 – 20,0 м/с	$\pm(0,2+0,05V)$ м/с, где V – измеренное значение скорости воздушного потока
Барометр-анероид метеорологический «БАММ-1»	80 – 106 кПа	Предел допускаемой основной погрешности $\pm 0,2$ кПа
Измеритель влажности и температуры «ИВТМ-7»	0 – 99 % минус 20 ... 50 °С	$\pm 2,0$ % $\pm 0,2$ °С
Термопара КТХА 0.2.02-937-к1-О- С321-3-500/500	минус 40 ... 500 °С	Первый
Термопара КТХА 0.2.02-938-к1-Н- Т310-3-2200/2000	минус 40 ... 1100 °С	Первый
Измерительный модуль аналогового ввода сигналов SM331, тип 6ES7-331-7PF02-0AB0	минус 150 ... 1372 °С	$\pm 0,5$ °С

На рисунке 4.10 представлен фрагмент испытаний образца преграды на огнестойкость.



Рисунок 4.10 – Фрагмент испытаний образца преграды на огнестойкость

Результаты испытаний на предел огнестойкости образца преграды и их сравнение с требуемыми нормативными значениями представлены в таблице 4.2 и на рисунках 4.11–4.13.

Таблица 4.2 – Результаты испытаний на предел огнестойкости образца преграды

Ссылка на пункт нормативного документа	Наименование исследуемого параметра	Значение параметра	
		Нормативное	Фактическое
1	2	3	4
пп. 6.1, 6.2 [111]	Температурный режим	$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1)$	В пределах нормы (см. рисунок 4.11)
пп. 4.2 [110]	Давление в печи: - через 5 мин. после начала огневых испытаний на высоте 2250 мм; - от начала и до окончания огневых испытаний	10 ± 2 Па	9 – 11 Па
		Не более 20 Па	9 – 11 Па

Продолжение таблицы 4.2

Ссылка на пункт нормативного документа	Наименование исследуемого параметра	Значение параметра	
		Нормативное	Фактическое
1	2	3	4
п. 8.1.2 [110]	Потеря теплоизолирующей способности (I)	Потеря теплоизолирующей способности (I) в результате повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции в среднем более чем на 140 °С или в любой точке этой поверхности более чем на 180 °С в сравнении с температурой конструкции до испытания или более 220 °С независимо от температуры конструкции до испытания	На 150 мин. потери теплоизолирующей способности не зафиксировано (см. рисунок 4.12)
п. 8.1.3 [110]	Потеря целостности (E)	Потеря целостности (E) в результате образования в конструкции сквозных трещин или отверстий, через которые на необогреваемую поверхность проникают продукты горения или пламя	На 150 мин. потери целостности не зафиксировано
п. 5.4 [112]	Потеря теплоизолирующей способности (W)	Потеря теплоизолирующей способности (W) вследствие достижения допустимой величины плотности потока теплового излучения, равной 3,5 кВт/м ² (с отклонением $\pm 5\%$)	На 150 мин. потери теплоизолирующей способности вследствие достижения допустимой величины плотности потока теплового излучения, равной 3,5 кВт/м ² не произошло (см. рисунок 4.13)

Учитывая, что конструкция образца выполнена только из материалов группы горючести НГ, установлен класс пожарной опасности – К0 [113].

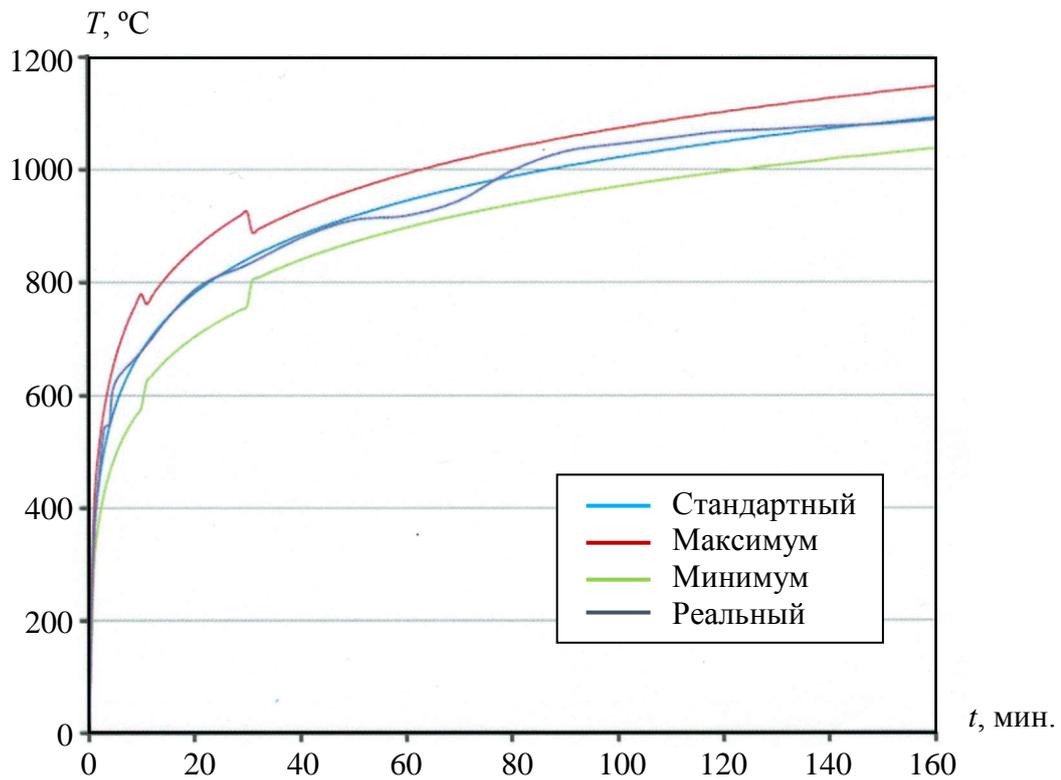


Рисунок 4.11 – График температурного режима в огневой камере печи при испытании образца преграды

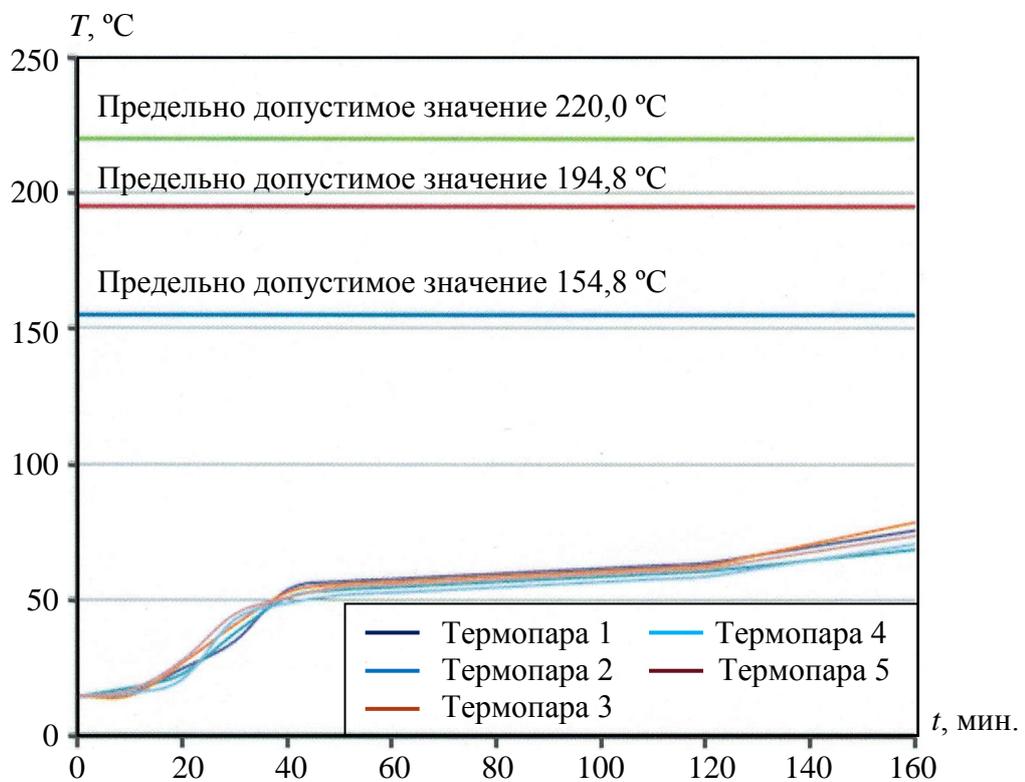


Рисунок 4.12 – График изменения температуры на необогреваемой поверхности образца преграды при испытании

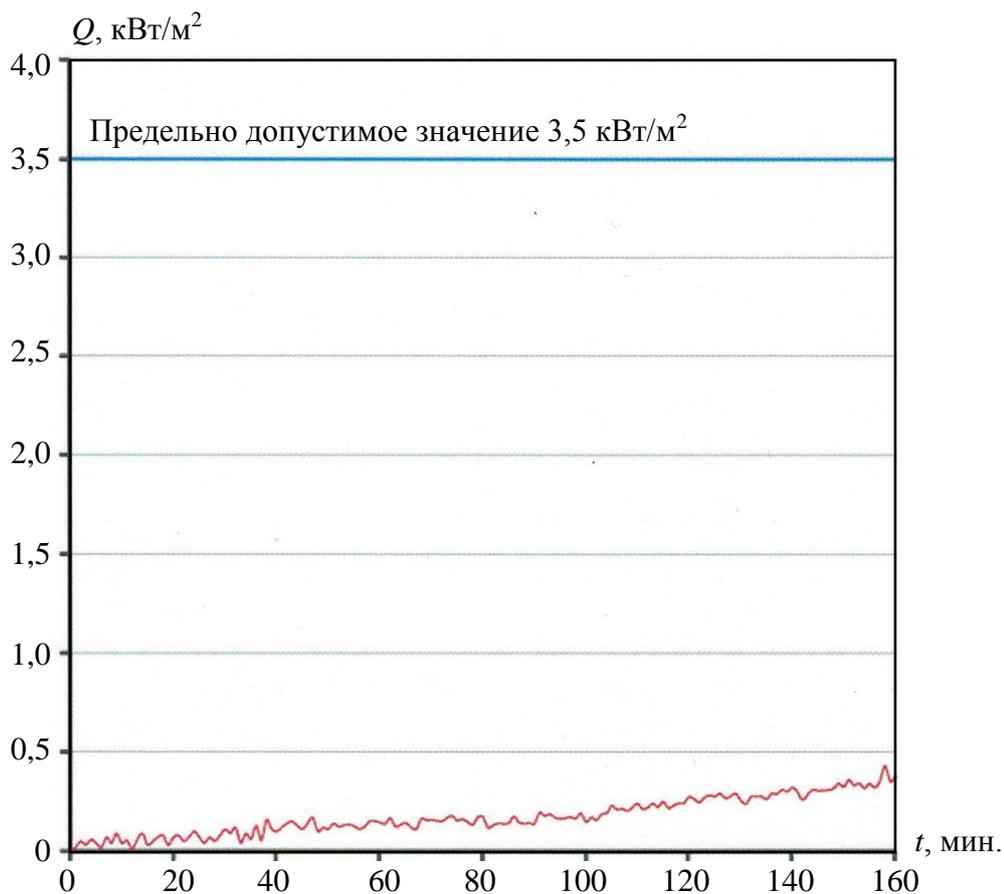


Рисунок 4.13 – График изменения плотности потока теплового излучения при испытании образца преграды

Таким образом, в результате проведенных сертификационных испытаний установлено, что предел огнестойкости образцов преград на основе теплозащитных сетчатых экранов составляет не менее $EIW 150$.

Так как конструкции образцов выполняются только из материалов группы горючести НГ, то их класс конструктивной пожарной опасности – К0.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о возможности применения теплозащитных сетчатых экранов в конструкциях противопожарных преград с целью их практического применения, в первую очередь, на объектах нефтегазовой отрасли страны для защиты людей и оборудования от тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ.

4.4 Экспериментальное исследование характеристик противопожарной преграды при возникновении аварийной ситуации в местах хранения сжиженного природного газа

4.4.1 Разработка экспериментального стенда и методики исследований

Для проведения экспериментальных исследований в условиях максимально приближенных к реальным аварийным ситуациям на объектах производства и потребления СПГ потребовалось создание крупномасштабного полигонного стенда. При разработке полигонного экспериментального стенда основное внимание уделялось выполнению следующих ключевых условий:

- обеспечение возможности проведения экспериментов в широком диапазоне изменения условий выброса СПГ и параметров окружающей среды;
- максимальное приближение условий проведения экспериментов к реальным аварийным ситуациям;
- обеспечение безопасности участников проведения экспериментов.

В состав полигонного экспериментального стенда входили следующие основные установки, устройства и элементы:

- транспортная емкость с СПГ;
- установка водяного орошения транспортной емкости с СПГ;
- установка пожаротушения транспортной емкости с СПГ;
- пульт регулирования расхода газа, снабженный пневматическими и механическими редукторами;
- пульт измерения расходов газа;
- линии подачи СПГ в ограждение резервуара и внешний очаг горения;
- ограждение резервуара, представляющее собой бетонный короб с размерами 3,0×3,0 м и высотой 1,0 м;
- противопожарная преграда в виде устройства для рассеивания газового облака, выполненная в виде короба с размерами 3,0×3,0 м и высотой 4,0 м;

– цилиндрическая емкость диаметром 1,0 м и высотой 3,0 м, выполняющая функции имитатора резервуара с СПГ;

– система водообеспечения, состоящая из водопроводной сети с соответствующей запорной арматурой и насосной станцией, фильтров для очистки воды, проложенного в межсеточном пространстве трубопровода с укрепленными форсунками и системой измерения расхода воды;

– измерительная и регистрирующая аппаратура, метеостанция.

Принципиальная схема стенда представлена на рисунке 4.14.

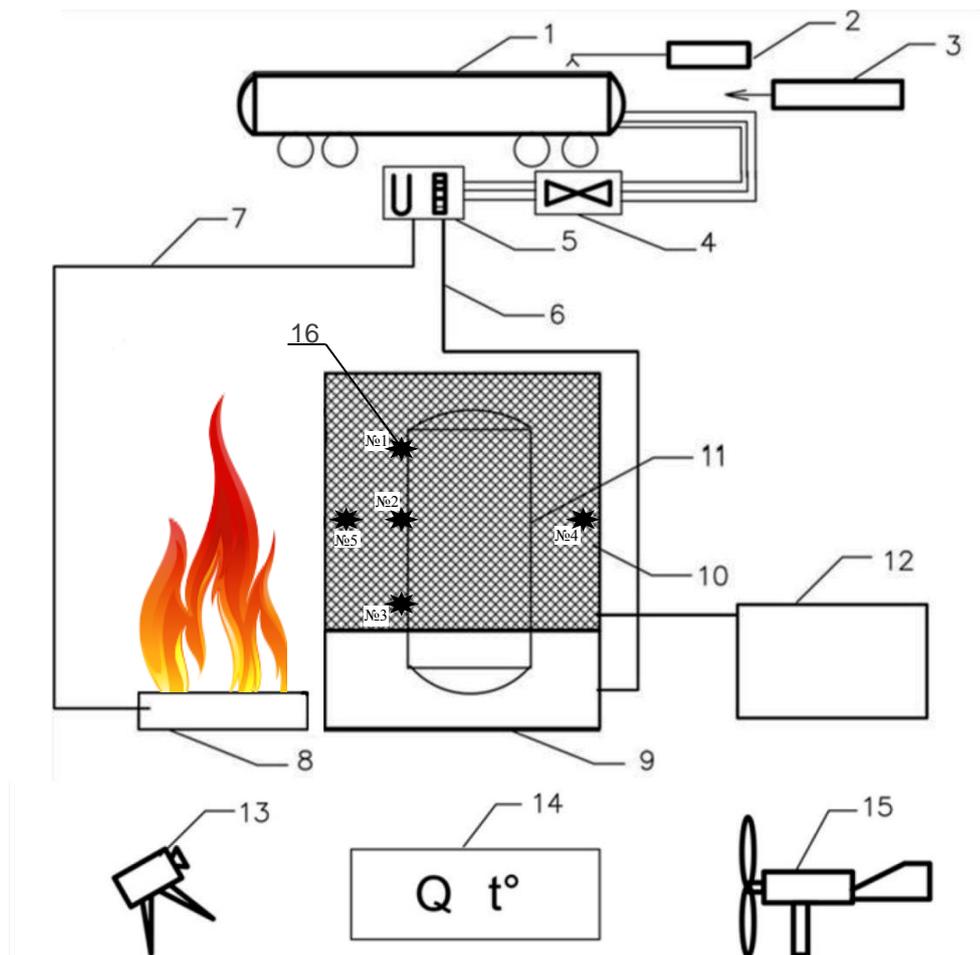


Рисунок 4.14 – Принципиальная схема полигонного экспериментального стенда для исследования характеристик противопожарного устройства

в условиях горения пролива СПГ:

- 1 – транспортная емкость с СПГ; 2 – установка водяного орошения; 3 – установка пожаротушения;
 4 – пульт регулирования расхода газа; 5 – пульт измерения расхода газа; 6 – линия подачи СПГ в ограждение резервуара; 7 – линия подачи СПГ в очаг горения; 8 – очаг горения пролива СПГ;
 9 – ограждение резервуара; 10 – противопожарное устройство; 11 – цилиндрическая емкость;
 12 – система водообеспечения; 13 – видео- и фоторегистрирующая аппаратура;
 14 – измерительная и регистрирующая аппаратура; 15 – метеостанция;
 16 – датчики и термопары (№№ 1–5)

Проведение экспериментов осуществлялось по следующей методике. Цилиндрическая емкость (11) диаметром 1,0 м и высотой 3,0 м, выполняющая функцию имитатора резервуара с СПГ устанавливалась в вертикальном положении в центре бетонного ограждения (9), представляющего собой в плане квадрат со стороной 3,0 м и высотой 1,0 м. Четыре модуля противопожарного устройства (10) размером 3,0×4,0 м устанавливались на верхней кромке ограждения и образовывали прямоугольный параллелепипед высотой 4,0 м, внутри которого и находилась защищаемая емкость с СПГ. Внутри конструкции экрана устанавливались термопары и датчики тепловых потоков (16). Вокруг установки размещались датчики тепловых потоков и газовые анализаторы (14). Транспортная емкость с СПГ (1) через пульт регулирования расхода газа (4) и измерительный пульт (5) подсоединяется через линии подачи СПГ (6) и (7) к ограждению резервуара (9) и внешнему очагу горения (8). Приводятся в готовность установка водяного орошения транспортной емкости с СПГ (2) и установка пожаротушения транспортной емкости с СПГ (3). Включается измерительная и регистрирующая аппаратура (13) и (14). СПГ подается в ограждение резервуара (9) или внешний очаг горения (8). Включается система водообеспечения (12). Облако СПГ поджигается и осуществляется регистрация измеряемых параметров. В ходе проведения эксперимента с помощью метеостанции (15) регистрируются параметры окружающей атмосферы.

После окончания опыта, приведения установки в первоначальное состояние и изменения одного из начальных условий эксперимента (расход СПГ, расход воды, расстояние от противопожарных преград до источников теплового потока, время горения и т. п.) процедура опыта повторяется вновь.

4.4.2 Результаты экспериментов и обработка полученных данных

Испытания противопожарного устройства при горении пролива СПГ проводились в условиях мощных тепловых потоков. При температуре пламени до 1800 °С среднеповерхностная плотность теплового потока достигала 220 кВт/м².

При проведении опытов ставилась цель максимально возможного приближения экспериментальных исследований к реальным условиям развития пожара, в частности:

– горение пролива СПГ осуществлялось как внутри, так и снаружи конструкции;

– для интенсификации горения в зону пролива дополнительно подавался СПГ с расходом до 20 л/с;

– при проведении экспериментов были задействованы силы и технические средства пожарной охраны, а, именно, вода в оросительную систему конструкции подавалась непосредственно от насосов пожарных автомобилей.

Экспериментальные исследования характеристик противопожарного устройства в условиях горения пролива СПГ с плотностью теплового излучения пламени до 220 кВт/м² проводились в два этапа:

1) исследования характеристик противопожарного устройства в условиях горения пролива СПГ с внешней стороны конструкции;

2) исследования характеристик противопожарного устройства в условиях горения пролива СПГ внутри конструкции.

4.4.2.1 Исследования характеристик противопожарного устройства в условиях горения пролива сжиженного природного газа с внешней стороны конструкции

Конструкция противопожарного устройства была выполнена в виде короба с размерами сторон 3,0×4,0 м и устанавливалась на бетонное ограждение, где размещался защищаемый цилиндрический резервуар (рисунки 4.15, 4.16).

Проведение экспериментов на представленном стенде осуществлялось в следующей последовательности. Конструкция противопожарного устройства устанавливалась на бетонное ограждение и фиксировалась с помощью элементов крепления. Внутри конструкции устанавливались термопары, датчики тепловых потоков и газовые анализаторы.



Рисунок 4.15 – Кадр монтажа противопожарного устройства



Рисунок 4.16 – Общий вид смонтированного противопожарного устройства

Вокруг установки размещались датчики тепловых потоков и газовые анализаторы. Источником теплового излучения являлся СПГ, наливаемый в противень размером $3,0 \times 2,0 \times 0,3$ м, размещенный на расстоянии 0,2 м от передней стенки ограждения.

В ходе проведения опытов осуществлялось измерение тепловых потоков, температуры и концентрации СПГ в различных точках внутри и снаружи конструкции. Огневые эксперименты по обеспечению пожаровзрывобезопасности емкости с СПГ от воздействия внешних источников теплового излучения производились в условиях горения пролива СПГ в непосредственной близости от ограждения в течение 10 мин. (рисунок 4.17).



Рисунок 4.17 – Фрагмент воспламенения пролива СПГ в непосредственной близости от противопожарного устройства

Датчики теплового потока, установленные с внутренней стороны конструкции (рисунок 4.18), показали, что значения тепловых потоков, падающих на панели противопожарного устройства, достигали 220 кВт/м^2 .

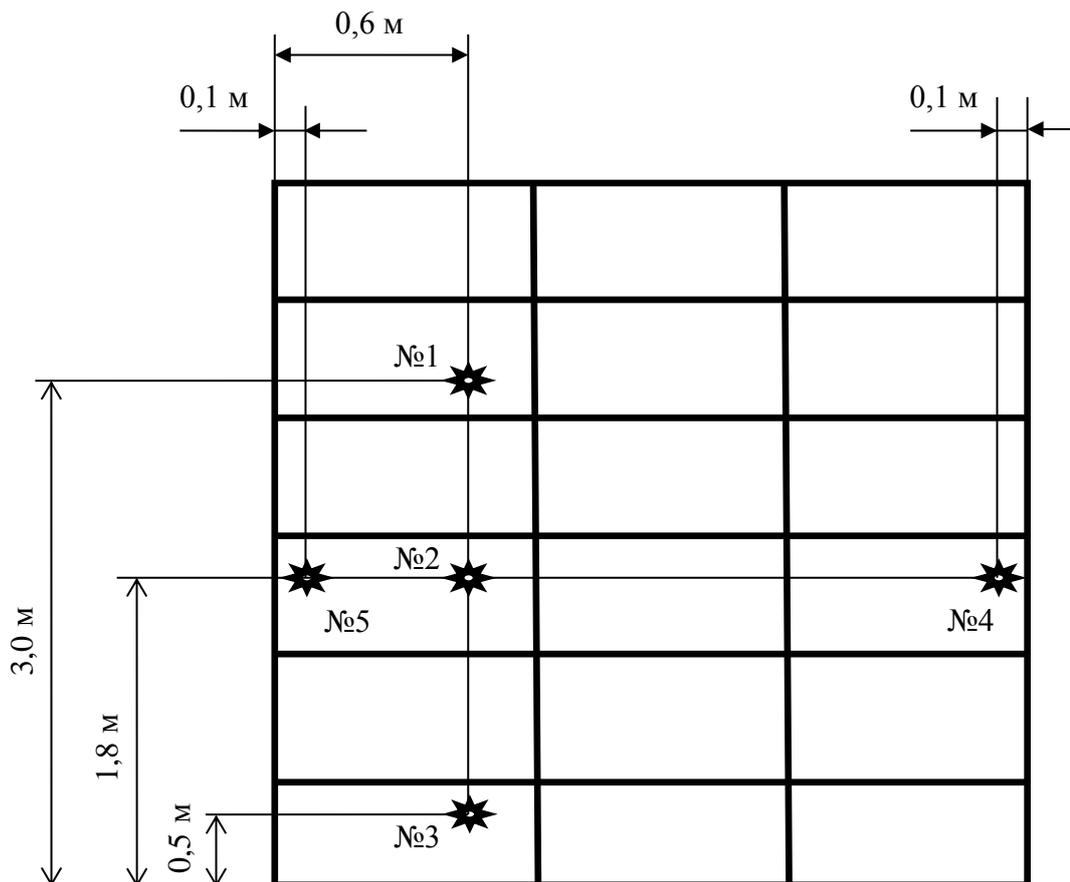


Рисунок 4.18 – Схема размещения датчиков теплового потока внутри конструкции

Результаты измерений тепловых потоков внутри конструкции на расстоянии 0,3 м от панелей устройства при горении пролива СПГ в непосредственной близости от него представлены в таблице 4.3 и на рисунке 4.19.

Таблица 4.3 – Максимальные значения тепловых потоков внутри конструкции

Номер датчика по схеме размещения (см. рисунок 4.19)	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Максимальное зафиксированное значение теплового потока, кВт/м ²	4,8	4,3	3,8	2,9	2,5

Из представленных в таблице 4.3 и на рисунке 4.19 данных видно, что значения тепловых потоков за противопожарным устройством зафиксированы в диапазоне от 2,5 до 4,8 кВт/м², при этом интенсивность теплового потока перед экраном составляла 200–220 кВт/м².

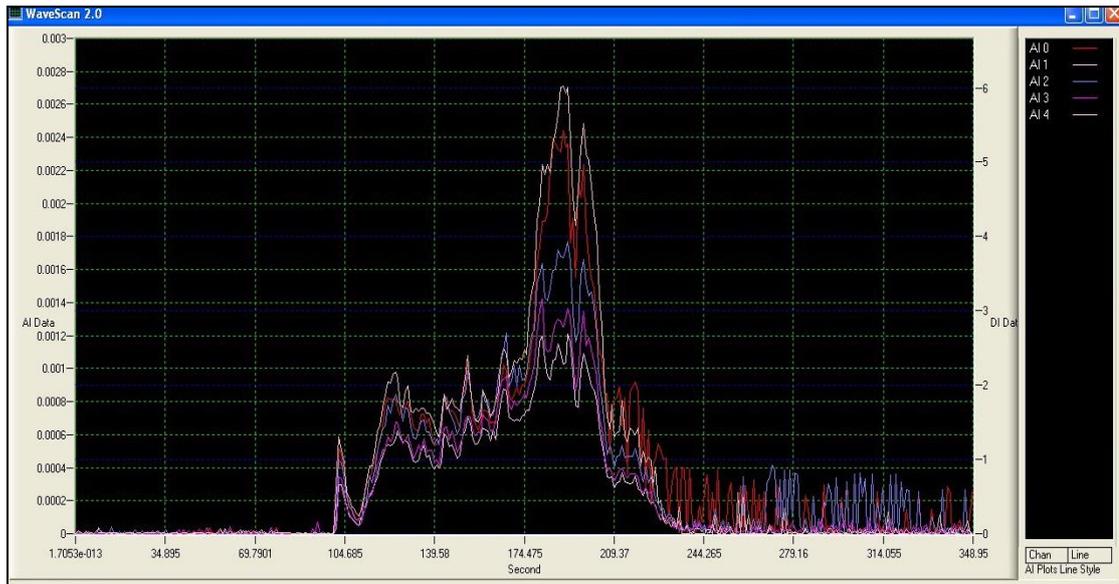


Рисунок 4.19 – Фрагмент результатов измерений тепловых потоков внутри конструкции на расстоянии 0,3 м от панелей устройства

Анализируя результаты экспериментальных исследований эффективности противопожарного устройства можно заключить, что оно обеспечивает высокую степень ослабления теплового потока (не менее чем в 45 раз). Таким образом подтверждена высокая эффективность противопожарного устройства в условиях аварийных ситуаций, связанных с проливом и горением СПГ.

4.4.2.2 Исследования характеристик противопожарного устройства в условиях горения пролива сжиженного природного газа внутри конструкции

В данной серии экспериментов СПГ подавался во внутренний объем конструкции (рисунок 4.20).

Как видно из рисунка 4.20 сетчатые панели без подачи воды являются негерметичными и через 3–5 с испаряющийся газ начинает свободно проникать через нижнюю часть сеточных панелей конструкции и растекаться по поверхности земли. После подачи воды в систему водоорошения противопожарного устройства происходит герметизация сетчатых поверхностей образующимися водяными пленками, что практически исключало проникновение газа и продуктов сгорания сквозь них.



10 с от момента подачи СПГ



1 мин. от момента подачи СПГ



Подача воды на экран



Поджиг СПГ внутри конструкции



5 мин. от момента поджига СПГ



Прекращение подачи СПГ

Рисунок 4.20 – Фрагменты экспериментов с проливом СПГ
во внутреннем объеме конструкции

При поджиге газа, испаряющегося во внутреннем объеме конструкции, происходила вспышка с последующим переходом горения в верхнюю часть ограждения. Датчики замера температуры в характерных сечениях противопожарного устройства показали, что в нижней части конструкции (от 0 до 2,0 м от уровня земли) нагрева не происходило, то есть горение на поверхности пролива СПГ отсутствовало. Наблюдалось горение на высоте более 3,5 м от уровня земли (на расстоянии около 0,5 м от верхнего среза экранов), но и оно прекратилось при увеличении расхода газа, и пламя переместилось на верхний срез конструкции.

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о том, что данная конструкция наряду с теплозащитными свойствами обладает газоизолирующей способностью и свойствами предотвращения горения на поверхности пролива за счет исключения доступа окислителя (воздуха) в зону горения. Таким образом, исключается горение в наиболее опасном месте – под днищем резервуара, пламя переносится на уровень верхнего среза, и при соответствующей высоте конструкции защищаемый объект будет находиться вне зоны прямого воздействия пламени.

4.5 Измерительная и регистрирующая аппаратура, используемая при проведении экспериментов

При проведении экспериментальных исследований осуществлялись измерения и проводился контроль следующих основных параметров и характеристик:

- плотность теплового потока;
- температура жидкости, газа и технологического оборудования;
- концентрация газа внутри противопожарного устройства и в окружающем пространстве.

Плотность теплового потока замерялась при помощи датчиков.

Для измерения температуры жидкости, газа и противопожарного устройства использовались термосопротивления (ТС) марки ТСПв-1288-100П.В.4 с диапазоном измерений от минус 200 до 300 °С, подключаемые по трехпроводной схеме, и термоэлектрические преобразователи (термопары) типа ТПР-1288-2000 В/2/1 с диапазоном измерений от 300 до 1600 °С, подключаемые по двухпроводной схеме.

Концентрация газа внутри противопожарного устройства и в окружающем пространстве фиксировалась с помощью газоанализаторов марки АМТ-03 (производитель ФГУП СПО «Аналитприбор», г. Смоленск).

В состав электронной системы измерений входили:

- ноутбук *iRu* с программным обеспечением *WaveScan-2.0* и *DeviceManager* фирмы *Advantech* для работы с аналогово-цифровым преобразователем (далее АЦП) через *USB* порт;
- модуль АЦП *AdvantechUSB-4718*, предназначенный для ввода сигналов термопар, с целью дальнейшей их обработки в программном модуле *WaveScan*. Поддерживает до 7 различных типов термопар (*J, K, T, E, R, S, B*), 6 диапазонов входного сигнала по напряжению, токовые сигналы 0~20 мА или 4~20 мА (для подключения различных датчиков) и имеет 16 каналов цифрового ввода-вывода с групповой изоляцией;

- автоматический преобразователь интерфейсов *USB/RS-485* ОВЕН АС4, предназначенный для взаимного преобразования сигналов интерфейсов *USB* и *RS-485*;
- модуль сбора данных МСД-100, предназначенный для сбора, хранения и передачи данных, полученных от других устройств;
- газоанализатор метана АМТ-03. Принцип действия газоанализатора – термохимический в диапазоне измерения от 0 до 2,5 %(об.), термокондуктометрический – в диапазоне измерения от 5 до 100 %(об.);
- приемник теплового потока термоэлектрический ТП-2001, предназначенный для измерения температуры теплопоглощающего элемента приемника, нагреваемого падающим тепловым потоком, с целью определения плотности данного теплового потока в единицах Вт/м².

ГЛАВА 5 МОДЕЛЬНЫЙ РЯД ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ПРЕГРАД И ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА ПРАКТИКЕ

Результаты выполненных в работе теоретических и экспериментальных исследований, в том числе натуральных испытаний, позволили разработать модельный ряд противопожарных преград и теплозащитных экранов «Согда», успешно применяемых на практике для решения следующих основных задач:

- предотвращение распространения пожара из одной части здания, сооружения в другую или между ними;
- повышение пожаробезопасности объектов для сжижения, хранения и использования сжиженного природного газа;
- защита личного состава при тушении пожаров в жилых домах и зданиях;
- защита оборудования, обеспечение эвакуации людей;
- защита операторов лафетного ствола на предприятиях нефтегазовой, топливной, химической промышленности и других пожароопасных объектах;
- защита людей при проведении работ по ликвидации аварий на газовых и нефтяных фонтанах.

5.1 Противопожарные преграды для защиты пожароопасных объектов

Противопожарные преграды предназначены для защиты пожароопасных объектов, в том числе для защиты резервуаров с нефтепродуктами (используются для ограждения емкостей с тушащим веществом).

Противопожарные преграды могут использоваться для разделения внутреннего объёма помещений на противопожарные отсеки, позволяют сокращать расстояние между пожароопасными объектами. Они незаменимы на морских нефтегазовых платформах, морских судах. Из них можно создавать «островки безопасности» для персонала (пассажиров), которым при пожаре невозможно покинуть морскую платформу или судно.

Противопожарные преграды успешно апробированы в ряде экспериментов по тушению пожаров на крупных пожароопасных объектах. В частности, они были применены для защиты установок пожаротушения от тепловых потоков, в целях предотвращения выхода из строя блоков с электроникой. Данные установки пожаротушения являлись составной частью разработанного под эгидой ВНИИПО МЧС России инновационного способа тушения пожаров в резервуарах с нефтепродуктами с подачей газоаэрозоленасыщенной пены.

Первые опыты по тушению бензина были проведены на полигоне Оренбургского филиала ВНИИПО МЧС России в резервуарах объемом 5000 м³. По результатам этих опытов была выявлена необходимость оснащения оборудования защитой от теплового потока. В частности, в последующих экспериментах на резервуаре объемом 20000 м³ в качестве горючей нагрузки использовался бензин АИ-92 в количестве 46 т. Борт резервуара в его верхней части при горении нагревался до 1200 °С. Для защиты стационарных емкостей с огнетушащим веществом были разработаны две противопожарные преграды размерами 6×6 м, расположенные под углом 90° друг к другу и закрепленные подкосами (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Применение противопожарной преграды «Согда» при тушении горящего резервуара

Как показали эксперименты, опасность представляли не только сами тепловые потоки от горящего бензина, но и ветер, меняющий направление на открытых площадях. Порывы ветра временами несли пламя непосредственно на установки пожаротушения, но противопожарные преграды предотвратили выход оборудования из строя.

Последующие эксперименты были проведены с использованием передвижных установок тушения, размещенных в контейнере, и доставляемых к очагу возгорания. Противопожарные преграды и в этих испытаниях показали свою эффективность в качестве защиты оборудования от теплового воздействия (рисунок 5.2).



Рисунок 5.2 – Применение противопожарной преграды «Согда» для защиты мобильной установки пожаротушения

5.2 Противопожарное устройство для рассеивания газового облака, образующегося при утечке из наземной емкости хранения сжиженного природного газа

Противопожарное устройство разработано в целях повышения пожаробезопасности объектов для сжижения, хранения и использования СПГ [114].

Противопожарное устройство обеспечивает нераспространение газового облака, возникающего при аварийной утечке из емкостей с СПГ, предотвращает его скопление до взрывоопасной концентрации и не допускает возникновение крупномасштабной аварии. При взрыве газа устройство не разрушается, так как взрывная волна проходит через сетчатые панели, при этом все противопожарные свойства устройства сохраняются (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Применение противопожарного устройства для рассеивания газового облака при аварийной утечке газа

Использование устройства позволит существенно повысить пожарную безопасность предприятий по производству, хранению и переработке СПГ. Устройство может быть использовано для обеспечения пожарной безопасности наземных емкостей малых объемов, устанавливаемых на различных предприятиях и в населенных пунктах. Оно незаменимо в условиях удаленности таких объектов от пожарных пунктов, оснащенных специализированными средствами тушения пожаров.

5.3 Теплозащитные экраны для защиты личного состава пожарной охраны

5.3.1 Теплозащитный экран «Согда» 1А.01

Передвижной экран «Согда» 1А.01 (рисунок 5.4) снабжен колесами для его перемещения и предназначен для защиты от теплового излучения пожарных, выполняющих тушение с помощью ручных пожарных стволов. Под защитой экрана в условиях больших тепловых потоков пожарное звено из двух человек может производить тушение огня, а также охлаждение технологического и другого оборудования, эффективно используя огнетушащие и охлаждающие вещества, а также производить аварийно-спасательные и неотложные работы.

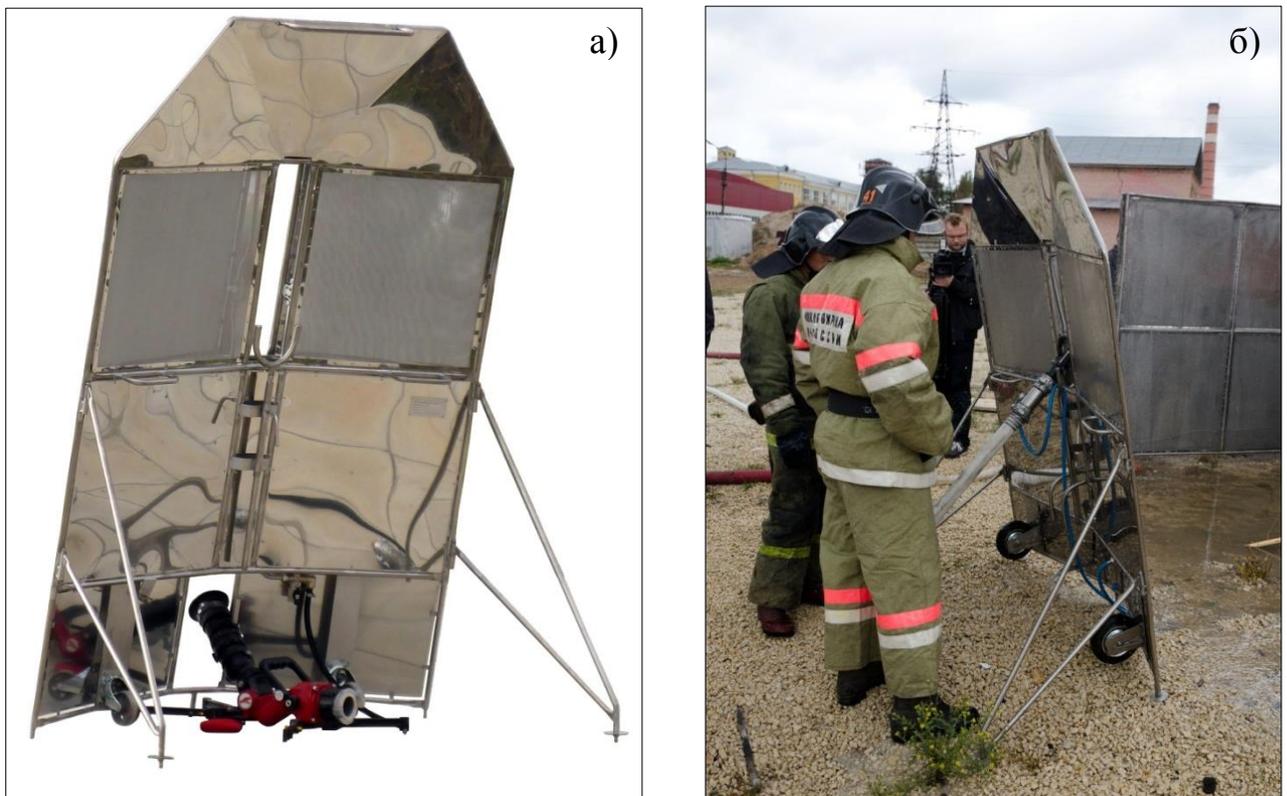


Рисунок 5.4 – Теплозащитный экран «Согда» 1А.01:
а) вид сзади; б) вид сбоку

5.3.2 Теплозащитный экран «Согда» 1 В

Переносной складной экран «Согда» 1В индивидуального пользования (рисунок 5.5) предназначен для защиты от теплового излучения пожарного, выполняющего боевые действия с ручным пожарным стволом. Небольшой вес и компактность экрана делают его наиболее удобным защитным средством при тушении пожаров в жилых домах, офисах и других помещениях, а также на открытой местности.



Рисунок 5.5 – Общий вид экрана «Согда» 1В

После применения экран складывается и убирается в специальный футляр (рисунок 5.6), предназначенный для предохранения сетчатых поверхностей экрана от механических повреждений при его перевозке в салоне или специальных отсеках пожарного автомобиля (рисунок 5.7), а также при хранении в пожарной части.



Рисунок 5.6 – Экран «Согда» 1В в футляре



Рисунок 5.7 – Экран «Согда» 1В в футляре в специальном отсеке пожарного автомобиля

5.3.3 Теплозащитный экран «Согда» 2А

Экран «Согда» 2А предназначен для установки на стационарных лафетных стволах при защите объектов нефтегазовой, топливной, химической промышленности и других пожароопасных предприятий (рисунок 5.8).

При пожаре операторы лафетного ствола, защищенные экраном, могут оставаться на боевом посту, несмотря на экстремальные тепловые потоки, и продолжать охлаждение объекта или тушение огня до полной ликвидации пожара (рисунок 5.9).



Рисунок 5.8 – Общий вид экрана «Согда» 2А



Рисунок 5.9 – Работа ствольщика за экраном «Согда» 2А

5.4 Теплозащитные экраны для защиты оборудования, эвакуации людей

Передвижной экран «Согда» 3 (рисунок 5.10) предназначен как для защиты личного состава пожарной охраны при тушении пожаров, так и для защиты оборудования и людей от теплового излучения. Под прикрытием таких экранов можно проводить неотложные работы на оборудовании во время пожара. Экран позволяет применять для тушения пожаров также пеногенераторы.

Конструкция экранов позволяет монтировать теплозащитные стены или коридоры (рисунок 5.11) для безопасной эвакуации людей из зоны огня.



Рисунок 5.10 – Общий вид экрана «Согда» 3



Рисунок 5.11 – Теплозащитный коридор на основе экранов «Согда» 3

5.5 Теплозащитные экраны для защиты людей при проведении работ по ликвидации аварий на газовых и нефтяных фонтанах

Экран «Согда» 4 разработан для обеспечения защиты людей от теплового излучения при проведении работ по ликвидации пожаров и аварий на газовых и нефтяных месторождениях (рисунок 5.12), а также защиты персонала от возможного механического поражения обломками технологического оборудования при взрыве или выбросе газа (рисунок 5.13).

Рисунок 5.12 – Общий вид теплозащитного укрытия на основе экранов «Согда» 4 при ликвидации пожара на нефтяном месторождении



Рисунок 5.13 – Общий вид укрытия на основе экранов «Согда» 4, обеспечивающего защиту персонала от возможного механического поражения обломками оборудования

Экраны устанавливаются вокруг горящего фонтана. Подаваемая через стволы вода отрывает пламя от устья скважины, что дает возможность вести работы по ликвидации аварии, не прибегая к применению эшелонированной защиты.

В заключении отметим, что все рассмотренные выше теплозащитные экраны «Согда», а также противопожарные преграды, разработанные на их основе, нашли широкое применение в подразделениях Государственной противопожарной службы МЧС России, Минобороны РФ и на различных объектах нефтегазовой отрасли страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта использования существующих преград для защиты от теплового излучения на пожарах показал, что они имеют ряд существенных недостатков, при этом простая модернизация каждого из рассмотренных способов и средств обеспечения теплозащиты не позволяет существенно повысить их эффективность, что требует поиска новых технических решений.

2. Предложен альтернативный способ защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ путем разработки противопожарных преград на основе теплозащитных сетчатых экранов, действие которых базируется на многократном ослаблении плотности теплового излучения пламени.

3. Выполнены теоретические исследования механизма теплопереноса, протекающего при взаимодействии потока энергии, излучаемого пожаром, с теплозащитным сетчатым экраном. В результате анализа численных расчетов коэффициентов поглощения тепловых потоков в режимах «сухой» и «мокрой» сеток экрана установлено, что коэффициент ослабления плотности теплового потока пожара теплозащитным экраном в режиме «мокрой» сетки достигает 80 раз.

4. Обосновано применение гидравлического способа для распыления воды в межсеточном пространстве теплозащитного экрана, как наиболее экономичного и имеющего максимальный КПД распыления. Показано, что оптимальным распыливающим устройством является форсунка на основе симбиоза конструктивных схем щелевой, струйной и ударно-струйной форсунок. Численно и экспериментально определены характеристики форсунки, обеспечивающие равномерное заполнение межсеточного пространства экрана каплями распыляемой воды.

5. Созданы экспериментальные стенды и разработаны методики проведения опытов по определению оптимальных параметров и характеристик противопожарных преград и теплозащитных экранов, обеспечивающих максимальную степень ослабления тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ.

В результаты исследований установлено, что:

– в условиях горения пролива ГЖ и штабелей лесопиломатериалов с плотностью теплового излучения пламени до 75 кВт/м^2 тепловой поток за противопожарными преградами и теплозащитными экранами с оптимальными параметрами снижается в 80 раз;

– в условиях горения пролива СПГ с плотностью теплового излучения пламени до 220 кВт/м^2 тепловой поток за противопожарным устройством снижается не менее чем в 45 раз;

– противопожарное устройство, ограждающее резервуар с СПГ, в условиях горения пролива СПГ обладает газоизолирующей способностью и свойствами предотвращения горения на поверхности пролива за счет исключения доступа окислителя (воздуха) в зону горения. Таким образом, исключается горение в наиболее опасном месте – под днищем резервуара. Пламя переносится на уровень верхнего среза и при соответствующей высоте экрана защищаемый объект (резервуар) будет находиться вне зоны прямого воздействия пламени.

6. В результате выполненных сертификационных испытаний конструкции противопожарной преграды на основе теплозащитных сетчатых экранов установлено, что ее предел огнестойкости составляет не менее $EIW 150$, при этом класс конструктивной пожарной опасности – К0.

7. Разработан модельный ряд противопожарных преград и теплозащитных экранов для защиты людей и оборудования от воздействия тепловых потоков пожаров проливов ГЖ и СПГ, нашедших широкое применение в оперативных подразделениях Государственной противопожарной службы МЧС России, Минобороны РФ и на различных объектах НГК страны с учетом специфики обеспечения их пожарной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс]: постановление Правительства Рос. Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.
2. Бобылев, Ю.Н. Развитие нефтяного сектора в России [Текст] / Ю.Н. Бобылев // Вопросы экономики. – 2015. – № 6. – С. 45–62.
3. О промышленной безопасности опасных производственных объектов [Электронный ресурс]: федер. закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ: (в ред. от 02 июня 2016 г.) // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.
4. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.
5. Монахов, В.Т. Показатели пожарной опасности веществ и материалов. Анализ и предсказание. Газы и жидкости [Текст] / В.Т. Монахов. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2007. – 246 с.
6. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения [Текст]: справ. изд. в 2 ч. / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пожнаука, 2004. – Ч. 1. – 713 с.; Ч. 2. – 774 с.
7. Швырков, С.А. Пожарная безопасность технологических процессов [Текст]: учебник / С.А. Швырков [и др.]; под общ. ред. С.А. Швыркова. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – 388 с.
8. Отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (годовые, с 2006 по 2016 гг.) [Электронный ресурс] / Ростехнадзор. – Режим доступа: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/.

9. Динамика основных показателей обстановки с пожарами в РФ за 2003–2016 года [Электронный ресурс]: Сводная статистика пожаров в РФ / wiki-fire.org – Электронная энциклопедия пожарного дела // Режим доступа: <http://wiki-fire.org/Сводная%20статистка%20пожаров%20в%20Российской%20Федерации.ashx>.

10. Лебедева, М.И. Аналитический обзор статистики по опасным событиям на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности [Электронный ресурс] / М.И. Лебедева, А.В. Богданов, Ю.Ю. Колесников // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – № 4. – 8 с. – Режим доступа: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-4/20-04-13.ttb.pdf>.

11. Давыдкин, С.А. Анализ аварий на объектах нефтегазовой промышленности [Электронный ресурс] / С.А. Давыдкин, А.Ю. Намычкин // Технологии техносферной безопасности. – 2007. – № 6. – 7 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2007-6/06-06-07.ttb.pdf>.

12. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2004 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2005. – № 1. – С. 124–128.

13. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2005 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2006. – № 1. – С. 80–84.

14. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2006 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2007. – № 1. – С. 132–135.

15. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2007 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 130–133.

16. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2008 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2009. – № 1. – С. 112–115.

17. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2009 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2010. – № 1. – С. 144–158.

18. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2010 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2011. – № 1. – С. 148–164.

19. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2011 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2012. – № 1. – С. 150–157.

20. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2012 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2013. – № 1. – С. 125–142.

21. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2013 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2014. – № 1. – С. 109–127.

22. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2014 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2015. – № 1. – С. 130–148.

23. Лупанов, С.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2015 г. [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева // Пожарная безопасность. – 2016. – № 1. – С. 174–192.

24. Матюшин, Ю.А. Обстановка с пожарами в Российской Федерации в 2016 г. [Текст] / Ю.А. Матюшин, Т.А. Чечетина // Пожарная безопасность. – 2017. – № 1. – С. 129–147.

25. Маршалл, В. Основные опасности химических производств [Текст] / В. Маршалл; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 672 с.

26. Волков, О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / О.М. Волков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 398 с.

27. Швырков, С.А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара [Текст]: монография / С.А. Швырков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 289 с.

28. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: федер. закон от 22 июня 2008 г. № 123-ФЗ: (в ред. от 02 июня 2016 г.) // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

29. О внесении изменений в ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [Электронный ресурс]: федер. закон от 10 июля 2012 г. № 117-ФЗ: (в ред. от 13 июля 2015 г.) // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

30. СП 2.13130-2012. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты [Электронный ресурс]: свод правил // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

31. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве [Текст] / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.

32. Иванов, Е.Н. Расчет и проектирование систем противопожарной защиты [Текст] / Е.Н. Иванов. – М.: Химия, 1990. – 373 с.

33. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами [Текст] / К. Борен, Д. Хафмен; пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 664 с.

34. Петров, С.В. Теплозащита в металлургии [Текст]: справочник / С.В. Петров, А.Ф. Шорин. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.

35. Бабалов, А.Ф. Промышленная теплозащита в металлургии [Текст] / А.Ф. Бабалов. – М.: Металлургия, 1971. – 360 с.

36. Петров, В.К. Исследование гидродинамической и тепловой стойкости водяной завесы [Текст] / В.К. Петров // Сб. научн. тр.: Защита от тепловых излучений на предприятиях черной металлургии. – М.: Металлургия, 1969. – С. 109–115.

37. Pat. FR 2620344(A1) Republic of France. Mobile fire-fighting structures [Electronic resource] / R. Jacques; Pat. R. Jacques [FR]. – Pub. 17.03.1989. – 12 p. Mode of access: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19890317&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=FR&NR=2620344A1&KC=A1&ND=4#.

38. Pat. FR 924016(A) Republic of France. Procédé et dispositifs pour combattre les incendies de forêts [Electronic resource] / A. Dutrey; Pat. A. Dutrey [FR]. – Pub. 24.07.1947. – 9 p. Mode of access: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19470724&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=FR&NR=924016A&KC=A&ND=5#.

39. Pat. GB 2276543(A) United Kingdom. Radiant heat shield [Electronic resource] / W. Smith; Pat. Assignee MECH TOOL ENGINEERING LND [GB]. – Pub. 05.10.1994. – 17 p. Mode of access: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19941005&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=GB&NR=2276543A&KC=A&ND=4#.

40. Pat. FR 2749517(A1) Republic of France. Thermally insulated fire screen [Electronic resource] / R. Tonkia; Pat. R. Tonkia [FR]. – Pub. 12.12.1997. – 8 p. Mode of access: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19971212&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=FR&NR=2749517A1&KC=A1&ND=4#.

41. Pat. US 5390729(A) United States. Refractory element [Electronic resource] / A. Sakurai, M. Shiotsu, T. Yano, M. Ochi, T. Sugawara; Pat. ISHIKAWAJIMA HARIMA HEAVY IND [JP]. – Pub. 21.02.1995. – 22 p. Mode of access: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19950221&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=US&NR=5390729A&KC=A&ND=4#.

42. Pat. US 6357507(B1) United States. Curtain arrangement for preventing spread of smoke [Electronic resource] / J. Stoebich, S. Siller, J. Luther, W. Schellenberger, T. Wegner, H. Linde, R. Konrad, M. Ciop; Pat. RAESONTEC N V RABOBANK TRUST C [AN]. – Pub. 19.03.2002. – 21 p. Mode of access: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20020319&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=US&NR=6357507B1&KC=B1&ND=4#.

43. Pat. US 5862851(A) United States. Curtain arrangement for preventing spread of smoke [Electronic resource] / J. Stoebich, S. Siller, J. Luther, W. Schellenberger, T. Wegner, H. Linde, R. Konrad, M. Ciop; Pat. J. Stoebich et. all [DE]. – Pub. 26.01.1999. – 19 p. Mode of access: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19990126&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=US&NR=5862851A&KC=A&ND=4#.

44. Pat. US 4077474(A) United States. Flame and smoke shutoff system [Electronic resource] / T. Hattori; Pat. T. Hattori [JP]. – Pub. 07.03.1978. – 8 p. Mode of access: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19780307&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=US&NR=4077474A&KC=A&ND=4#.

45. Пат. 2229910 Российская Федерация, МПК А62С2/10. Способ ослабления воздействия потока энергии в виде света, тепла и конвективных газовых потоков, огнестойкий экран и огнезащитное укрытие на его основе [Текст] / В.Л. Страхов [и др.]; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Теплоогнезащита» (RU). – № 2003102427; заявл. 30.01.2003; опубли. 10.06.2004, Бюл. № 16. – 3 с.

46. Абросимов, Ю.Г. Перфорированный трубопровод – основной элемент гидравлической противопожарной преграды [Текст] / Ю.Г. Абросимов, Ю.И. Козлов, В.В. Жучков // Тезисы докл. науч. конф.: Пожарная безопасность. – Черкасск, 1999. – С. 87–88.

47. Жучков, В.В. Процессы тепломассообмена внутри гидравлической противопожарной преграды на пожаре [Текст] / В.В. Жуков // Материалы XVII международной научн.-практ. конф.: Пожары и окружающая среда. – М.: ВНИИПО МЧС РФ, 2002. – С. 207–209.

48. Pat. GB 2266051(A) United Kingdom. Metal net and metal tangle anti-fire applications [Electronic resource] / L. Nevin; Pat. JAMES R ADAMS & ASSOCIATES LTD [GB]. – Pub. 20.10.1993. – 8 p. Mode of access: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19931020&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=GB&NR=2266051A&KC=A&ND=4#.

49. Пат. 2284202 Российская Федерация, МПК А62С2/00. Способ ослабления воздействия потока энергии в виде света, тепла и конвективных газовых потоков на защищаемые объекты [Текст] / В.Л. Страхов, А.М. Крутов, А.С. Мельников; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Теплоогнезащита» (RU). – № 2004138844/12; заявл. 30.12.2004; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27. – 15 с.

50. Пат. 2284205 Российская Федерация, МПК А62С3/16 Огнезащитный экран (чехол) [Текст] / В.Л. Страхов, А.М. Крутов, С.В. Заикин; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Теплоогнезащита» (RU). – № 2004134109/12; заявл. 23.11.2004; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27. – 7 с.

51. Исхаков, Х.И. Защита пожарного автомобиля от опасных факторов пожара [Текст] / Х.И. Исхаков, М.Д. Безбородько // Материалы науч.-практ. конф.: Основные направления совершенствования эксплуатации пожарной техники. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – С. 24–31.

52. Исхаков, Х.И. К оценке устойчивости пожарных автомобилей к воздействию тепловых потоков пожара [Текст] / Х.И. Исхаков // Изв. ВУЗов: Машиностроение. – 1985. – № 4. – С. 87–90.

53. Исхаков, Х.И. Исследование действия теплового излучения на пожарный автомобиль [Текст] / Х.И. Исхаков // Сб. научн. тр.: Пожарная техника и тушение пожаров. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1982. – С. 129–130.

54. Исхаков, Х.И. Свойства конструкционных материалов и функциональных систем пожарного автомобиля [Текст]: экспресс-информ. / Х.И. Исхаков, Ю.М. Кисляк, А.С. Чирко. – М.: ЦНИИТЭстроймаш: Машины и оборудование для коммунального хозяйства, 1982. – 45 с.

55. Исхаков, Х.И. Моделирование тепловых потоков при лесных пожарах в связи с исследованием тепловой устойчивости пожарных машин [Текст] / Х.И. Исхаков // Тезисы докл. межресп. конф.: Горение и пожары в лесу. – Красноярск, 1984. – С. 62–64.

56. Исхаков, Х.И. Теплоустойчивость кабин и корпуса пожарного автомобиля [Текст] / Х.И. Исхаков, А.А. Новиков // Сб. научн. тр.: Стационарные и передвижные средства борьбы с пожарами. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985. – С. 16–21.

57. Исхаков, Х.И. Пожарная безопасность автомобиля [Текст] / Х.И. Исхаков, А.В. Пахомов, Я.Н. Каминский. – М.: Транспорт, 1987. – 86 с.
58. Исхаков, Х.И. Пожарная безопасность автотранспортных средств [Текст]: обзорная инф. / Х.И. Исхаков, А.В. Пахомов. – М.: НИИНавтопром, 1986. – 43 с.
59. Исхаков, Х.И. Пожарная безопасность автомобиля [Текст] / Х.И. Исхаков // Автомобильная промышленность. – 1985. – № 8. – С. 19–21.
60. Исхаков, Х.И. Расчеты по определению тепловых нагрузок на агрегаты специального назначения во время лесных пожаров и разработка рекомендаций по повышению теплостойкости [Текст] / Х.И. Исхаков. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1982. – 14 с.
61. Исхаков, Х.И. Тепловой режим автомобиля [Текст] / Х.И. Исхаков // Сб. научн. тр.: Пожарная техника и тактика тушения пожаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – С. 2–39.
62. Кисляк, Ю.М. Исследование воздействия теплового излучения на пожарный автомобиль [Текст] / Ю.М. Кисляк, Х.И. Исхаков, А.С. Чирко // Сб. научн. тр.: Противопожарная техника и безопасность.– М.: ВИПТШ МВД СССР, 1981. – С. 9–14.
63. Иванов, Н.А. Пожары лесобиржи [Текст] / Н.А. Иванов // Сб. научн. тр.: Пожарная профилактика. – М.: Стройиздат, 1977. – Вып. 7. – С. 107–112.
64. Ануфриева, Г.П. К расчёту температуры и газового состава воздуха при лесных пожарах [Текст] / Г.П. Ануфриева [и др.] // Сб. научн. тр.: Горение и пожары в лесу. – Красноярск: ИЛиД СО АН СССР, 1973. – С. 120–126.
65. Морозюк, Ю.В. Обеспечение безопасности пожарных машин от воздействия теплового облучения пожаров лесоскладов капельной водяной защитой [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Морозюк Юрий Витальевич. – М., 1994. – 241 с.
66. Полежаев, Ю.В. Тепловая защита [Текст] / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
67. Чирко, А.С. Обоснование параметров и разработка технических средств теплозащиты пожарных автомобилей водяными пленками от воздействия теплового излучения пожаров на открытых пространствах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Чирко Александр Сергеевич. – М., 1988. – 177 с.

68. Кошмаров, Ю.А. Экспериментальные исследования теплового воздействия пламени [Текст] / Ю.А. Кошмаров, Я. Решетар, В.Г. Лимонов // Сб. научн. тр.: Противопожарная защита объектов народного хозяйства. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1979. – С. 82–87.

69. Морозюк, Ю.В. Разработка технических средств повышения эффективности тушения пожаров лесоматериалов [Текст] / Ю.В. Морозюк // Материалы всесоюзн. научн.-практ. конф.: Использование и восстановление ресурсов Ангаро-Енисейского региона. – Красноярск, 1991. – С. 138–141.

70. Морозюк, Ю.В. К проблеме обеспечения пожарной безопасности деревообрабатывающих предприятий [Текст] / Ю.В. Морозюк // Материалы всесоюзн. научн.-практ. конф.: Проблемы химико-лесного комплекса. – Красноярск, 1993. – С. 62–64.

71. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию [Текст] / П. Райст; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 228 с.

72. Пат. IAP 02163 Узбекистан, МПК A62C2/08. Способ ослабления теплового потока и устройство для защиты оператора пожарного ствола [Текст] / М.Х. Усманов (UZ); заявитель и патентообладатель М.Х. Усманов (UZ). – № IAP 20010949; заявл. 12.05.2001; опубл. 06.05.2002.

73. Пат. 2162189 Российская Федерация, МПК F16L59/02, G12B17/06, B64C1/38, B64G1/58. Способ тепловой защиты, слоистая структура для его осуществления и защитный корпус из нее [Текст] / Л.И. Лазаренков [и др.]; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Транс-Прибор» (RU). – № 2000109134/28; заявл. 13.04.2000; опубл. 20.01.2001, Бюл. № 2. – 3 с.

74. Пат. 2135235 Российская Федерация, МПК A62B17/00, A62C8/06. Огнезащитный материал [Текст] / Т.А. Куприянова [и др.]; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева» (RU). – № 98114033/12; заявл. 10.07.1998; опубл. 27.08.1999, – 3 с.

75. Страхов, В.Л. Огнезащита строительных конструкций [Текст] / В.Л. Страхов, А.М. Крутов, Н.Ф. Давыдкин; под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: Инф.-изд. центр «ТИМР», 2000. – 433 с.

76. Pat. US 5909777(A) United States. Method and apparatus for stopping the spread of a fire in an underground mine [Electronic resource] / W.B. Jamison; Pat. JAMISON FAMILY TRUST (US). – Pub. 08.06.1999. – 26 p. Mode of access: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19990608&DB=EPODOC&locale=ru_ru&CC=US&NR=5909777A&KC=A&ND=4#.

77. Заикин, С.В. Огневые испытания огнезащиты для технологического оборудования объектов добычи, переработки, транспортировки и хранения нефти и газа [Текст] / С.В. Заикин, В.Л. Страхов, В.Л. Карпов // Материалы международной научн.-практ. конф.: Актуальные проблемы пожарной безопасности. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2008. – Ч. 1. – С. 210–214.

78. Страхов, В.Л. Разработка огнезащитного укрытия и противопожарных штор, реализующих комбинированный способ огнезащиты [Текст] / В.Л. Страхов, С.В. Заикин, А.М. Крутов // Материалы международной научн.-практ. конф.: Актуальные проблемы пожарной безопасности. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2009. – Ч. 1. – С. 212–214.

79. Заикин, С.В. Трансформируемые огнезащитные ограждающие конструкции повышенной огнестойкости [Текст] / С.В. Заикин, В.Л. Страхов // Вестник МГСУ. – 2009. – № 4. – С. 107–112.

80. Страхов, В.Л. Расчет оптимальных параметров огнестойкого экрана противопожарных штор и укрытий [Текст] / В.Л. Страхов, С.В. Заикин // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 3. – С. 20–24.

81. Процессы горения [Текст]: учебное пособие / И.М. Абдурагимов [и др.]. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – 268 с.

82. Фролов, Ю.В. Теория горения и взрыва [Текст] / Ю.В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 409 с.

83. Блинов, В.И. Диффузионное горение жидкостей [Текст] / В.И. Блинов, В.Н. Худяков. – М.: АН СССР, 1961. – 208 с.

84. Иванов, Е.Н. Пожарная защита открытых технологических установок [Текст] / Е.Н. Иванов. – М.: Химия, 1975. – 220 с.
85. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения [Текст]: справ. изд. в 2 кн. / А.Н. Баратов [и др.]. – М.: Химия, 1990. – Кн. 1. – 490 с.; Кн. 2. – 384 с.
86. Терещнев, В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений [Текст] / В.В. Терещнев. – М.: Пожкнига, 2004. – 256 с.
87. Пожарная опасность строительных материалов [Текст] / А.Н. Баратов [и др.]; под ред. А.Н. Баратова. – М.: Стройиздат, 1998. – 380 с.
88. Зуев, В.Е. Оптика атмосферного аэрозоля [Текст] / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – 256 с.
89. Зуев, В.Е. Теория систем в оптике дисперсных сред [Текст] / В.Е. Зуев, В.В. Белов, В.В. Веретенников. – Томск: Спектр, 1997. – 402 с.
90. Бегунов, Б.Н. Геометрическая оптика [Текст] / Б.Н. Бегунов. – М.: Изд-во МГУ, 1966. – 262 с.
91. Заказнов, Н.П. Теория оптических систем [Текст] / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.
92. Оцисик, М.Н. Сложный теплообмен [Текст] / М.Н. Оцисик – М.: Мир, 1976. – 616 с.
93. Лариков, Н.Н. Теплотехника [Текст]: учеб. для вузов / Н.Н. Лариков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – С. 264–265.
94. Блох, А.Г. Теплообмен излучением [Текст]: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, А.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 340.
95. Кошмаров, Ю.А. Теплотехника [Текст] / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. – 501 с.
96. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена [Текст] / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
97. Витман, Л.А. Распыливание жидкости форсунками [Текст] / Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 265 с.

98. Белопольский, М.С. Сушка керамических суспензий в распылительных сушилках [Текст] / М.С. Белопольский. – М.: Стройиздат, 1972. – 128 с.
99. Пажи, Д.Г. Распылители жидкостей [Текст] / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1979. – 216 с.
100. Дитякин, Ю.Ф. Распыливание жидкостей [Текст] / Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко. – М.: Машиностроение, 1977. – 206 с.
101. Пажи, Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей [Текст] / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
102. Хавкин, Ю.И. Центробежные форсунки [Текст] / Ю.И. Хавкин. – Л.: Машиностроение, 1976. – 168 с.
103. Кулагин, Л.В. Форсунки для распыливания тяжелых топлив [Текст] / Л.В. Кулагин, М.Я. Морошкин. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
104. Пажи, Д.Г. Форсунки в химической промышленности [Текст] / Д.Г. Пажи, А.М. Прахов, Б.Б. Равикович. – М.: Химия, 1971. – 224 с.
105. Матвеев, А.Н. Молекулярная физика [Текст] / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1981. – 401 с.
106. Ходжаева, Г.К. Метеорологические методы и приборы наблюдений [Текст]: учеб. пособие / Г.К. Ходжаева. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2013. – 189 с.
107. Пажи, Д.Г. Распыливающие устройства в химической промышленности [Текст] / Д.Г. Пажи, А.А. Корягин, Э.Л. Ламм. – М.: Химия, 1975. – 200 с.
108. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. – Изд. 5-е. – М.: Энергия, 1974. – С. 49–59.
109. Протокол сертификационных испытаний противопожарных преград «СОГДА», изготавливаемых ООО «СпецПожТех» по ТУ 4854-001-81399550-2016. – Мытищи: ИЛ ООО «КОМПОМАГ», 2016. – 11 с.
110. ГОСТ 30247.1-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

111. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

112. ГОСТ Р 53308-2009. Конструкции строительные. Светопрозрачные ограждающие конструкции и заполнения проемов. Метод испытаний на огнестойкость [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

113. ГОСТ 30403-2012. Конструкции строительные. Метод испытаний на пожарную опасность [Электронный ресурс]: государственный стандарт // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон. Дан. – М., 2017. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

114. Пат. 2506103(13)С1 Российская Федерация, МПК А62С, 3/00, (2006.01). Способ рассеивания газового облака, образующегося при утечке из наземной емкости, и устройство для его осуществления [Текст] / Карпов В.Л., Шимко В.Ю., Усманов М.Х.; заявитель и патентообладатель Усманов М.Х. – № 2506103; заявл. 21.06.2012; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4. – 13 с. ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

Утверждаю:

Заместитель генерального директора
ОАО «Газпром газобезопасность»



д.т.н. Р.М. Тагиев

«15» декабря 2015 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы генерального директора ООО «СпецПожТех» Шимко В.Ю. на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме: «Противопожарные преграды на основе теплозащитных сетчатых экранов для защиты объектов нефтегазового комплекса»

Комиссия в составе: начальника отдела нормативно-технической работы и экспертизы проектов Маслова А.Я., заместителя начальника отдела экспертизы проектов Крутикова В.Н. составила настоящий Акт о том, что результаты диссертационной работы Шимко В.Ю., а именно применение противопожарных преград и теплозащитных сетчатых экранов «Согда» в соответствии с решением заместителя Председателя правления ОАО «Газпром» Ананенкова А.Г. от 23.03.2011 № 03-959 внедрены для защиты подразделений пожарной охраны и оборудования на объектах добычи, подготовки и транспорта газа ОАО «Газпром».

Начальник отдела нормативно-технической
работы и экспертизы проектов


А.Я. Маслов

Заместитель начальника отдела
экспертизы проектов


В.Н. Крутиков

«УТВЕРЖДАЮ»

Начальник

ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Гордиенко Д.М.

«24» сентября 2017 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук генерального директора ООО «СпецПожТех» Шимко Василия Юрьевича на тему: «Противопожарные преграды на основе теплозащитных сетчатых экранов для защиты объектов нефтегазового комплекса»

Комиссия в составе: Копылов Н.П. (председатель), Хасанов И.Р., Кузнецов А.Е., Федоткин Д.В. (члены комиссии)

подтверждает, что результаты диссертационного исследования Шимко В.Ю. были использованы при разработке нормативно-технических документов:

1. «Рекомендации по применению теплозащитных экранов». ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ, 2010 г.;
2. Рекомендации «Пожаробезопасное применение малотоннажных установок хранения и распределения сжиженного природного газа». ФГБУ ВНИИПО МЧС РФ, 2014 г.;
3. СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности»;
4. СП 231.1311500.2015 «Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности».

Председатель комиссии

Копылов Н.П.

Члены комиссии

Хасанов И.Р.

Кузнецов А.Е.

Федоткин Д.В.

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора
по информационным технологиям и
развитию гражданской продукции
ФГУП «Федеральный центр двойных
технологий «Союз»

Деревякин В.А.

« 01 » 10 2017г.

**АКТ**

внедрения результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук генерального директора ООО «СпецПожТех» Шимко Василия Юрьевича на тему: «Противопожарные преграды на основе теплозащитных сетчатых экранов для защиты объектов нефтегазового комплекса»

Комиссия в составе:

Каушанский Яков Михайлович (председатель комиссии),

Кононов Борис Владимирович (член комиссии),

Головкин Константин Дмитриевич (член комиссии)

подтверждает, что результаты диссертационного исследования Шимко В.Ю. были использованы при разработке и внедрении новых методов тушения нефтепродуктов в резервуарах и крупных площадных пожаров, а именно для защиты системы импульсного пожаротушения самовспенивающейся газонаполненной пеной от теплового излучения противопожарными преградами на основе теплозащитных сетчатых экранов.

Председатель комиссии

Каушанский Я.М.

Члены комиссии

Кононов Б.В.

Головкин К.Д.