

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

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

На правах рукописи



Ибатулин Равшан Камалович

**ВОДОПЛЕНОЧНЫЙ ЗАЩИТНЫЙ ЭКРАН
ОТ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЖАРА ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЛИВОНАЛИВНОЙ ЭСТАКАДЕ**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Воробьев Владимир Викторович

Москва – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ И СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СЛИВОНАЛИВНЫХ ЭСТАКАД.....	11
1.1 Железнодорожные сливоналивные эстакады на объектах нефтепродуктообеспечения.....	11
1.2 Примеры пожаров железнодорожных вагонов-цистерн с нефтью и нефтепродуктами в России	19
1.3 Примеры пожаров железнодорожных вагонов-цистерн с нефтью и нефтепродуктами за рубежом.....	30
1.4 Анализ нормативных требований к системе противопожарной защиты железнодорожных сливоналивных эстакад.....	34
ГЛАВА 2 ПОЖАР ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЛИВОНАЛИВНОЙ ЭСТАКАДЕ ПРИ ВЕТРОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	43
2.1 Сведения об исследованиях плотности лучистого теплового потока при пожаре пролива нефтепродуктов	43
2.2 Теоретическое обоснование метода решения задачи.....	62
2.3 Валидация теоретических моделей для определения параметров пожара пролива нефтепродуктов	73
2.4 Численное моделирование пожара пролива бензина на железнодорожной сливоналивной эстакаде при ветровом воздействии.....	78
ГЛАВА 3 ВОДОПЛЕНОЧНЫЙ ЗАЩИТНЫЙ ЭКРАН	85
3.1 Обзор теплозащитных экранов, устанавливаемых на пожарных вышках железнодорожных сливоналивных эстакад.....	85
3.2 Предлагаемая конструкция водопленочного защитного экрана.....	90

3.3 Экспериментальное определение параметров водопленочного защитного экрана.....	92
3.4 Водопленочный защитный экран – элемент лафетного пожарного комплекса	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одним из наиболее востребованных способов транспортировки нефтепродуктов к местам хранения, распределения и потребления является их перевозка железнодорожным транспортом [1]–[3]. Процессы заполнения и опорожнения железнодорожных цистерн осуществляются на железнодорожных сливноналивных эстакадах, характеризующихся повышенным уровнем пожарной опасности по сравнению с другими участками транспортировки.

Учитывая сложность технологического процесса и конфигурацию оборудования, пожары на эстакадах могут привести к гибели людей, значительному материальному ущербу, а также дополнительно осложняются опасностью распространения пожара на соседние цистерны с возникновением угрозы полного уничтожения производственного объекта. В связи с этим, ликвидация подобного рода пожаров является одной из наиболее сложных и опасных задач для подразделений пожарной охраны.

Для охлаждения цистерн с целью предотвращения их взрыва в очаге пожара с образованием огненного шара применяются стационарные лафетные стволы, как правило, устанавливаемые на пожарных вышках на расстоянии не менее 15 м от железнодорожных путей эстакады.

Стационарные лафетные стволы рекомендуется оборудовать водопленочными защитными экранами, обеспечивающими снижение плотности падающего лучистого теплового потока пламени при пожаре на ствольщика (оператора) в специальной защитной одежде пожарного до допустимых значений (не более 5 кВт/м^2) [35]. Однако требований к конструктивному исполнению этих экранов и их гидравлическим параметрам в нормативных документах не приводится.

В настоящее время для снижения плотности лучистого теплового потока, падающего на ствольщика, применяются:

- теплозащитные экраны, состоящие из двух металлических сеток, в пространство между которыми при возникновении пожара подается вода, распыляемая форсунками [110]–[120], [133]–[135];

- теплозащитные экраны, изготовленные из двух листов металла, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом (например, асбестом) [121].

Основной недостаток первых из приведенных выше экранов обусловлен возможностью засорения форсунок продуктами коррозии трубопроводов системы противопожарного водоснабжения и другими механическими примесями при подаче воды на тушение пожара (площадь выходного отверстия форсунки – 4 мм²).

Вторые экраны уступают по эффективности водопленочным защитным экранам, поскольку при воздействии теплового излучения пленочное течение воды обеспечивает непрерывное охлаждение этих экранов за счет отвода тепла от их конструктивных элементов.

В связи с вышеизложенным возникла необходимость разработки водопленочного защитного экрана, отличающегося простотой и надежностью конструкции в сочетании с высокой эффективностью ослабления лучистого теплового потока.

С целью определения возможности применения водопленочных защитных экранов на объектах нефтепродуктообеспечения необходимо проведение огневых испытаний, условия которых должны быть максимально приближены к реальным. Необходимо отметить, что методики таких испытаний, утвержденной в установленном порядке, в настоящее время не имеется [111]. Основным задаваемым параметром указанных испытаний является плотность падающего лучистого теплового потока, однако сведения для ее определения при пожарах на эстакадах с учетом ветрового воздействия и геометрических характеристик цистерны, находящейся над очагом пожара, в литературных источниках также отсутствуют.

Таким образом, выявленные недостатки применяемых в настоящее время экранов, а также отсутствие методики проведения их огневых испытаний обуславливают актуальность исследований, направленных на защиту оператора, работающего на пожарной вышке со стационарным лафетным стволом, от теплового излучения пламени при пожаре пролива нефтепродуктов на эстакаде, чему и посвящена настоящая работа.

Степень разработанности темы исследования. Среди классических работ по исследованию теплового излучения пламени при пожаре пролива нефтепродуктов на наружных технологических установках можно выделить работы отечественных и зарубежных ученых: Блинова В.И., Худякова Г.Н., Грушевского Б.В., Измаилова А.С., Сучкова В.П., *Thomas P.H.*, *Heskestad G.*, *Modest M.* и др. [4]–[9], [52]–[78], [94], [99].

Анализ рассмотренных работ показал, что они реализованы на основании эмпирических и полуэмпирических методов и не учитывают влияние геометрических характеристик технологического оборудования на параметры пламени при пожаре пролива нефтепродуктов с учетом ветрового воздействия.

Вопросами разработки экранов для защиты оператора, работающего на пожарной вышке со стационарным лафетным стволом, от теплового излучения пламени при пожаре пролива нефтепродуктов посвящены работы Шимко В.Ю., Усманова М.Х., Брушлинского Н.Н, Иоффе Ю.Я., Билецкого В.Ф, Евсеева Ю.Н. [113]–[121], [133]–[135].

При разработке теплозащитных сетчатых экранов недостаточное внимание уделялось их надежности при работе в условиях длительной эксплуатации на железнодорожных сливноналивных эстакадах. Отсутствие своевременного и трудоемкого технического обслуживания, связанного с удалением продуктов коррозии из трубопроводов системы противопожарного водоснабжения и конденсата паров нефтепродуктов с конструктивных элементов экранов может привести к потере их работоспособности. Применение теплозащитных экранов, изготовленных из двух листов металла, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом, противоречит требованиям [35].

Таким образом, **целью** работы являлась разработка водопленочного экрана для защиты ствольщика (оператора) лафетного ствола на пожарной вышке от теплового излучения пожара пролива нефтепродуктов на железнодорожной сливноналивной эстакаде.

Для достижения поставленной цели в работе ставились и решались следующие **задачи**:

- проведение анализа пожаров с участием железнодорожных цистерн с нефтепродуктами и нормативных требований к системе противопожарной защиты железнодорожных сливноналивных эстакад;

- обоснование совокупности моделей вычислительной гидродинамики для определения плотности падающего лучистого теплового потока при пожаре пролива нефтепродуктов;

- численное моделирование пожара пролива бензина на железнодорожной сливноналивной эстакаде при ветровом воздействии с учетом геометрических характеристик железнодорожной цистерны, находящейся над очагом пожара, и анализ полученных результатов;

- определение конструктивных и гидравлических параметров водопленочного защитного экрана с подтверждением их эффективности огневыми испытаниями опытного образца с учетом результатов численного моделирования.

Объектом исследования являлось тепловое излучение пожара пролива нефтепродуктов на железнодорожной сливноналивной эстакаде с учетом геометрических характеристик железнодорожной цистерны и ветрового воздействия.

Предметом исследования являлись конструктивные и гидравлические параметры водопленочного защитного экрана, обеспечивающие снижение плотности падающего лучистого теплового потока пламени при пожаре на ствольщика (оператора) в специальной защитной одежде пожарного до допустимых значений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обоснована совокупность моделей вычислительной гидродинамики для определения плотности падающего лучистого теплового потока при пожаре пролива нефтепродуктов, учитывающая ветровое воздействие, влияние простран-

ственного расположения технологического оборудования на параметры процессов горения, а также форму площади пролива, которая может быть представлена геометрической фигурой произвольной конфигурации.

2. Получена номограмма для определения плотности лучистого теплового потока при пожаре пролива нефтепродуктов, падающего на обогреваемую сторону водопленочного защитного экрана, расположенного на пожарной вышке на нормативном расстоянии от железнодорожных путей эстакады, в зависимости от высоты и скорости ветра.

3. Определены конструктивные и гидравлические параметры водопленочного защитного экрана, эффективность которых подтверждена результатами огневых испытаний опытного образца.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в возможности использования предложенной совокупности моделей вычислительной гидродинамики для обоснования необходимости применения противопожарных преград на объектах нефтепродуктообеспечения;

- в возможности использования полученной номограммы для предварительного планирования оперативно-тактических действий пожарных подразделений при тушении пожаров пролива нефтепродуктов на железнодорожных сливноналивных эстакадах;

- в возможности применения разработанного экрана для защиты оператора, работающего на пожарной вышке со стационарным лафетным стволом, от теплового излучения пламени при пожаре пролива нефтепродуктов.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы использованы методы математического моделирования, физического эксперимента, наблюдения, сравнения, нахождения эмпирической зависимости на основе математической обработки экспериментальных данных, описания и обобщения. Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные литературные, правовые и нормативные источники, материалы расследований пожаров с участием железнодорожных цистерн, а также научно-исследовательских работ в области разработки теплозащитных экранов.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа последствий пожаров с участием цистерн с нефтепродуктами и нормативных требований к системе противопожарной защиты железнодорожных сливноналивных эстакад;
- результаты численного моделирования пожара пролива бензина на эстакаде при ветровом воздействии с учетом геометрических характеристик железнодорожной цистерны, находящейся над очагом пожара;
- конструктивные и гидравлические параметры водопленочного защитного экрана;
- методика и результаты проведения огневых испытаний водопленочного защитного экрана.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается:

- удовлетворительной сходимостью результатов численного моделирования и экспериментального исследования горения бензина в противне диаметром 1 м;
- 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:

- конструкторской документации на серийное производство водопленочных защитных экранов, устанавливаемых на пожарных вышках железнодорожных сливноналивных эстакад для защиты ствольщика от теплового излучения пожара пролива нефтепродукта;
- учебника для бакалавров, лекции, практического и семинарского занятий по дисциплине «Пожарная безопасность технологических процессов» в Академии ГПС МЧС России.

Основные результаты работы доложены на:

- II Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018);

- Научно-практической конференции «Школа молодых ученых и специалистов МЧС России-2018» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018);
- 27-ой Международная научно-технической конференции «Системы безопасности – 2018» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018);
- VI Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019);
- Международной научно-практической конференции «Проблемы правового регулирования обеспечения пожарной безопасности на современном этапе и пути решения – 2019» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019);
- XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей» (Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 3 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 132 страницах текста, включает в себя 10 таблиц, 66 рисунков, список литературы из 144 наименований, приложение на 3 страницах.

ГЛАВА 1 ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ И СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СЛИВОНАЛИВНЫХ ЭСТАКАД

1.1 Железнодорожные сливоналивные эстакады на объектах нефтепродуктообеспечения

Элементами железнодорожного транспорта нефти и нефтепродуктов из мест добычи и производства к местам хранения, распределения, потребления являются железнодорожные вагоны-цистерны (ЖДЦ) и сливоналивные эстакады (СНЭ) [2], [3].

Железнодорожная сливоналивная эстакада для нефти и нефтепродуктов – это сооружение, расположенное возле специальных железнодорожных путей, оборудованное сливоналивными устройствами, обеспечивающее выполнение операций по сливу и/или наливу нефти и нефтепродуктов в ЖДЦ [10].

СНЭ как стационарные сооружения размещаются [2], [3]:

- на объектах добычи нефти – для налива нефти в ЖДЦ;
- на трубопроводном транспорте нефти – для налива нефти в ЖДЦ;
- на нефтеперерабатывающих заводах – для налива нефтепродуктов в ЖДЦ и слива нефти из ЖДЦ;
- на трубопроводном транспорте нефтепродуктов – для налива в ЖДЦ;
- на перевалочных нефтебазах – для слива и налива нефти и нефтепродуктов;
- на распределительных нефтебазах – для слива нефтепродуктов;
- на объектах потребления нефтепродуктов – для слива нефтепродуктов.

Внешне эстакады представляют собой длинные металлические галереи с эксплуатационными площадками, расположенными на высоте 3–3,5 м. Минимальная ширина эстакады – 1 м [11].

Эстакады устраивают на прямом, чаще тупиковом, участке железнодорожного пути. Протяженность фронта слива и налива принимают различной, но не более максимальной длины железнодорожного состава [12].

Общий вид железнодорожной сливоналивной эстакады представлен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Общий вид железнодорожной сливоналивной эстакады

В состав эстакады входят несколько наливных и сливных устройств, расположенных на расстоянии 4–6 м друг от друга и соединенных общими коллекторами. Для каждого вида жидкостей, с которыми работает эстакада, создается отдельный коллектор, и в дополнение к ним обособленный коллектор для слива неисправных цистерн [11].

Кроме того, железнодорожные сливоналивные эстакады оборудуются промежуточными резервуарами для мазута и масел, узлами учета нефтепродуктов, средствами механизации для подъема и заправки нагревательных приборов, а также перемещения ЖДЦ вдоль полотна железной дороги [10].

Эстакады, предназначенные для слива темных высоковязких нефтепродуктов, оборудуются паропроводами или средствами электроподогрева [14].

Операции слива и налива осуществляют самотеком при благоприятном рельефе местности, когда напор, создаваемый разностью геодезических отметок, обеспечивает необходимую производительность слива (налива), а также с помощью насосов.

Слив нефти и нефтепродуктов на эстакадах может осуществляться как через сливной прибор (нижний слив), расположенный внизу цистерн, так и через горловину (верхний слив). Существует два способа слива – открытый и закрытый. При открытом сливе жидкость поступает через сливной прибор цистерны в переносные желоба, затем стекает в центральный желоб, из которого по трубопроводу подается в приемный резервуар. Частный случай этой схемы – межрельсовый слив, когда нефть, минуя промежуточные звенья, сразу попадает в центральный желоб, расположенный под прибором для слива. Недостаток открытого способа – возможность загрязнения и частичная потеря нефтепродуктов из-за низкого уровня герметизации [11].

На рисунке 1.3 показана железнодорожная эстакада для нижнего слива нефти и нефтепродукта [15].

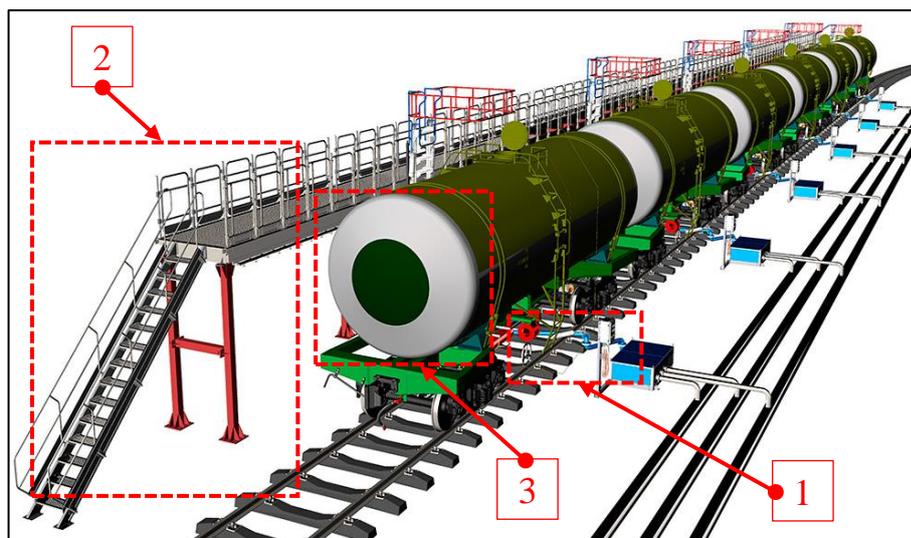


Рисунок 1.3 – Железнодорожная эстакада для нижнего слива нефти и нефтепродукта: 1 – устройство нижнего слива; 2 – эстакада; 3 – железнодорожная цистерна

Проблему герметизации решает использование закрытого слива. В этом случае вместо переносных желобов к приборам слива присоединяются гибкие рукава-шланги, а вместо центрального желоба нефть и нефтепродукты сразу попадают в выделенные для них хранения резервуары. Закрытый способ, как правило, используется при сливе легких нефтепродуктов, таких как бензин (они обладают высоким уровнем потерь от испарения). Для слива сырой нефти и темных нефтепродуктов достаточно часто используется открытый способ [11].

Операции налива нефти также, как и слив делятся на открытые и закрытые. Открытый налив нефти и нефтепродуктов применяется очень редко. Во-первых, в этом случае велика доля потерь из-за испарений. Во-вторых, столкновение струи жидкости с атмосферным воздухом может спровоцировать появление статистического электричества, которое в некоторых случаях приводит к пожару.

При наливке закрытой струей шланг опускают на дно цистерны, благодаря этому струя нефти или нефтепродукта контактирует с воздухом только в начале слива. Соответственно, при наливке закрытой струей потери бензина, например, почти в 2 раза меньше, чем в предыдущем случае [11].

Устройства для верхнего слива и налива выполнены в виде вертикально установленных трубопроводов (стояков), которые в верхней части через поворотные сальники соединяются с гибкими гофрированными шлангами (рукавами), прикрепленными для их разгрузки к поворотным консолям. Концы шлангов сливноналивных стояков для прочности оборудуют наконечниками (рисунок 1.4) [16].

Начальное заполнение цистерн нефтепродуктами следует производить со скоростью в трубопроводе не более 1 м/с до момента затопления конца загрузочной трубы на 0,4–0,5 м [10].

Диаметр коллектора налива выбирается для условия, при котором обеспечивается превышение суммарного сечения всех наливных устройств при одновременном их включении над сечением коллектора [10].

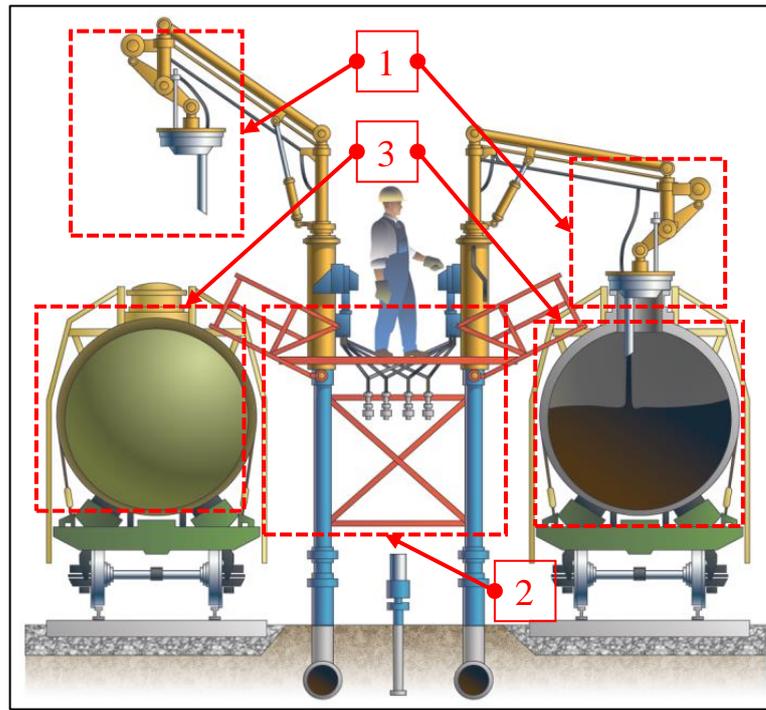


Рисунок 1.4 – Устройства для верхнего слива и налива

- 1 – устройство верхнего слива и налива;
2 – эстакада; 3 – железнодорожная цистерна

Конструкции эстакад и сливноналивных устройств должны обеспечивать техническую возможность слива и налива легковоспламеняющихся, горючих жидкостей и сжиженных углеводородных газов в ЖДЦ всех типов, пригодные для перевозки данного продукта в соответствии с действующим каталогом подвижного железнодорожного состава [10].

ЖДЦ конструктивно состоит из следующих основных частей (рисунок 1.5): рамы 7, ходовой части 6, ударно-тяговых устройств 5, тормозного оборудования 8, котла 4, внутренней 3 и наружной 10 лестниц, устройств крепления котла к раме 11, горловины 1 и сливного прибора 9, предохранительной арматуры 2 [18].

Рама служит для восприятия тяговых усилий, ударов в автосцепку, а также инерционных сил котла, возникающих при изменении скорости движения цистерны. По типу ходовой части различают 4-х и 8-осные цистерны (рисунки 1.5, 1.6). На большинстве цистерн устанавливается безсекционный котел, который состоит из цилиндрической части и двух днищ. Котел крепится к раме с помощью специальных болтов, а по краям – четырьмя хомутами с муфтами и натяжными

болтами. В верхней части котла цистерн для нефти и нефтепродуктов смонтирован колпак с люком, предназначенный для их загрузки, а в нижней – сливной прибор для их выгрузки. На цистернах устанавливают предохранительные клапаны, рассчитанные на избыточное давление 0,15 МПа и вакуум 0,02 МПа [17].

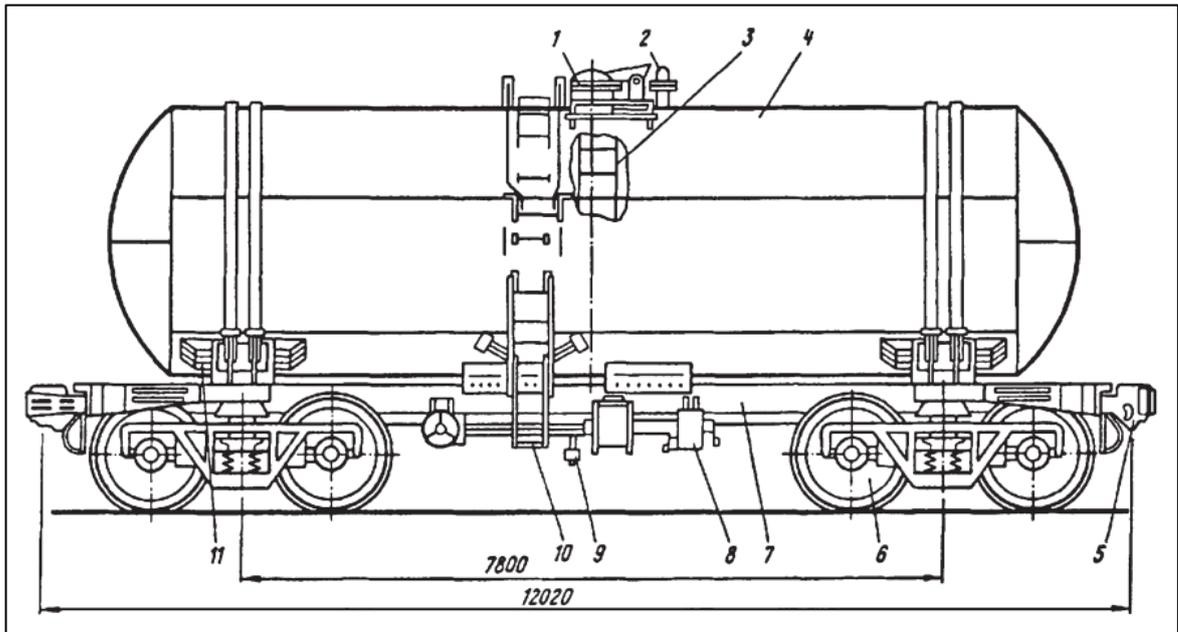


Рисунок 1.5 – Четырехосная цистерна для перевозки бензина и светлых нефтепродуктов (модель 15-1443):

- 1 – устройство загрузки; 2 – предохранительный клапан;
 3 – внутренняя лестница; 4 – котел; 5 – ударно-тяговые устройства;
 6 – ходовая часть; 7 – рама; 8 – тормозное оборудование;
 9 – устройство выгрузки; 10 – наружная лестница; 11 – крепление котла на раме

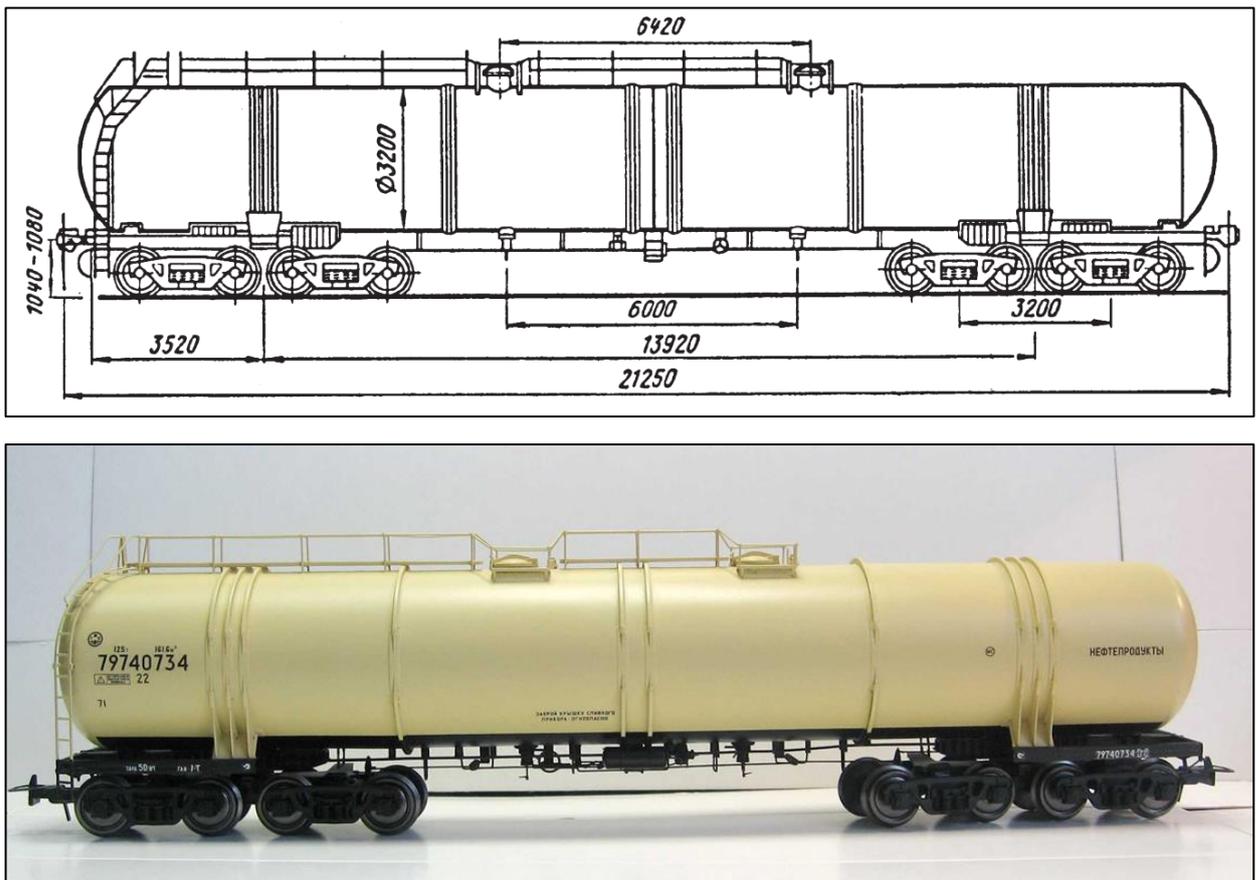


Рисунок 1.6 – Восьмиосная цистерна для бензина (модель 15-1500)

Различают следующие виды цистерн;

- цистерны специального назначения в основном предназначены для перевозки высоковязких и высокопарафинистых нефтей и нефтепродуктов;
- цистерны с паровой рубашкой отличаются от обычных тем, что нижняя часть у них снабжена системой парового подогрева с площадью поверхности нагрева около 40 м^2 ;
- цистерны-термосы предназначены для перевозки подогретых высоковязких нефтепродуктов; они покрыты тепловой изоляцией, а внутри котла у них установлен стационарный трубчатый подогреватель с поверхностью нагрева 34 м^2 .

Объем котла современных цистерн составляет от 54 до 162 м^3 , диаметр – до $3,2 \text{ м}$ [18].

1.2 Примеры пожаров железнодорожных вагонов-цистерн с нефтью и нефтепродуктами в России

5 июля 2000 г. на территории УПТК ОАО «Омскнефтепроводстрой» в г. Омск при сливе бензина из ЖДЦ произошло ее возгорание (рисунок 1.7) [21]. Вблизи находился товарный поезд, состоящий из 9 ЖДЦ с газовым конденсатом. В ходе тушения пожара было отбуксировано 6 ЖДЦ, что уменьшило вероятность дальнейшего распространения пожара. Пожарными расчетами принимались меры, направленные на охлаждение ЖДЦ с целью предупреждения их взрыва и распространение огня, однако в результате теплового воздействия произошел взрыв одной из ЖДЦ с образованием огненного шара, который привел к гибели 5 человек, 85 человек получили травмы различной степени тяжести. В ликвидации пожара принимали участие 200 человек, 50 единиц техники, в том числе пожарный поезд.

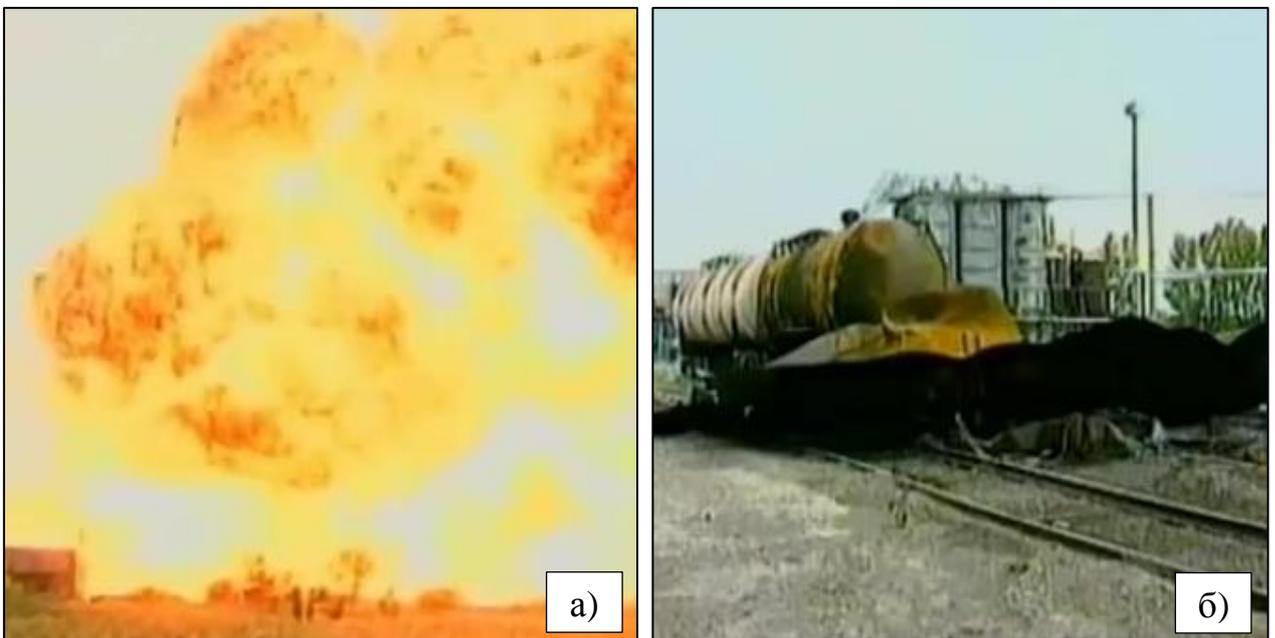


Рисунок 1.7 – Пожар на территории УПТК ОАО «Омскнефтепроводстрой» в г. Омск: а – образование огненного шара при взрыве ЖДЦ; б – последствия взрыва ЖДЦ

10 июля 2001 г. на территории лесобиржи у железнодорожной станции «Люберцы» Московской области произошел пожар при перекачке бензина из ЖДЦ в автомобильную цистерну. В результате пожара 4 ЖДЦ и автомобильная цистерна были повреждены огнем, один человек получил ожоги 2-й степени. В ликвидации пожара принимали участие 73 человека и 15 единиц пожарной техники. Причина пожара – нарушение требований пожарной безопасности при перекачке топлива [22].

15 июня 2005 г. произошел пожар на Ногинской нефтебазе Московской области (рисунок 1.8). Причиной пожара послужил взрыв паровоздушной смеси при сливе бензина из ЖДЦ. В результате взрыва погибло двое рабочих, один получил тяжелые ожоги. Пожар распространился на два вертикальных стальных резервуара номинальным объемом 5000 м³ и 1000 м³ каждый. Ситуация осложнялась тем, что нефтебаза расположена в черте городской застройки. Вследствие создавшейся угрозы были эвакуированы 254 пациента родильного дома и более 800 человек из группы жилых домов, расположенных в непосредственной близости от нефтебазы. Для ликвидации пожара привлекались свыше 20 пожарных расчетов, пожарный вертолет и два пожарных поезда [23].



Рисунок 1.8 – Пожар на Ногинской нефтебазе Московской области

28 июня 2005 г. произошел взрыв на железнодорожной эстакаде слива дизельного топлива СП ЗАО «Петербургский нефтяной терминал» со смертельным исходом [24]. Дизельное топливо из железнодорожных цистерн сливают через герметично присоединенное устройство нижнего слива согласно инструкции по эксплуатации дизельного фронта слива. В 10 ч по указанию начальника на дизельную железнодорожную эстакаду поставили под выгрузку девять железнодорожных цистерн с дизельным топливом, еще одна цистерна оставалась на эстакаде от предыдущей подачи. Около 10 ч 30 мин бригада сливщиков в составе трех человек приступила к подготовке цистерн к сливу дизельного топлива. Сливщики стали подсоединять к цистернам устройства нижнего слива, затем поднялись на эстакаду и начали открывать верхние люки цистерн, нарушив тем самым требования инструкции по эксплуатации дизельного фронта слива. Три цистерны из десяти были подготовлены к сливу дизельного топлива. В это время у звеньевых сливщиков возникли трудности с открытием донного клапана одной из железнодорожных цистерн. В тот момент, когда ему удалось повернуть ключом шток открытия донного клапана прибора нижнего слива, произошел взрыв с выбросом из горловины цистерны пламени высотой около 5 м. Пострадал звеньевой сливщиков, находившийся в момент аварии над горловиной цистерны, – от полученных ожогов он скончался. Два других сливщика приняли меры по локализации и ликвидации возгорания дизельного топлива.

В ходе расследования аварии выяснено, что последний капитальный ремонт цистерны проводился в мае 2004 г. Данные о сроке безопасной эксплуатации цистерны отсутствуют. При осмотре котла эксперты выяснили, что в конструкцию узла крепления штока для открытия клапана прибора нижнего слива внесено изменение – чугунный кронштейн заменен кронштейном из углеродистой стали (рисунок 1.9). При этом отверстие для штока в кронштейне имеет больший размер по сравнению с отверстием в типовом кронштейне. Эксплуатация такого узла во время выполнения сливоналивных операций может привести к образованию искр, что, в свою очередь, создает опасность взрыва паров нефтепродуктов.

С учетом заключения экспертизы технического состояния железнодорожной цистерны комиссия определила причины аварии с несчастным случаем:

- техническая – вспышка паров дизельного топлива, скопившихся в свободном пространстве котла цистерны при транспортировке, произошла при открытии клапана нижнего слива от искры, возникшей при ударе штока клапана о нештатный кронштейн;

- организационная – неудовлетворительная организация производства работ в части соблюдения контроля по выполнению требований технологической документации. Экономический ущерб от аварии составил более двух миллионов рублей.



Рисунок 1.9 – Узел крепления штока для открытия клапана прибора нижнего слива с замененным наружным кронштейном

14 августа 2005 г. на СНЭ нефтебазы ООО «ТопРесурс», расположенной в г. Балашиха Московской области, произошел пожар [24]. В состав нефтебазы входит резервуарный парк светлых нефтепродуктов, сливноналивная эстакада для 11 железнодорожных цистерн, насосная открытого типа под навесом, расположенная на расстоянии 9 м от сливноналивной железнодорожной эстакады. 14 августа по заданию генерального директора производился налив нефтепродуктов из резервуара РВС-2 в шесть железнодорожных цистерн. Перед наливом цистерны были осмотрены и признаны технически исправными. Смена приступила к наливу

цистерн (с помощью одного насоса через нижние сливные устройства с использованием устройств УСН-100). Через час при обходе территории нефтебазы охранник увидел, что вдоль эстакады на высоте 15–20 см от земли расстилается «туман», появление которого операторы объяснили тем, что при наливке бензина произошел срыв устройства налива. За время установки шланга на прежнее место бензин разлился, и образовалось большое количество паров нефтепродукта, которые в виде «тумана» распространились по территории нефтебазы вдоль железнодорожной эстакады и достигли здания, где располагалось помещение электрощитовой. Примерно через 1 мин в районе эстакады произошел взрыв с образованием огненного шара (рисунок 1.10). Комиссия установила, что первичный взрыв паровоздушной смеси нефтепродуктов произошел в помещении электрощитовой, расположенной на расстоянии 16 м от железнодорожной эстакады. Вероятный источник искры – пускатель насоса, включенный оператором для продолжения операции налива бензина в железнодорожные цистерны. Огонь мгновенно распространился на ближнюю к въездным воротам половину эстакады, железнодорожные цистерны, насосную, а также на территорию между эстакадой и резервуарным парком горизонтальных емкостей, где в это время находились пять операторов и водитель нефтебазы. В результате аварии все они (шесть человек) получили тяжелые ожоговые травмы, от которых впоследствии скончались.

Комиссия установила технические и организационные причины аварии с групповым несчастным случаем:

- использование наливных устройств без разрешения надзорных инстанций на применение данного вида (типа) технических устройств;
- несоответствие устройства помещения электрощитовой и установленного в нем электротехнического оборудования по уровню взрывозащиты и степени защиты оболочек требованиям ПУЭ;
- не укомплектованность штата работников опасного производственного объекта (на момент аварии в штате не было механика, энергетика и инженера по технике безопасности);

- неудовлетворительная организация работ по наливу ЛВЖ в железнодорожные цистерны;

- отсутствие сигнализаторов до взрывных концентраций на сливноналивной эстакаде, системы автоматического управления, контроля за технологическим процессом и противоаварийной защиты, быстродействующих запорных устройств с дистанционным управлением для отключения трубопроводов при аварии на эстакаде.



Рисунок 1.10 – Последствия аварии

на железнодорожной сливноналивной эстакаде нефтебазы ООО «ТопРесурс»:

а – здание электрощитовой; б – разрушения на эстакаде

28 мая 2012 г. в Нижнем Новгороде на станции «Горький-Сортировочный» (рисунок 1.11) при спуске ЖДЦ с бензином с сортировочной горки произошла ее разгерметизация с последующим возгоранием [26]. В результате пожара огнем уничтожены 4 ЖДЦ, повреждения получили 1 ЖДЦ, 2 платформы, 6 полувагонов и 1 вагон. Общая площадь пожара составила 500 м². Кроме того, в результате теплового воздействия повреждена обшивка административного здания, расположенного в 100 метрах от очага пожара, – оплавился виниловый сайдинг на площади 9 м². В ликвидации пожара принимали участие 220 человек, 57 единиц техники.



Рисунок 1.11 – Пожар на железнодорожной станции «Горький-Сортировочный» в г. Нижний Новгород

1 января 2013 г. ранним утром на бывшей железнодорожной станции «Динамо» (станция «Мытищи-товарные») в ходе маневрирования произошло столкновение грузового вагона, перемещаемого локомотивом, с грузовым поездом, состоящим из 74 вагонов, 10 из которых – ЖДЦ с бензином. Разгерметизация одной из цистерн привела к воспламенению бензина на площади 20 м² (рисунок 1.12 а) [27]. К тушению пожара привлекались 4 пожарных поезда и 13 пожарных расчетов. В 9 ч 30 мин пожар удалось локализовать, а в 10 ч 10 мин полностью ликвидировать (рисунок 1.12 б).

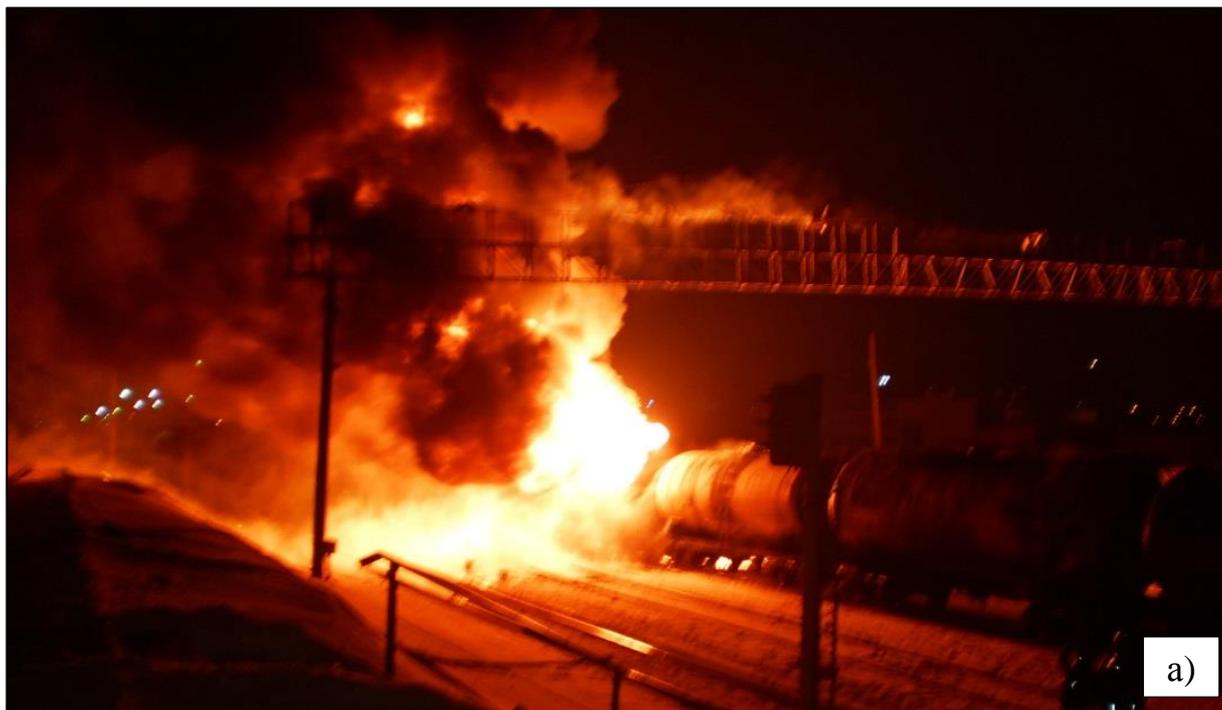


Рисунок 1.12 – Пожар на бывшей железнодорожной станции «Динамо» в г. Мытищи (а) и его последствия (б)

30 августа 2013 г. на станции Лоста-Сортировочная (г. Вологда) в 17 ч 5 мин произошло возгорание ЖДЦ с газовым конденсатом (рисунок 1.13). В емкости находилось 60 тонн нефтепродукта. Для тушения пожара привлекались пожарный поезд и 9 отделений на основных пожарных автомобилях, которыми

было подано 2 пенных ствола на тушение горячей ЖДЦ и 4 водяных ствола на охлаждение стоящих рядом ЖДЦ. Всего на пожаре работали 92 человека и 19 единиц техники [28]. В 20 ч 40 мин пожар был ликвидирован, пострадавших нет.



Рисунок 1.13 – Пожар на станции на станции Лоста-Сортировочная (г. Вологда)

5 февраля 2014 г. в 4 ч 45 мин в районе железнодорожной станции Поздино Кировского отделения Горьковской железной дороги (ГЖД) с рельсов сошли 32 цистерны грузового поезда с газовым конденсатом, из которых загорелись 12 (рисунок 1.14). Пламя быстро перекинулось на примыкающие к железной дороге постройки – пожар распространился на три десятка частных гаражей и нежилое строение. Была проведена эвакуация около 700 человек из окрестных жилых домов. Из-за аварии пришлось изменить маршруты следования порядка 30 железнодорожных составов, задержка в пути некоторых из них достигла 16 часов. К 9 ч 30 мин пожар на площади более 1000 м² был локализован, а к полудню ликвидирован. В целом, в аварийно-спасательных работах участвовали более 400 специалистов МЧС, РЖД, более 100 единиц техники, в том числе два пожарных поезда и вертолет Ми-8 [29].



Рисунок 1.14 – Пожар в районе железнодорожной станции Поздино Кировского отделения Горьковской железной дороги

Вечером 12 февраля 2014 г. на территории ЗАО «Рязанская нефтеперерабатывающая компания» произошел неконтролируемый сход с места стоянки 14 железнодорожных цистерн с нефтепродуктами, которые столкнулись с 4-мя железнодорожными цистернами с метилтретбутиловым эфиром, стоящими на сливноналивной эстакаде. В результате аварии содержимое цистерн загорелось (рисунок 1.15). Площадь пожара составила 100 м². На тушении пожара было задействовано 22 единицы техники и 64 человека личного состава пожарной охраны. С целью предотвращения взрыва принимались меры по охлаждению 6-ти близлежащих цистерн. Пожар был полностью ликвидирован около 12:00 следующего дня. В результате пожара огнем повреждены сливноналивная эстакада, емкости и резервуары для хранения нефтепродуктов, железнодорожные цистерны, административные здания завода. Пожар произошел в результате нарушений правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта. Ущерб составил более 82,6 млн. руб. Вследствие возгорания отгрузка нефтепродуктов не производилась в течение недели [30].



Рисунок 1.15 – Пожар на территории ЗАО
«Рязанская нефтеперерабатывающая компания»

15 февраля 2018 г. на промывочно-пропарочной станции железной дороги на 3-м Нефтяном проезде поселка Увек Саратовской области загорелась ЖДЦ с нефтью (рисунок 1.16) [31]. В результате нарушения технологического регламента часть нефти вылилась на землю, после чего произошло ее возгорание. Площадь пожара составила 100 м². В ликвидации пожара принимали участие 17 человек, 4 единицы техники. Пострадавших нет.



Рисунок 1.16 – Пожар на промывочно-пропарочной станции железной дороги
в поселке Увек Саратовской области

1.3 Примеры пожаров железнодорожных вагонов-цистерн с нефтью и нефтепродуктами за рубежом

22 августа 2008 г. в центральной части Оклахомы (США) грузовой поезд сошел с рельсов (рисунок 1.17). В поезде было несколько цистерн с сырой нефтью и этанолом. В результате аварии произошла частичная разгерметизация цистерн с разливом горючего и его воспламенением. Несколько цистерн оказались в очаге пожара. Возникла угроза их взрыва. Машинисты поезда успели эвакуироваться самостоятельно. Полицейские и спасатели эвакуировали население из ближайших жилых домов. Прибывшим к месту аварии пожарным расчетам не удалось быстро приступить к тушению пожара из-за отсутствия подъезда к месту аварии. Через некоторое время произошел взрыв цистерны с сырой нефтью. При этом образовался огненный шар, поднявшийся на высоту более 300 м [32].



Рисунок 1.17 – Огненный шар при взрыве железнодорожной цистерны с нефтью

08 ноября 2010 г. на востоке Польши, в городе Белосток загорелся грузовой поезд с бензином и дизельным топливом (рисунок 1.18). Грузовой поезд, проходящий в сторону Белостока, на перегоне зацепил последние вагоны грузового поезда, следующего в сторону Варшавы. В результате столкновения загорелась ЖДЦ, затем последовал взрыв, и пламя распространилось на остальные цистерны. В тушении пожара принимало участие 30 отделений пожарной охраны. В результате инцидента один человек пострадал и был доставлен в больницу. Из двух соседних зданий производилась эвакуация людей. Огонь уничтожил около 20 ЖДЦ. Часть нефтепродуктов попало в грунт [25].



Рисунок 1.18 – Тушение пожара грузового поезда с бензином и дизельным топливом (г. Белосток, Польша)

6 июля 2013 г. в центре небольшого старинного города Лак-Мегантик (провинция Квебек, Канада), расположенном в 250 километрах к востоку от Монреалья, вследствие отказа тормозной системы сошел с рельсов грузовой поезд, перевозивший 73 цистерны с нефтью (рисунок 1.19). После аварии произошел разлив нефти и ее воспламенение, при этом пожар распространился на жилые дома. Вследствие пожара и серии мощных взрывов цистерн, оказавшихся в очаге

пожара, была разрушена центральная часть города (более 30 зданий, среди которых были и исторические достопримечательности города), 13 человек погибли, несколько десятков человек числятся пропавшими без вести. Из опасного района произведена эвакуация более 1,5 тысяч жителей города. На помощь местным пожарным прибыли подкрепления из соседних городов. Около 100 тысяч литров сырой нефти попало в реку Шодьер [33].



Рисунок 1.19 – Последствия аварии грузового поезда в центре города Лак-Мегантик (провинция Квебек, Канада)

В отчете [34], выполненном на основе анализа статистической информации, имеющейся в различных базах данных, представлены сведения о 30 авариях и пожарах на объектах железнодорожного транспорта с участием цистерн с бензином и нефтью, произошедших в семнадцати странах в течение 33 лет. В период с 1967 по 1999 гг. было зарегистрировано 20 сходов с рельсов и 10 столкновений грузовых поездов с последующим возгоранием. В 20 случаях аварии приводили к пожару пролива бензина, в 10 случаях горела нефть. В шести рассмотренных ава-

риях тепловое воздействие пламени на цистерны с бензином приводило к их взрыву с образованием огненного шара (таблица 1.1). Необходимо отметить, что в 2-х случаях образование огненного шара происходило уже после прибытия пожарных подразделений.

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика аварий с участием цистерн с бензином и образованием огненного шара

Страна, год	Число цистерн с бензином в поезде/ повреждены вследствие удара/ взрыв с образованием огненного шара	Время до разрушения (мин)
Германия, 1974	23/3/1	>10
Германия, 1985	20/2/1	16
Швеция, 1986	3/1/2	18 и 28
Франция, 1993	7/2/1	15–20
Германия, 1997	15/1/1	20
Канада, 1999	11/1/1	>12

В отличие от статистических данных об авариях цистерн с бензином, ни один из 10 рассмотренных в отчете [34] случаев пожаров цистерн с нефтью не привел к их взрыву с образованием огненного шара.

Таким образом, вышеописанные случаи свидетельствуют, что нарушение требований пожарной и промышленной безопасности при проведении маневровых работ и сливноналивных операций увеличивает вероятность возникновения пожаров с участием железнодорожных цистерн.

Вследствие сложности и быстротечности процессов, протекающих в горящих и обогреваемых пламенем железнодорожных цистернах, возможно резкое изменение оперативной обстановки на месте пожара. Так, отсутствие своевременного охлаждения железнодорожных цистерн, попавших в зону непосредственного воздействия пламени, может привести к их взрыву с образованием огненного шара.

Рассмотренные примеры пожаров указывают на необходимость неукоснительного соблюдения требований пожарной и промышленной безопасности на объектах железнодорожной инфраструктуры, обеспечивающих транспортировку нефти и нефтепродуктов.

1.4 Анализ нормативных требований к системе противопожарной защиты железнодорожных сливноналивных эстакад

1.4.1 Общие требования пожарной безопасности при проектировании железнодорожных сливноналивных эстакад

В своде правил СП 225.1326000.2014 «Станционные здания, сооружения и устройства» [37] указывается, что СНЭ следует проектировать в соответствии с требованиями СНиП 2.11.03-93 «Склады нефти и нефтепродуктов. Противопожарные нормы» [38].

В своде правил СП 43.13330.2012 «Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85 (с изменением № 1)» [39], а также в ВУПП-88 «Ведомственные указания по противопожарному проектированию предприятий, зданий и сооружений нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности» [43] отмечается, что СНЭ проектируются в соответствии с указаниями ВУП СНЭ-87 «Ведомственные указания по проектированию железнодорожных сливо-наливных эстакад легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, и сжиженных углеводородных газов» [42].

СНЭ располагают на прямом горизонтальном участке железнодорожного пути, а на складах нефти и нефтепродуктов III категории односторонние СНЭ допускается размещать на кривых участках пути с радиусом не менее 200 м [35], [36], [38], [42].

Железнодорожные пути, на которых располагают СНЭ, должны иметь съезд на параллельный обгонный путь, позволяющий осуществлять вывод цистерн от эстакад в обе стороны. При реконструкции или расширении действующих двухсторонних эстакад и невозможности устройства обгонного пути, а также для односторонних эстакад предусматривают тупиковый путь (с установкой в конце его лебедки), длина которого составляет 30 м (для возможности расцепки состава

при пожаре), рассчитываемая от крайней цистерны маршрутного состава до упорного бруса [35], [36], [38], [42].

СНЭ не предусматривают на железнодорожных путях, предназначенных для сквозного проезда [36], [38], [42], также как и проезд локомотива [42].

Для слива-налива сжиженных углеводородных газов проектируют самостоятельные СНЭ, поскольку слив и налив сжиженных углеводородных газов совместно с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями не допускается. В то время как для легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, мазута, битума, гудрона и масел, они могут быть общими, за исключением СНЭ для нефти, на которой допускается осуществлять слив и налив мазута [42].

На складах нефти и нефтепродуктов I категории СНЭ для легковоспламеняющихся и горючих жидкостей проектируют отдельными [35], [36], [38], при этом расстояние между осями ближайших железнодорожных путей соседних СНЭ (расположенных на параллельных путях) в соответствии с [38], [35], [36] должны быть не менее 20 м, а в соответствии с [42] – 30 м.

Кроме того, расстояние от оси железнодорожного пути склада нефти и нефтепродуктов или предприятия до оси ближайшего пути с СНЭ принимается не менее 20 м, если температура вспышки сливаемых нефти и нефтепродуктов 120 °С и ниже, и не менее 10 м – если температура вспышки выше 120°С [35], [36], [38], [42].

Расстояние между путями двухсторонней СНЭ [42] определяют размерами конструкции эстакады и габаритом приближения строений по [44]. Минимальные расстояния от СНЭ до других объектов склада нефти и нефтепродуктов, в состав которых входят эстакады, принимаются в соответствии с [42].

Несущие конструкции СНЭ, лотки выполняют из несгораемых материалов с пределом огнестойкости для колонн не менее 2 часов, балок и ригелей – 1 часа. Несущие конструкции СНЭ проектируют, как правило, из типовых сборных железобетонных конструкций. При соответствующем обосновании несущие конструкции выполняют из металла. При этом необходимо предусматривать защиту метал-

лических конструкций от воздействия высоких температур до указанного предела огнестойкости [42].

Навес над СНЭ, а также лестницы, шириной не менее 0,7 м и с уклоном не более 45° , расположенные на расстоянии не более 100 м друг от друга по длине эстакады, выполняют из негорючих материалов [35], [36], [38], [42]. Лестницы и эстакады оборудуют ограждениями высотой не менее 1 м [35], [36], [38].

Рабочие настилы и ступени лестниц выполняют из просечно-вытяжного листа или полосовой стали, поставленной на ребро, без огнезащиты [42].

Промежуточные резервуары сливноналивных устройств (кроме сливных емкостей для нефтепродуктов с температурой вспышки выше 120°C и мазутов) не размещают под железнодорожными путями [35], [38].

На трубопроводах, по которым поступают на эстакаду для налива и отводятся из нее при сливе легковоспламеняющиеся, горючие жидкости и сжиженные углеводородные газы, устанавливают на случай аварии на расстоянии 20–50 м от СНЭ задвижки с дистанционным управлением со щита операторной, а также непосредственно с эстакады. Данную арматуру размещают в местах, удобных для управления и обслуживания. Управление указанными электрозадвижками на СНЭ располагают на нулевых отметках в местах размещения эвакуационных лестниц [42].

Наливные операции легковоспламеняющихся и горючих жидкостей автоматизируются путем использования ограничителей уровня налива с учетом их применимости для различных сред [42].

В случае слива продукта из ЖДЦ через промежуточные сливные емкости предусматривают автоматическую откачку сливаемого продукта из промежуточных емкостей, предотвращая их перелив. Автоматически включающиеся по номинальному уровню и отключающиеся по нижнему уровню от уровнемеров, устанавливаемые на промежуточных сливных емкостях насосные агрегаты предусматривают блокировку. Одновременно в операторную поступает световой и звуковой сигнал о верхнем предельном уровне [42].

На площадке для обслуживания наливных устройств эстакад легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, а также сжиженных углеводородных газов предусматривают кнопки дистанционного отключения насосных агрегатов, расположенных друг от друга на расстоянии не более 50 м, подающих продукт на СНЭ [42].

На СНЭ легковоспламеняющихся жидкостей и сжиженных углеводородных газов устанавливают сигнализаторы довзрывных концентраций согласно требованиям к установке сигнализаторов и газоанализаторов. Один датчик сигнализатора довзрывных концентраций устанавливают на две ЖДЦ на нулевой отметке вдоль каждого фронта налива и слива. При двухстороннем фронте налива или слива датчики располагают в «шахматном» порядке [42].

1.4.2 Требования к ограничению площади пролива нефтепродуктов при разгерметизации технологического оборудования на железнодорожной сливноналивной эстакаде

На территории резервуарного парка, на участках железнодорожного и автомобильного приема, отпуска нефти и нефтепродуктов планировочные отметки проезжей части внутренних автомобильных дорог проектируют выше планировочных отметок прилегающей территории не менее чем на 0,3 м [35], [36], [38]. В иных случаях автомобильные дороги проектируют так, чтобы разлившаяся жидкость не могла попасть на проезжую часть (устройство кюветов и т.п.) [36]. Территорию, занятую СНЭ, выполняют из твердого водонепроницаемого покрытия, усиленного в зоне железнодорожных путей [42].

Габариты СНЭ определяют длиной и шириной территории последней. Для открытых сливноналивных железнодорожных эстакад длина территории определяют строительными конструкциями, ширина – твердым покрытием, огражденным бортиком, которое должно быть не менее габарита приближения строений в соответствии с [44]. При расположении сливноналивных железнодорожных эстакад под

навесом или в здании ширину и длину территории определяют строительными конструкциями навеса или здания [42].

Твердое покрытие территории сливноналивных эстакад проектируют с уклоном не менее 2 % в сторону лотков [35], [36], [38], [42], которые в свою очередь должны иметь уклон 0,5 % к сборным колодцам [42], располагаемым на расстоянии не более 30 м друг от друга [42]. Твердое покрытие ограждается бортиком, высотой 200 мм (рисунок 1.20) [35], [36], [38], [42], [43].

Отводные лотки, как правило, располагают с внешней стороны железнодорожных путей. При этом лотки перекрывают съемными металлическими решетками. Лотки, как правило, проектируют из монолитного железобетона, для застывающих нефтепродуктов лотки дополнительно имеют обогрев [42].

Сборные колодцы присоединяют к сети промышленной канализации через колодцы с гидравлическим затвором. Пропускная способность сети промышленной канализации дополнительно рассчитывают на прием наибольшего количества воды при пожаре, либо при дожде [42].

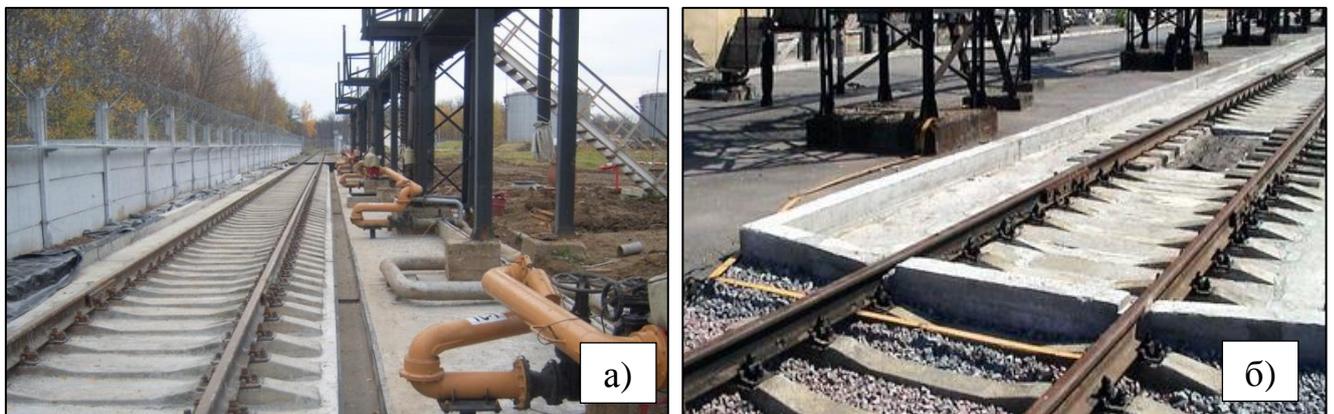


Рисунок 1.20 – Площадки для сливноналивных эстакад

1.4.3 Требования к системе пожаротушения и охлаждения

Вдоль каждой СНЭ легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, а также сжиженных углеводородных предусматривают пожарный проезд, который располагают на расстоянии не менее 20 м от крайнего рельса сливноналивной эстакады

[42]. Проезды выполняют с твердым покрытием шириной проезжей части 3,5 м [35], [36], [38], [42]. Пожарные проезды оборудуют шлагбаумом, находящимся в закрытом положении [42]. Для двусторонних СНЭ предусматривают кольцевой проезд для пожарных машин [35], [36], [38].

СНЭ оборудуют электрической пожарной сигнализацией с ручными пожарными извещателями [35], [36], [38], [40], [43]. Ручные извещатели пожарной сигнализации предусматривают: у торцов эстакады и по ее длине не реже чем через 100 м, но не менее двух (у лестниц для обслуживания эстакад). Ручные пожарные извещатели устанавливают на расстоянии не более 5 м от обвалования парка или границы наружной установки и на расстоянии не более 20 м от СНЭ [35], [40], [42].

На СНЭ складов нефти и нефтепродуктов I и II категорий предусматривают стационарные системы пожаротушения (неавтоматические) воздушно-механической пеной средней и/или низкой кратности с дистанционным пуском, а также водяное орошение стационарными лафетными стволами конструкций эстакады и ЖДЦ [35], [36], [38], [40], [41].

Стационарные пеногенераторы располагают на строительных конструкциях эстакад с подачей пены сверху на ЖДЦ и настил эстакады. На каждую ЖДЦ грузоподъемностью 60 т осуществляют подачу пены не менее чем с одного пеногенератора [42].

Для подачи пены от переносных генераторов предусматривают установку стояков с соединительными головками на магистральном (кольцевом) растворопроводе на расстоянии 120 м друг от друга [42].

Расходы огнетушащих средств определяют исходя из интенсивности их подачи на 1 м² расчетной площади тушения нефти и нефтепродуктов. Расчетную площадь тушения для СНЭ принимают равной: площади эстакады по внешнему контуру сооружения, включая железнодорожный путь (пути), но не более 1000 м² [35], [36], [38].

В [42] указывается, что расчетная площадь тушения для СНЭ принимается по внешнему контуру сооружения, включая железнодорожные пути, с учетом размещения на этой площади не менее 3 ЖДЦ на каждой стороне налива.

Лафетные стволы устанавливают со стационарным подключением к водопроводной сети [41]. Общий расход воды на охлаждение лафетными стволами ЖДЦ, сливноналивных устройств на эстакадах принимают из расчета одновременной работы двух лафетных стволов, но не менее 40 л/с [35], [36], [38]. Лафетные стволы для защиты открытых СНЭ как односторонних, так и двухсторонних, располагают по обе стороны эстакады с таким расчетом, чтобы обеспечивалось орошение каждой ЖДЦ и каждой точки конструкции эстакады по всей ее длине не менее чем двумя компактными струями [41]. Диаметр насадков лафетных стволов принимается не менее 28 мм. Напор у насадков этих стволов должен быть не менее 0,4 МПа [40], [43].

Лафетные стволы для защиты СНЭ устанавливают на специальных лафетных вышках. Оптимальную высоту лафетных вышек и расположение лафетных стволов определяют исходя из высоты и расположения оборудования, углов наклона и расстояния лафетного ствола от защищаемого объекта. В необходимых случаях применяют осциллирующие лафетные стволы [41].

Лафетные стволы устанавливают на расстоянии не менее 15 м от железнодорожных путей эстакады [35], [36], [38], [40], [42]. Если при реконструкции СНЭ невозможно обеспечить указанное расстояние, то его уменьшают до 10 м [42]. В [41] допускается уменьшение расстояния от лафетного ствола до защищаемого оборудования до 10 м только при условии наличия дублирующих лафетных стволов или применения дистанционно управляемых или осциллирующих лафетных стволов.

Стационарные пожарные лафетные стволы рекомендуется оборудовать водопленочными защитными экранами [35], [40], обеспечивающими снижение интенсивности теплового излучения пламени при пожаре на ствольщика в специальной защитной одежде пожарного до допустимых значений (не более 5 кВт/м²) [35].

На объектах обустройства нефтяных и газовых месторождений рекомендуется предусмотреть наличие мобильных водопленочных теплозащитных экранов [40].

Проектирование систем пожаротушения и охлаждения СНЭ на складах нефти и нефтепродуктов, а также сетей противопожарного водопровода осуществляется с учетом требований [35], [38], [45]–[48].

На СНЭ складов нефти и нефтепродуктов III категории с резервуарами номинальным объемом менее 5000 м³ предусматривают подачу воды на охлаждение и тушение пожара передвижной пожарной техникой из противопожарных емкостей (резервуаров) или открытых искусственных и естественных водоемов [35], [36], [38].

Сети противопожарного водопровода и растворопроводов (постоянно наполненных раствором или сухих) для тушения пожара на СНЭ, оборудованной сливно-наливными устройствами с двух сторон, проектируют кольцевыми с тупиковыми ответвлениями [35], [36], [38]. Сети прокладывают на расстоянии не менее 10 м от железнодорожных путей эстакады [38].

Совместно с пожарными извещателями, размещаемыми в районе СНЭ предусматривают устройства для дистанционного включения пожарных насосов в насосной пенотушения. Устройства для дистанционного включения насосов пенотушения располагаются на расстоянии не более 100 м друг от друга, но не менее двух на каждую эстакаду с расположением в противоположных концах эстакады [42].

Расчетное время тушения пожара на СНЭ для систем автоматического пенного пожаротушения – 10 мин, для передвижной пожарной техники – 15 мин [35], [38]. Инерционность стационарных систем пожаротушения составляет не более трех минут [35], [38], [42].

Типовая система противопожарной защиты двусторонней СНЭ представлена на рисунке 1.21 [49].

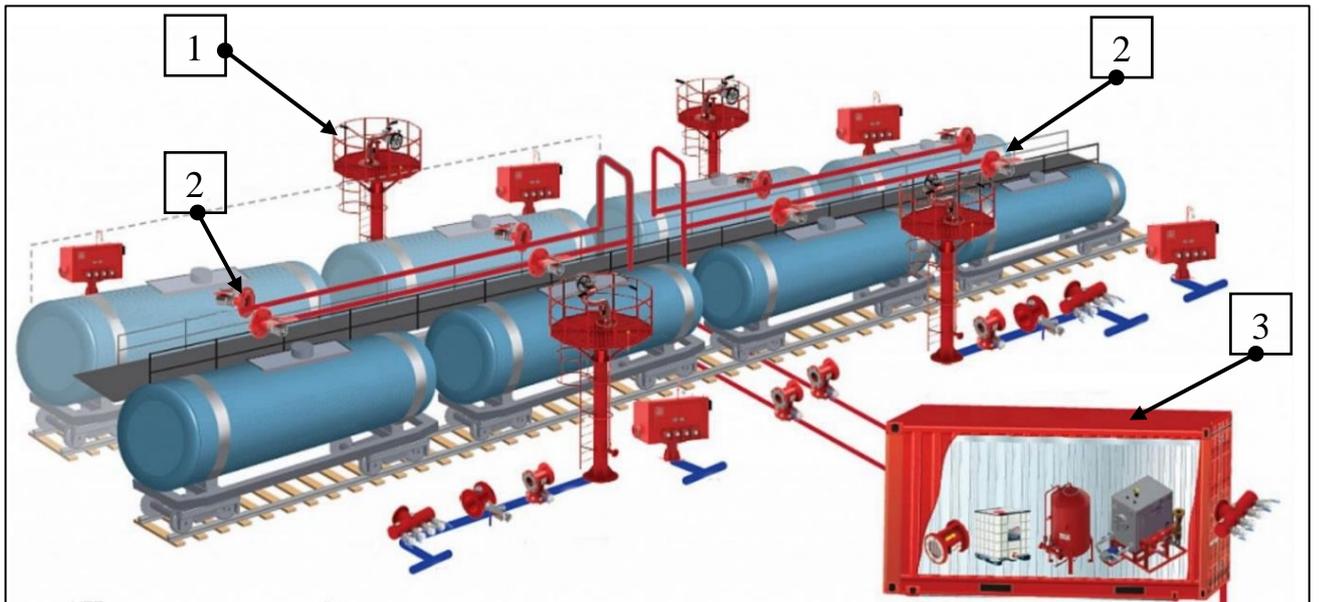


Рисунок 1.21 – Типовая система противопожарной защиты двусторонней железнодорожной сливноналивной эстакады:

1 – пожарная вышка; 2 – пеногенераторы; 3 – пенодозаторная станция

ГЛАВА 2 ПОЖАР ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЛИВОНАЛИВНОЙ ЭСТАКАДЕ ПРИ ВЕТРОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

2.1 Сведения об исследованиях плотности лучистого теплового потока при пожаре пролива нефтепродуктов

Горение – сложный физико-химический процесс превращения исходных веществ в продукты сгорания в ходе экзотермических реакций, сопровождающийся интенсивным выделением тепла [78].

При пожаре пролива нефтепродуктов наблюдается диффузионное горение паров топлива в воздухе, подвод которых в зону химической реакции обеспечивается за счет их испарения с поверхности пролива [50].

Модели, используемые для расчета плотности лучистого теплового потока при горении, можно разделить на пять групп: модели точечного излучателя, модели твердотельного излучателя, интегральные, зонные и полевые модели [50].

Модель точечного излучателя [50] предполагает, что тепловой поток генерируется точечным источником и не зависит от формы пламени. Плотность теплового потока q (Вт/м²) на расстоянии X (м) от центра пожара определяется по формуле:

$$q = \frac{1}{4\pi X^2} \eta m_k \Delta H_C, \quad (2.1)$$

где m_k – массовая скорость выгорания, кг/с;

ΔH_C – теплота сгорания, Дж/кг;

η – коэффициент полноты сгорания.

Необходимо отметить, что расчеты, выполненные по формуле (2.1), дают завышенные значения плотности теплового потока на расстояниях, превышающих 10 радиусов очага пожара от его геометрического центра.

В основе модели твердотельного излучателя лежит идея о представлении контура пламени в виде излучающей поверхности твердого тела [50]. Плотность теплового потока в данной модели является функцией среднеповерхностной интенсивности теплового излучения пламени, углового коэффициента облученности и коэффициента пропускания атмосферы.

В интегральных моделях искомыми параметрами являются среднеобъемные величины давления, температуры, плотности массовых концентраций кислорода, токсичных продуктов горения, огнетушащего вещества и оптической концентрации дыма. Модель представлена системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Основными уравнениями являются нестационарные дифференциальные уравнения законов сохранения массы и энергии для всей газовой среды рассматриваемой области пространства [51].

В зонных моделях область пространства разбивается на отдельные зоны, в которых для описания процессов теплообмена используется соответствующие уравнения законов сохранения. Размер и количество зон выбирается таким образом, чтобы в пределах каждой из них неоднородности температурных и других полей параметров газовой среды были минимальными [51].

Наиболее подробное описание процессов теплообмена при пожаре дают полевые (дифференциальные) модели. Основным их достоинством является то, что искомыми параметрами являются поля температур, скоростей, давлений, концентраций компонентов газовой среды и частиц дыма по всему объему расчетной области. Полевые модели наиболее сложны в математическом описании, так как состоят из системы трех- или двумерных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных. Для замыкания системы уравнений законов сохранения используются дополнительные уравнения для расчета турбулентного трения, теплообмена и лучистого теплообмена [51].

Наибольшее распространение для определения плотности теплового потока пожара пролива получила модель твердотельного излучателя. Согласно этой модели выражение для определения плотности теплового потока q (кВт/м²) на определенном расстоянии от центра площади пролива имеет вид [50]:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau, \quad (2.2)$$

где E_f – фактическая среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м²;

F_q – угловой коэффициент облученности;

τ – коэффициент пропускания атмосферы.

В выражении (2.2) для нахождения фактической среднеповерхностной интенсивности теплового излучения пламени используются полуэмпирические методы, учитывающие массовую скорость выгорания топлива и влияние на излучение сажи. Угловой коэффициент облученности зависит от формы пламени, определяемой с учетом его отклонения под действием ветра, а также расстояния до приемника излучения. Коэффициент пропускания атмосферы характеризует снижение плотности лучистого теплового потока при его прохождении через слой воздуха.

В.Л. Блинов и Г.Н. Худяков [6] изучали массовую скорость выгорания различных жидкостей в зависимости от диаметра их свободной поверхности. В результате исследований было установлено, что в сосудах диаметром не менее 1 м при переходе от ламинарного режима горения к турбулентному массовая скорость выгорания сначала уменьшается, а затем возрастает и стабилизируется, при этом наибольшее влияние на указанную скорость оказывает перенос тепла от пламени к жидкости за счет излучения и конвекции.

В работе [52] представлены результаты исследования горения различных жидкостей в сосудах диаметром от 1 до 3 м. Анализ полученных данных позволил установить, что при горении бензина примерно 60 % энергии, поглощаемой жидкостью, передается к ее свободной поверхности посредством излучения, а остальные 40 % – конвекцией. При горении гексана эти значения численно равны около 70 % и 30 % соответственно. Для сжиженных газов, разлитых на поверхности воды, земли или бетона, массовая скорость выгорания в начальный момент времени в значительной мере определяется подводом тепла от этих поверхностей.

В работе [59] представлены данные, характеризующие основные виды теплопередачи при различных диаметрах площади пролива горячей жидкости.

Таблица 2.1 – Виды теплопередачи при горении жидкости согласно [59]

Диаметр площади пролива, м	Вид теплопередачи
До 0,05	Ламинарная конвекция
От 0,05 до 0,2	Турбулентная конвекция
От 0,2 до 1	Излучение (оптически прозрачная среда)
1 и более	Излучение (оптически непрозрачная среда)

В работах [54]–[57] удельную массовую скорость выгорания предлагается определять по формуле:

$$m' = c \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v + \Delta H_G}, \quad (2.3)$$

где m' – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с);

ΔH_v – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

ΔH_c – удельная теплота сгорания, Дж/кг;

$\Delta H_G = \Delta H_v + C_p(T_b - T_a)$ – теплота, необходимая для нагревания горючего до температуры кипения, Дж/кг;

C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

T_b – температура кипения жидкости, К;

T_a – температура окружающей среды, К;

c – эмпирическая константа, м/с.

В работе [59] используя закон сохранения энергии и учитывая, что часть тепла, выделяемого при горении жидкости, расходуется на парообразование и поддержания температуры ее поверхностного слоя равной температуре кипения, получено выражение:

$$m'[\Delta H_v + C_p(T_b - T_a)] = q_r + q_c - q_{rr} - q_{misc}, \quad (2.4)$$

где q_r и q_c – лучистый и конвективный тепловые потоки, поглощаемые горячей жидкостью, кВт/м²;

q_{rr} и q_{misc} – потери тепла вследствие излучения горячей жидкости и нагрева подстилающей поверхности, кВт/м².

Применив закон Стефана-Больцмана к соотношению (2.4) для проливов диаметром 0,2 м и более, *Zabetakis M.G.* и *Burgess D.S.* получили формулу для определения удельной массовой скорости выгорания [54]:

$$m' = \frac{\sigma T_f^4 (1 - e^{-k\beta d})}{[\Delta H_v + C_p (T_b - T_a)]}, \quad (2.5)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,6703 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴),

T_f – температура поверхности пламени, К;

k – показатель поглощения, м⁻¹;

β – корректировочный параметр;

d – диаметр пролива, м.

Формула (2.5) явилась альтернативой установленному ранее эмпирическому выражению, в котором удельная массовая скорость выгорания описывается как функция диаметра пролива d и эквивалентной удельной массовой скорости выгорания для пролива «бесконечного» диаметра m'_∞ [54]:

$$m' = m'_\infty (1 - e^{-k\beta d}), \quad (2.6)$$

Для некоторых углеводородных топлив значения произведения $k\beta$, а также эквивалентной удельной массовой скорости выгорания для пролива «бесконечного» диаметра представлены в таблице 2.2 [53].

Таблица 2.2 – Значения параметров, необходимые для определения удельной массовой скорости выгорания, согласно [53]

Горючее вещество	m'_∞ , кг/(м ² ·с)	$k \cdot \beta$, м ⁻¹	T_f , К	Горючее вещество	m'_∞ , кг/(м ² ·с)	$k \cdot \beta$, м ⁻¹	T_f , К
H ₂	0,169	6,1	1600	Бензин	0,055	2,1	1450
СПГ	0,078	1,1	1500	Керосин	0,039	3,5	1480
Бензол	0,085	2,7	1490	JP-5	0,054	1,6	1250

Burgess D.S., Strasser A. и Grumer L. провели сравнительный анализ экспериментально полученных значений удельной массовой скорости выгорания для различных углеводородных топлив с соотношением $(\Delta H_C / \Delta H_G)$ (рисунок 2.1), в результате которого была выведена формула [58]:

$$m' = \rho_L c_1 \frac{\Delta H_C}{\Delta H_V + C_p (T_b - T_a)}, \quad (2.7)$$

где c_1 – эмпирическая константа, равная $1,27 \cdot 10^{-6}$ м/с;

ρ_L – плотность жидкого топлива при температуре кипения, кг/м³.

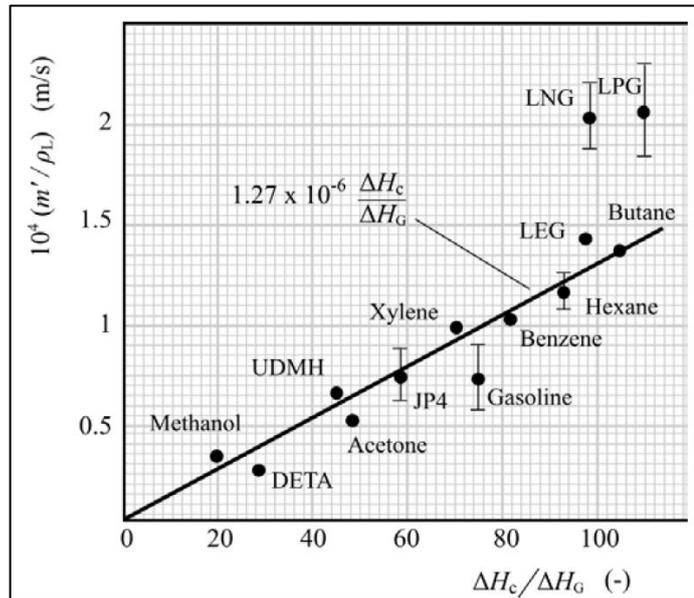


Рисунок 2.1 – Расчетные данные полученные по формуле, предложенной в [58]

Следует отметить, что выражение (2.7) справедливо для горения жидкостей в резервуарах площадью более 1 м^2 при скорости ветра менее 3 м/с , а также при толщине слоя горячей жидкости более 1 м .

Результаты расчетов удельной массовой скорости выгорания, выполненные по формуле (2.7), показывают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными для жидких углеводородных топлив, но существенно занижают удельную массовую скорость выгорания для сжиженных газов (СПГ и СУГ) (рисунок 2.1).

Для более точного определения удельной массовой скорости выгорания сжиженных газов *Mudan K.S.* [60] предложил формулу:

$$m' = \frac{c_1 \Delta H_c}{\Delta H_v + C_p (T_b - T_a)}, \quad (2.8)$$

где c_1 – эмпирическая константа, равная $1,0 \cdot 10^{-3}$ м/с.

По сравнению с выражением (2.7) выражение (2.8) лучше описывает удельную массовую скорость выгорания сжиженных газов, но дает менее точные результаты для жидких углеводородных топлив (рисунок 2.2).

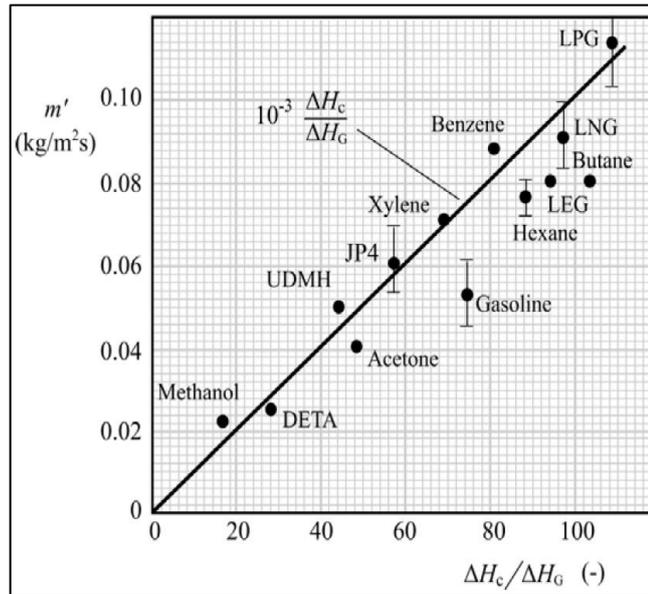


Рисунок 2.2 – Расчетные данные полученные по формуле предложенной в [60]

Таким образом, расчет удельной массовой скорости выгорания жидких углеводородных топлив целесообразно производить по формуле (2.7), а сжиженных газов – по формуле (2.8).

Значительное влияние на горение жидкостей в открытом пространстве оказывает ветер. При этом с увеличением скорости ветра, как правило, увеличивается скорость выгорания, пламя отклоняется от вертикали, изменяются его размеры, конфигурация, а также тепловое воздействие излучения на окружающие объекты.

В работе [4] для описания зависимости удельной массовой скорости выгорания топлива в резервуарах от скорости ветра предложено использовать выражение:

$$\frac{m'}{m'_0} = 1 + \left(\frac{m'_m}{m'_0} - 1 \right) \cdot \left(1 - e^{-\beta \cdot u_w} \right), \quad (2.9)$$

где m'_0 – удельная массовая скорость выгорания при отсутствии ветра;

m'_m – максимальная удельная массовая скорость выгорания (при скорости ветра около 30 м/с);

$\beta = 0,1$ с/м для бензина, керосина и дизельного топлива;

u_w – скорость ветра, м/с.

Для сосудов диаметром 0,3 м с вышеуказанными жидкостями отношение m'_m/m'_0 колеблется в пределах от 2 до 3,5, однако для резервуаров диаметром 1,9 м эта величина примерно равна 1,2. При дальнейшем увеличении размеров резервуаров влияние ветра на скорость выгорания становится незначительным, что подтверждается экспериментами с горением СПГ [70], [71].

Следует отметить, что на процессы горения, в том числе на массовую скорость выгорания значительное влияние оказывает процесс образования сажи, который недостаточно изучен в настоящее время.

В модели твердотельного излучателя при пожарах пролива фактический контур пламени, как правило, заменяется эквивалентным цилиндром, основанием которого является свободная поверхность жидкости, а его образующая равна длине пламени. Эквивалентный цилиндр испускает тепловое излучение в направлении реципиента и может отклоняться от вертикали под действием ветра (рисунок 2.3) [60]–[69], [71]–[73], [75], [76].

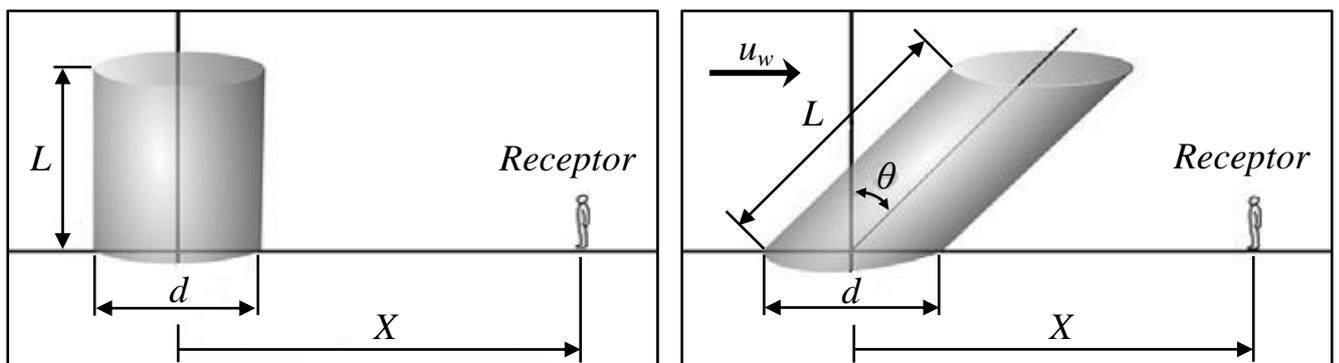


Рисунок 2.3 – Представление фактического контура пламени
в виде эквивалентного цилиндра

Максимальная среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени представляет собой количество энергии, излучаемой с единицы поверхности контура пламени в единицу времени без учета эффекта экранирования контура пламени сажей. Указанная величина является функцией удельной массовой скорости выгорания и удельной теплоты сгорания. Поскольку удельная массовая скорость выгорания зависит от диаметра пролива, а излучаемая энергия пропорциональна площади идеализированного контура пламени, представляемого в виде цилиндра над площадью пролива, в [61] для определения максимальной среднеповерхностной интенсивности теплового излучения предложено использовать поправочный коэффициент $1/(1+4(L/d))$. Таким образом, выражение для определения среднеповерхностной интенсивности пламени имеет вид:

$$E_{f \max} = F_S \frac{1}{1 + 4(L/d)} m' \cdot \Delta H_C, \quad (2.10)$$

где F_S – доля удельной теплоты сгорания, преобразованной в излучение;

L – длина пламени, м.

Численные значения F_S для некоторых углеводородных топлив представлены в таблице 2.3 [61].

Таблица 2.3 – Численные значения F_S для некоторых углеводородных топлив

Вещество	d , м	F_S	Вещество	d , м	F_S
Метанол	0,076	0,162	Бензин	1,22	0,30-0,40
	0,152	0,165		1,53	0,16-0,27
	1,220	0,177		3,05	0,13-0,14
Метан	0,305	0,210		>3,05	0,2
	0,760	0,230	Бензол	0,076	0,350
	1,530	0,15-0,24		0,457	0,345
	3,050	0,24-0,34		0,760	0,350
6,100	0,20-0,27	1,220		0,360	
			Бутан	0,305	0,199
				0,457	0,205
				0,700	0,269

Основные положения, используемые для определения геометрических характеристик пламени при горении жидкостей, содержатся в [62]. Параметрами, влияющими на длину пламени в модели твердотельного излучателя, являются диаметр пролива, удельная массовая скорость выгорания и температура горения. Однако необходимо отметить, что при пожарах пролива длина пламени периодически меняется в процессе горения в зависимости от изменения удельной массовой скорости выгорания, а также турбулентных пульсаций пламени. Светящиеся отрывные зоны в верхней части пламени, в которых происходит догорание топлива с интенсивным излучением, обусловлены движением конвективных вихрей нагретых газов и составляют около 50 % от длины пламени [70]. Для значений $L/d < 1$, что характерно для пожаров пролива диаметром более 100 м, пламя распадается на ряд отдельных пламен. При пожарах пролива диаметром от 3 до 20 м длина пламени составляет примерно 1–3 диаметра пролива [62].

Для определения длины пламени *Thomas P.H.* предложил формулу, полученную в результате экспериментального исследования горения штабелей древесины [63], [64], [73]:

$$\frac{L}{D} = 42 \left[\frac{m'}{\rho_g \sqrt{gd}} \right]^{0.61}, \quad (2.11)$$

где ρ_g – плотность воздуха, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Формула (2.11) удовлетворительно аппроксимирует эмпирические данные горения гептана и аналогичных жидкостей, диаметр свободной поверхности которых не превышает 20 м [73], [65]. Она справедлива для тех случаев, когда испарение жидкости обусловлено только передачей тепла от пламени, что характерно для жидких углеводородных топлив. При пожарах пролива сжиженных газов (например, водорода) значительный вклад в их испарение вносит подвод тепла от подстилающей поверхности. В этом случае длину пламени можно найти по формуле, представленной в [66]:

$$L = 20 \dot{M}^{0.4}, \quad (2.12)$$

где \dot{M} – расход жидкого водорода, кг/с.

Авторами работ [67]–[69] произведен анализ и сопоставление имеющихся в литературных источниках данных о пожарах пролива и факельном горении сжиженных газов (пропан, бутан, СПГ, водород), в результате чего установлена зависимость для определения длины пламени:

$$L = 0,235\dot{Q}^{0,4} - 1,02d, \quad (2.13)$$

где \dot{Q} – интенсивность тепловыделения, кВт.

При скорости ветра более 1 м/с пламя наклоняется и укорачивается, с подветренной стороны оно может касаться горизонтальной поверхности, а его верхняя часть сильно колеблется. Определение угла отклонения пламени от вертикали (далее угол отклонения пламени) и его длины при ветровом воздействии представляет значительные сложности.

В результате обработки экспериментальных данных горения штабелей древесины *Thomas P.H.* получил формулу для расчета угла отклонения пламени [73]:

$$\cos\theta = 0,7 \left[\frac{u_w}{(gm'd / \rho_g)^{1/3}} \right]^{-0,49}. \quad (2.14)$$

Welker J.R. u Slierpcevich C.M. предложили альтернативное выражение для определения угла отклонения пламени [72]:

$$\frac{\tan\theta}{\cos\theta} = 3,3Fr^{0,07} Re^{0,8} \left(\frac{\rho_2}{\rho_g} \right)^{-0,6}, \quad (2.15)$$

где Fr и Re – числа Фруда и Рейнольдса;

ρ_2 – плотность насыщенных паров топлива при температуре кипения, кг/м³.

Следует отметить, что для пожаров пролива большого диаметра численные значения углов отклонения пламени, рассчитанные по формуле (2.15), имеют значительное расхождение с наблюдаемыми на реальных пожарах.

Pritchard M.J. и Binding T.M., используя представленные выше критерии подобия, получили выражение для определения угла отклонения пламени [75]:

$$\frac{tg\theta}{\cos\theta} = 0,666Fr^{0,333} Re^{0,117}. \quad (2.16)$$

В отчете Американской Газовой Ассоциации (AGA) формула для определения угла отклонения пламени имеет вид [71]:

$$\cos \theta = \begin{cases} 1, & \text{if } u^* < 1 \\ 1/\sqrt{u^*}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2.17)$$

где u^* – безразмерная скорость ветра, определяемая по выражению, представленному в [73]:

$$u^* = \begin{cases} u_w \left[\frac{g m' d}{\rho_e} \right]^{\frac{1}{3}} & \text{if } u^* < 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (2.18)$$

Сравнение графических зависимостей углов отклонения пламени от безразмерной скорости ветра, полученных по формулам (2.14) и (2.17), с экспериментальными данными позволило установить, что формула (2.17) дает более точные результаты (рисунок 2.4) [60].

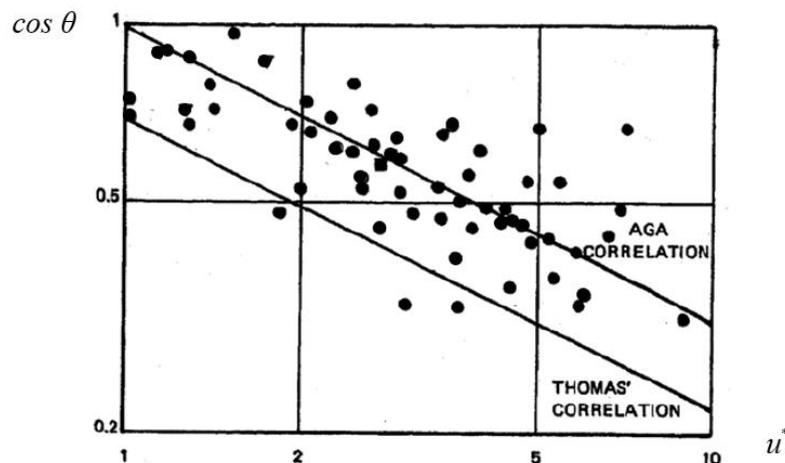


Рисунок 2.4 – Зависимость угла отклонения пламени от безразмерной скорости ветра

Thomas P.H. предложил формулу для определения длины пламени при ветровом воздействии, преобразовав уравнение (2.11) с учетом безразмерной скорости ветра [73]:

$$\frac{L}{D} = 55 \left[\frac{m'}{\rho_e \sqrt{gd}} \right]^{0.67} u^{*-0.21}. \quad (2.19)$$

Moorhouse J. провел ряд натуральных экспериментов по определению длины пламени с учетом ветрового воздействия при пожаре пролива СПГ и в результате обработки опытных данных получил выражение [76]:

$$\frac{L}{D} = 62 \left[\frac{m'}{\rho_g \sqrt{gd}} \right]^{0,254} u^{*-0,044}. \quad (2.20)$$

Pritchard M.J. и *Binding T.M.* установили, что определение длины пламени по формуле (2.19) дает заниженные результаты, в связи с чем ими была предложена зависимость [75]:

$$\frac{L}{D} = 10,615 \left[\frac{m'}{\rho_g \sqrt{gd}} \right]^{0,305} u^{*-0,03}. \quad (2.21)$$

Фактическая среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени учитывает экранирование его контура частицами сажи. Для пожаров пролива нефтепродуктов, таких как керосин, бензол и др. эту величину предлагается определять по формуле [75]:

$$E_f = E_{f \max} (1 - s) + E_{soot} s, \quad (2.22)$$

где E_{soot} – интенсивность теплового излучения сажи, кВт/м²;

s – доля поверхности контура пламени, покрытая сажой и принимаемая равной 80 %.

Для пожаров пролива диаметром более 15 м $E_{soot} = 20$ кВт/м². Если диаметр пожара пролива не превышает 2-х метров $E_f = E_{f \max}$.

Для нефтей и нефтепродуктов с молярной массой около 60 кг/кмоль *Croce P.A.* и *Mudan K. S.* предложили определять фактическую среднеповерхностную интенсивность теплового излучения пламени по эмпирической формуле [70]:

$$E_f = 140 \cdot e^{-0,12d} + 20 \cdot (1 - e^{-0,12d}). \quad (2.23)$$

Для других видов топлив допускается использовать эмпирическое выражение, представленное в [70]:

$$E_f = \frac{0,35 m' \Delta H_C}{1 + 72(m')^{0,61}}. \quad (2.24)$$

Угловой коэффициент облученности характеризует геометрические параметры взаимодействующих при лучистом теплообмене поверхностей и их местоположение в пространстве относительно друг друга.

Формула для определения углового коэффициента облученности имеет вид [70]:

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (2.25)$$

где F_V , F_H – факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок соответственно, определяемые для площадок, расположенных в 90° секторе в направлении наклона пламени, по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \pi F_V = & -E \cdot \operatorname{arctg} D + E \cdot \left\{ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right\} \times \\ & \times \operatorname{arctg} \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) + \frac{\cos \theta}{C} \cdot \left\{ \operatorname{arctg} \left(\frac{a \cdot b - F^2 \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \right. \\ & \left. + \operatorname{arctg} \left(\frac{F \cdot \sin \theta}{C} \right) \right\}, \quad (2.26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi F_H = & \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \cdot \left\{ \operatorname{arctg} \left(\frac{a \cdot b - F^2 \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \right. \\ & \left. + \operatorname{arctg} \left(\frac{F \cdot \sin \theta}{C} \right) \right\} - \\ & - \left\{ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1 + a \cdot b \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right\} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) \end{aligned}, \quad (2.27)$$

$$\text{где } a = \frac{2L}{d}; \quad b = \frac{2X}{d};$$

$$A = \sqrt{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b+1) \cdot \sin \theta};$$

$$B = \sqrt{a^2 + (b-1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b-1) \cdot \sin \theta};$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \cdot \cos^2 \theta)}; \quad D = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}};$$

$$E = \frac{a \cdot \cos \theta}{b - a \cdot \sin \theta}; \quad F = \sqrt{b^2 - 1}.$$

В условиях абсолютного штиля уравнения (2.26) и (2.27) могут быть упрощены:

$$\pi F_v = -\frac{a}{b} \cdot \operatorname{arctg} D + \left[\frac{a}{b} \cdot \frac{(a^2 + b^2 + 1)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) + \frac{1}{b} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{a}{\sqrt{b^2 - 1}} \right), \quad (2.28)$$

$$\pi F_H = \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{D} \right) - \left[\frac{(a^2 + b^2 - 1)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{A \cdot D}{B} \right), \quad (2.29)$$

$$\text{где } A = \sqrt{a^2 + (b+1)^2}; \quad B = \sqrt{a^2 + (b-1)^2}; \quad D = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}}.$$

Для определения коэффициента пропускания атмосферы используется эмпирическое выражение, предложенное *Bagster D.G.* и *Pittblado R.M.* [77]:

$$\tau_a = c_4 [P_w (X - 0,5d)]^{0,09}, \quad (2.30)$$

где P_w – парциальное давление водяного пара в воздухе, Па;

X – расстояние от центра пролива диаметром d до облучаемого объекта, м;

c_4 – константа, равная $2,02 \text{ Па}^{0,09} \text{ м}^{0,09}$.

Парциальное давление водяного пара в воздухе вычисляется по формуле:

$$P_w = RH \cdot P_w^0, \quad (2.31)$$

где P_w^0 – давление насыщенных паров воды в воздухе, Па;

RH – относительная влажность воздуха.

В основе представленных выше зависимостей по определению параметров пламени лежит допущение о приведении формы пролива произвольной конфигурации к эквивалентному кругу. Таким образом, эти зависимости могут применяться только для проливов круговой формы (например, горение нефти в вертикальном стальном резервуаре) или близкой к этому.

Фирмой *ADL* (Англия) проведены исследования горения СПГ для проливов прямоугольной формы [70]. Эксперименты проводились в удлиненном котловане с соотношением длин сторон до 30 и показали некоторые отличия от горения СПГ при проливах круговой формы. В частности, при горении СПГ в удлиненном

котловане были получены несколько меньшие численные значения интенсивности теплового излучения, удельной массовой скорости выгорания, длины пламени и других характеристик. Причем различия начинались при отношении длин сторон котлована 4–5.

В результате проведенного исследования выявлено, что на угол отклонения пламени от вертикали при проливах прямоугольной формы ветровое воздействие, направленное по нормали к длинной стороне, оказывает значительно большее влияние, чем на аналогичное пламя при проливах круговой формы. При этом наблюдается увеличение размеров основания пламени в направлении ветрового воздействия, снижение длины пламени, а также нарушение его целостности, т.е. дробление пламени на отдельные крупные вихри.

При отношении длины пролива прямоугольной формы к его ширине больше 4–5 пламя начинает вести себя как линейный источник, для которого определяющими параметрами становятся ширина пролива и скорость ветра. В качестве обобщающего критерия предложено использовать модифицированное число Фруда [70]:

$$Fr' = u_w / 2\sqrt{g\Delta_0}, \quad (2.32)$$

где Δ_0 – ширина пролива прямоугольной формы, м.

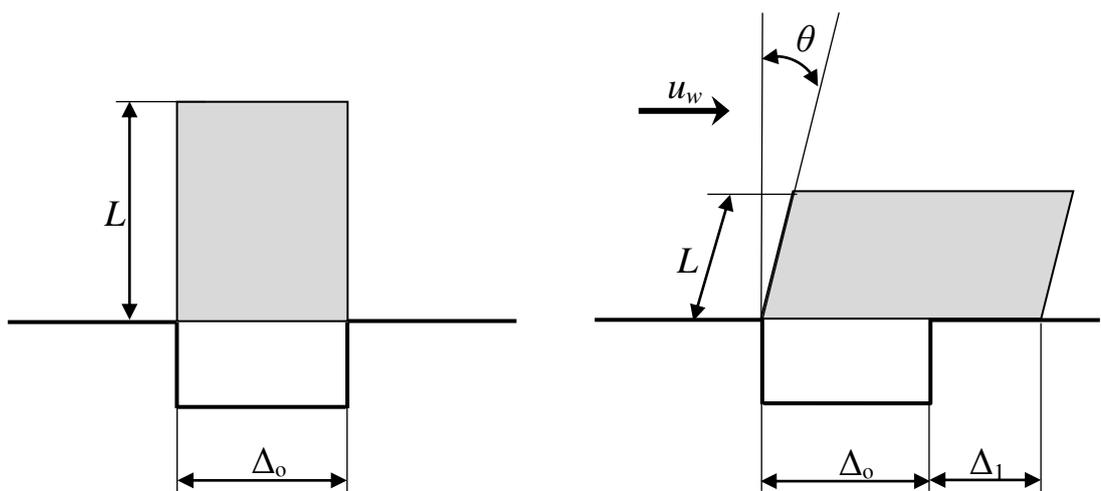


Рисунок 2.5 – Форма пламени при пожаре пролива прямоугольной формы [70]

Безразмерные длина и ширина пламени, а также угол его отклонения от вертикали определяются следующими соотношениями:

$$\frac{L}{\Delta_0} = \begin{cases} 4,0 & \text{if } Fr' < 0,1 \\ 0,88(Fr')^{-0,65} & \text{if } 0,1 \leq Fr' < 0,25, \\ 2,2 & \text{if } Fr' \geq 0,25 \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\frac{\Delta_1}{\Delta_0} = \begin{cases} 1,0 & \text{if } Fr' < 0,1 \\ 23,3(Fr')^{1,37} & \text{if } 0,1 \leq Fr' < 0,25, \\ 3,5 & \text{if } Fr' \geq 0,25 \end{cases} \quad (2.34)$$

$$\cos \theta = \begin{cases} 1,0 & \text{if } Fr' < 0,042 \\ 0,36(Fr')^{-0,32} & \text{if } 0,042 \leq Fr' < 0,25. \\ 0,56 & \text{if } Fr' \geq 0,25 \end{cases} \quad (2.35)$$

Анализ полученных зависимостей позволил установить, что геометрические параметры пламени при $Fr' < 0,1$ зависят только от ширины пролива. При возрастании модифицированного числа Фруда длина пламени уменьшается, а ширина основания пламени наоборот увеличивается. При $Fr' \geq 0,25$ геометрические параметры пламени становятся независимыми от окружающих условий.

Проведенные исследования показали, что фактический контур пламени при проливах прямоугольной формы может быть представлен эквивалентным параллелепипедом, а угловой коэффициент облученности и, следовательно, плотность лучистого теплового потока при прочих равных условиях будет сильно зависеть от скорости ветра. При относительно малых скоростях ветра пламя практически не отклоняется от вертикали, а ширина его основания ограничена шириной пролива. В этом случае угловой коэффициент облученности может быть рассчитан как коэффициент для плоской вертикальной поверхности с размерами, равными H_0 и l . При облучении единичной площадки, расположенной горизонтально (рисунок 2.6 а) или вертикально (рисунок 2.6 б) на поверхности земли, можно записать:

$$\varphi_{\chi=0} = \frac{1}{\pi} \left[\arctg \left(\frac{1}{Q_0} \right) - \frac{Q_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}} \arctg \left(\frac{1}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}} \right) \right], \quad (2.36)$$

$$\varphi_{\chi=\pi/2} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}} \right) + \frac{1}{\sqrt{1 + Q_0^2}} \operatorname{arctg} \left(\frac{P_0}{\sqrt{1 + Q_0^2}} \right) \right], \quad (2.37)$$

где $Q_0 = 2 \frac{X_0}{l}$; $P_0 = 2 \frac{H_0}{l}$.

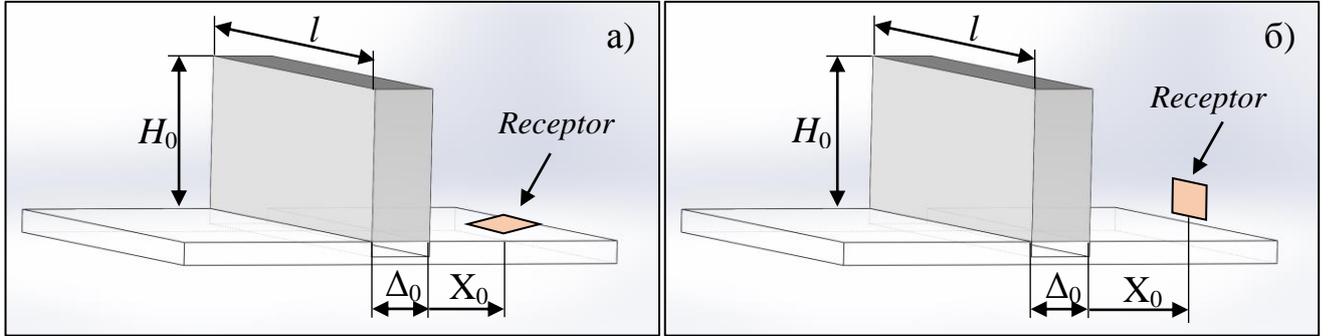


Рисунок 2.6 – К расчету углового коэффициента облученности при отсутствии ветра

При возрастании модифицированных чисел Фруда эквивалентный параллелепипед отклоняется от вертикали, а его ширина увеличивается, смещаясь в направлении ветрового воздействия. Для случая единичной площадки, расположенной горизонтально на поверхности земли с подветренной стороны относительно пламени (рисунок 2.8 а), для определения углового коэффициента облученности предложено использовать выражение:

$$\varphi_{\chi=0} = \frac{1}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{1}{Q_1} \right) + \frac{P_1 \cos \beta - Q_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + 2P_1Q_1 \cos \beta}} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + 2P_1Q_1 \cos \beta}} \right) + \frac{\cos \beta}{\sqrt{1 + Q_1^2 \sin^2 \beta}} \times \right. \\ \left. \times \left\{ \operatorname{arctg} \left(\frac{P_1 - Q_1 \cos \beta}{\sqrt{1 - Q_1^2 \sin^2 \beta}} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{Q_1 \cos \beta}{\sqrt{1 + Q_1^2 \sin^2 \beta}} \right) \right\} \right], \quad (2.38)$$

где $\beta = \frac{\pi}{2} - \theta$; $P_1 = \frac{2H_1}{l}$; $Q_1 = \frac{2x_1}{l}$.

При вертикальной ориентации единичной площадки интеграл в конечном виде не раскрывается, однако может быть вычислен с использованием решения для горизонтальной площадки путем преобразования координат:

$$\varphi_{\chi=\pi/2} = \varphi_{\chi=0}(L_1) - \varphi_{\chi=0}(L_2). \quad (2.39)$$

В формуле (2.38) x_1 заменяется на $y_1 = x_1 \operatorname{tg} \beta$, H_1 – соответственно на L_1 и L_2 , а угол β на θ (рисунок 2.7).

$$\varphi_{\chi=0} = \frac{1}{2\pi} \left[\cos \theta \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta_1}{y_1} \right) - \frac{y_1 \cos \theta}{A} \cdot \left\{ \operatorname{arctg} \left(\frac{H_1 \sin \theta}{A} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta_1 - H_1 \sin \theta}{A} \right) \right\} \right], \quad (2.40)$$

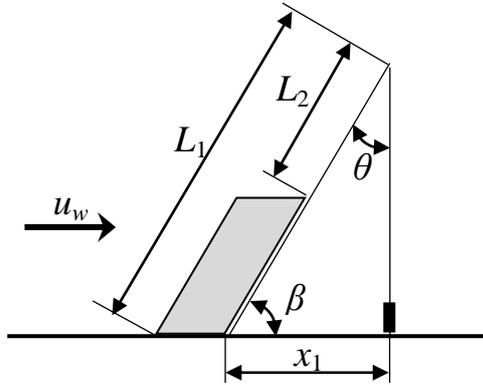


Рисунок 2.7 – К расчету углового коэффициента облученности для вертикальной ориентации единичной площадки при отклонении пламени под действием ветра

Таким образом, в случае ориентации единичной площадки по нормали к направлению ветра (рисунок 2.8 б) получено следующее выражение:

$$\varphi_{\chi=\pi/2} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{H_1 \cos \theta}{A} \left\{ \operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta_1 - H_1 \sin \theta}{A} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{arctg} \left(\frac{H_1 \sin \theta}{A} \right) \right\} + \right. \\ \left. + \frac{\Delta_1 \cos \theta}{A} \left\{ \operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta_1 \sin \theta}{A} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{arctg} \left(\frac{H_1 - \Delta_1 \sin \theta}{B} \right) \right\} \right], \quad (2.41)$$

где $A = \sqrt{H_1^2 \cos^2 \theta + y_1^2}$; $B = \sqrt{\Delta_1^2 \cos^2 \theta + y_1^2}$.

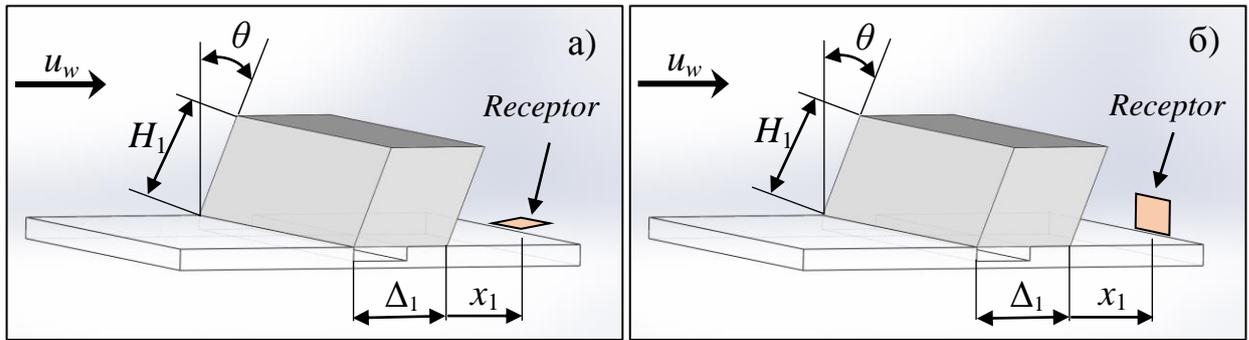


Рисунок 2.8 – К расчету углового коэффициента облученности при ветровом воздействии

Результаты приведенных выше исследований [4], [6], [50], [52]–[73], [75]–[78] нашли свое применение в нормативных документах по пожарной и промышленной безопасности [41], [79], [105], [106].

2.2 Теоретическое обоснование метода решения задачи

В соответствии с [35], [36], [38], [40], [42] стационарные лафетные стволы следует устанавливать на расстоянии не менее 15 м от железнодорожных путей сливноналивных эстакад (СНЭ) и рекомендуется оборудовать водопленочными защитными экранами (ВПЭ) [35], [40], обеспечивающими снижение плотности падающего лучистого теплового потока (далее плотность лучистого потока) пламени при пожаре на ствольщика в специальной защитной одежде пожарного до допустимых значений (не более 5 кВт/м^2) [35]. Однако требований к конструктивному исполнению этих экранов и их гидравлическим параметрам в нормативных документах не приводится. Таким образом, для обоснования параметров ВПЭ необходимо определить плотность лучистого потока на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ при пожаре пролива нефтепродукта.

Проведение натуральных экспериментов для достижения поставленной цели связано с большими трудностями и высокой опасностью для жизни и здоровья их участников. Способы, применяемые в существующих на сегодняшний день методиках [41], [79], [105], [106] по определению параметров процессов горения нефтепродуктов, не позволяют получить достоверные результаты, так как реализованы на основании эмпирических и полуэмпирических методов и не учитывают влияние геометрических характеристик ЖДЦ, находящейся над очагом пожара пролива, на структуру пламени [109].

Необходимо отметить, что процессы горения, образования сажи, теплового излучения пламени и его рассеяния в атмосфере отличаются сложным взаимным влиянием, которые учесть в рамках упрощенных аналитических соотношений практически невозможно. Все это определяет необходимость использования для решения подобного рода задач методов численного моделирования на основе пакетов вычислительной гидродинамики (*CFD* пакеты) [90]. При таком подходе сложная взаимосвязь тепло- и массообменных процессов, сопровождающих развитие пожара, учитывается посредством совместного решения дифференциальных уравнений переноса массы, импульса, энергии и турбулентных характеристик [80].

Для моделирования пожара пролива и прогнозирования плотности лучистого потока на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ было принято решение использовать один из наиболее современных пакетов вычислительной гидродинамики *ANSYS Fluent*, который содержит широкий набор верифицированных моделей, обеспечивающих получение точных результатов для широкого круга задач [81], [87], [88].

Для решения данной задачи были использованы: модель турбулентности *DES (Detached Eddy Simulation)*; модель горения *Eddy Dissipation*, модель излучения *Discrete Ordinates* и модель образования сажи *Moss-Brookes* [81], [87] с моделью окисления *Lee* [89], поскольку данная модель показала хорошую сходимость с результатами проведенных ранее экспериментов [91].

Ниже приводится описание использованных моделей.

Уравнения турбулентного диффузионного горения

В основе моделирования турбулентного диффузионного горения лежит система уравнений Навье-Стокса для многокомпонентной реагирующей среды. Указанная система содержит уравнения неразрывности, переноса компонентов, импульса и энергии [94]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial \rho Y_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Y_\alpha}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\mu}{Sc_\alpha} \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_j} + R_{\alpha,r}; \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right) + \rho g_i; \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_j} - \frac{\partial F_j^r}{\partial x_j}, \quad (2.45)$$

где ρ – плотность;

t – время;

u_j – проекция вектора скорости на ось x_j ;

x_j – координата;

Y_α – массовая доля i -го компонента смеси;

Sc_α – число Шмидта;

$R_{\alpha,r}$ – источниковый член химической реакции для α -го компонента;

p – давление;

μ – коэффициент молекулярной динамической вязкости;

δ_{ij} – символ Кронекера;

g_i – проекции вектора ускорения свободного падения на координатные оси;

h – массовая энтальпия;

Pr – число Прандтля;

F_j^r – радиационный тепловой поток в направлении оси x_j .

Модель турбулентности

Турбулентные флуктуации учитывались с использованием модели *DES* (*Detached Eddy Simulation*) [81], [87]. Указанная модель является альтернативой моделям турбулентности *RANS* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) и модели *LES* (*Large Eddy Simulation*) и применяется для расчета пристеночных течений с обширными отрывными зонами, для которых модели *RANS* не способны обеспечить приемлемую точность, а модель *LES* требует чрезмерно больших вычислительных затрат. Сущность модели турбулентности *DES* заключается в использовании моделей *RANS* в пограничном слое и модели *LES* вдали от стенок [95].

Уравнения, используемые в модели турбулентности *LES*, получают путем фильтрации характеристик реального турбулентного течения по времени от коротковолновых неоднородностей. Указанный процесс позволяет отфильтровать вихри, масштабы которых меньше размера фильтра или локального размера расчетной сетки [81].

Отфильтрованная переменная определяется по формуле:

$$\bar{\phi}(x) = \int_D \phi(x') G(x; x') dx', \quad (2.46)$$

где ϕ – актуальная переменная;

D – объем расчетной области;

G – функция фильтра;

x – координата рассматриваемой точки потока.

Дискретизация расчетной области на конечные объемы неявно обеспечивает операцию фильтрации:

$$\bar{\phi}(x) = \frac{1}{V} \int_V \phi(x') dx', \quad x' \in V, \quad (2.47)$$

где V – конечный объем.

Функция фильтра $G(x, x')$ имеет вид:

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V, & x' \in V \\ 0, & x' \text{ otherwise} \end{cases}. \quad (2.48)$$

Модель горения

Процессы горения учитывались с использованием модели *EDM* (*Eddy Dissipation Model*) [81], [87]. Рассматриваемая модель была разработана Магнусеном и Хьертагером для моделирования процессов горения, в которых скорость химической реакции определяется временем смешения реагентов на молекулярном уровне (числа Дамкелера $Da \gg 1$). В этой модели закономерности химической кинетики используются только для описания образования радикалов и поллютантов. В турбулентных потоках время смешения реагентов определяется вихревыми свойствами течения. Таким образом, скорость химической реакции пропорциональна времени смешения крупных вихрей, которое зависит от кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε .

Скорость образования α -го компонента в r -ой реакции $R_{\alpha,r}$ определялась из соотношений:

$$R_{\alpha,r} = \min(R_{\alpha,r(react)}, R_{\alpha,r(prod)}), \quad (2.49)$$

$$R_{\alpha,r(react)} = v'_{\alpha,r} M_{w,\alpha} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_{\mathfrak{R}} \left(\frac{Y_{\mathfrak{R}}}{v'_{\mathfrak{R},r} M_{w,\mathfrak{R}}} \right), \quad (2.50)$$

$$R_{\alpha,r(prod)} = v'_{\alpha,r} M_{w,\alpha} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j v''_j M_{w,j}}, \quad (2.51)$$

где v' и v'' – стехиометрические коэффициенты для реагентов и продуктов горения;

A и B – эмпирические константы, соответственно равные 4,0 и 0,5;

M_w – молярная масса;

\mathfrak{R} и P – индексы, характеризующие реагенты и продукты горения.

В модели турбулентности *LES* турбулентная скорость смешения ε/k в выражениях (2.50) и (2.51) заменяется подсеточной скоростью смешения, определяемой по формуле:

$$\tau_{sgs}^{-1} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad (2.52)$$

где S_{ij} – тензор скоростей деформации:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (2.53)$$

Необходимо отметить, что в рассматриваемой модели горения не требуется источник зажигания для инициирования горения, а скорость химической реакции не является функцией температуры.

Модель излучения

Для прогнозирования излучения применялась модель *DO* (*Discrete Ordinates*), которая охватывает весь диапазон оптических толщин и позволяет моделировать тепловое излучение пламени [81], [87].

Интегро-дифференциальное уравнение лучистого переноса (*RTE*) для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды в положении \vec{r} и направлении \vec{s} имеет вид:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega', \quad (2.54)$$

где I – интенсивность излучения;

\vec{r} – вектор положения;

\vec{s} – вектор направления;

\vec{s}' – вектор направления рассеивания;

s – длина пути;

a – коэффициент поглощения;

n – показатель преломления;

σ_s – коэффициент рассеивания;

σ – постоянная Стефана-Больцмана,

T – температура;

Φ – фазовая функция;

Ω' – телесный угол.

Показатель поглощения принимался в соответствии с [74] в зависимости от температур, характеризующих четыре зоны с различными термодинамическими параметрами газовой среды и концентрацией сажи. Характеристики указанных

зон, температурные диапазоны и значения показателя поглощения представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения показателя поглощения

Характеристика зоны		Температурный диапазон, К	Показатель поглощения, м ⁻¹
Преобладающий компонент:	воздух	[273, 573)	0,020
	сажа	[573, 923)	1,035
	продукты сгорания в газовой фазе	[923, 1413)	0,404
Зона химической реакции		[1413, 1653]	0,380

Модель образования сажи

Образование сажи учитывалось с использованием модели *Moss-Brookes* [81], [87], [98], которая включает в себя уравнения переноса для приведенной концентрации радикалов зародышей сажи b_{nuc}^* и ее массовой доли Y_{soot} :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{soot}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_{soot}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{soot}} \nabla Y_{soot} \right) + \frac{dM}{dt}, \quad (2.55)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho b_{nuc}^*) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} b_{nuc}^*) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{nuc}} \nabla b_{nuc}^* \right) + \frac{1}{N_{norm}} \frac{dN}{dt}, \quad (2.56)$$

где Y_{soot} – массовая доля сажи;

M – массовая концентрация сажи;

N – число частиц сажи в единице объема;

N_{norm} – число частиц, равное 10^{15} ;

b_{nuc}^* – приведенная концентрация радикалов зародышей: $b_{nuc}^* = N / (\rho N_{norm})$.

Мгновенная скорость образования частиц сажи, подверженных зародышеобразованию из газовой фазы и коагуляции в свободномолекулярном режиме, определяется выражением:

$$\frac{dN}{dt} = \underbrace{C_\alpha N_A \left(\frac{X_{prec} P}{RT} \right)^l \exp\left\{ -\frac{T_\alpha}{T} \right\}}_{\text{нуклеация}} - \underbrace{C_\beta \left(\frac{24RT}{\rho_{soot} N_A} \right)^{\frac{1}{2}} d_p^{\frac{1}{2}} N^2}_{\text{коагуляция}}, \quad (2.57)$$

где C_α , C_β и l - модельные константы;

N_A - число Авогадро;

R - универсальная газовая постоянная;

X_{prec} - мольная доля прекурсора сажи (установлено, что для жидких углеводородов прекурсорами являются ацетилен и/или бензол);

d_p - средний диаметр частицы сажи;

ρ_{soot} - плотность сажи.

Скорость образования зародышей пропорциональна локальной концентрации прекурсоров. Температура активации T_α для реакции нуклеации была установлена *Lindstedt R.P.* [96].

Выражение для источникового члена массовой концентрации сажи имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dt} = & \underbrace{M_p C_\alpha \left(\frac{X_{prec} P}{RT} \right)^l \exp\left\{ -\frac{T_\alpha}{T} \right\}}_{\text{нуклеация}} + \\ & + \underbrace{C_\gamma \left(\frac{X_{sgs} P}{RT} \right)^m \exp\left\{ -\frac{T_\alpha}{T} \right\} \left[(\pi N)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{6M}{\rho_{soot}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^n}_{\text{поверхностный рост}} - \\ & - \underbrace{C_{oxid} C_\omega \eta_{coll} \left(\frac{X_{OH} P}{RT} \right) \sqrt{T} (\pi N)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{6M}{\rho_{soot}} \right)^{\frac{2}{3}}}_{\text{окисление}}, \end{aligned} \quad (2.58)$$

где C_γ , C_{oxid} , C_ω , m и n - модельные константы;

M_p - молярная масса зародыша, который состоит из 12 атомов углерода;

X_{sgs} - мольные доли компонентов, участвующих в поверхностном росте;

X_{OH} - мольная доля окислителя.

Скорость окисления сажи определяется согласно модели, предложенной Fenimore C.P., Jones G.W. [97]. Вероятность эффективных столкновений η_{coll} принимается равной 0,04. При этом учитывается, что гидроксильный радикал является преобладающим окислителем сажи в процессе диффузионного горения углеводородного топлива в воздухе.

Порядок определения показателей степени l , m и n детально описан Brookes S.J., Moss J.B. в работе [98]. Константы C_α и C_β определяются в результате численного моделирования с использованием экспериментальных данных.

Для определения массовой доли прекурсора сажи, которым при горении н-гептана в воздухе является ацетилен, применялась модель *Steady Diffusion Flamelet* [81], [87].

Сущность данной модели заключается в том, что описание диффузионного горения можно упростить, если использовать скалярные величины, которые называются пассивными и остаются постоянными в ходе протекания реакций, а их изменение определяется только процессами переноса. Существование пассивных скаляров (переменных Шваба-Зельдовича) обусловлено сохранением массы атомов, входящих в состав реагентов и продуктов [94].

По аналогии с массовыми долями компонентов Y_i в модели вводится понятие массовой доли элемента, которая определяется как отношение массы элемента i к полной массе [99]:

$$Z_\alpha = \sum_{i=1}^S \mu_{\alpha,i} Y_i; \quad \alpha = 1, \dots, M, \quad (2.59)$$

где S – количество различных компонентов;

M – число элементов смеси;

$\mu_{\alpha,i}$ – массовая доля элемента α в компоненте i .

Для простых пламен предварительно не перемешанной смеси, которые можно рассматривать как совместные потоки горючего (*fuel*) и окислителя (*air*) в качестве пассивного скаляра используют переменную смешения (*mixture fraction*), определяемую по формуле [94]:

$$f = \frac{Z_{\alpha} - Z_{\alpha}^{air}}{Z_{\alpha}^{fuel} - Z_{\alpha}^{air}}, \quad (2.60)$$

где Z_{α}^{air} – массовая доля элемента α в потоке воздуха;

Z_{α}^{fuel} – массовая доля элемента α в потоке горючего.

Если коэффициенты диффузии компонентов равны (что приблизительно выполняется для рассматриваемой задачи), величина переменной смешения не зависит от выбора элемента, используемого для ее определения.

Турбулентное пламя может быть смоделировано как совокупность отдельных микроламинарных пламен. Уравнения ламинарного диффузионного пламени, записанные для физического пространства, могут быть преобразованы, используя переменную смешения в качестве независимого аргумента [100]:

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 Y_i}{\partial f^2} + S_i, \quad (2.61)$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 T}{\partial f^2} - \frac{1}{c_p} \sum_i H_i S_i + \frac{1}{2c_p} \rho \chi \left[\frac{\partial C_p}{\partial f} + \sum_i c_{p,i} \frac{\partial Y_i}{\partial f} \right] \frac{\partial T}{\partial f}, \quad (2.62)$$

где χ – скорость скалярной диссипации;

S_i – скорость реакции компонента i ;

H_i – удельная энтальпия компонента i ;

c_p – удельная теплоемкость.

Скорость скалярной диссипации определяется по формуле [101]:

$$\chi(f) = \frac{a_s}{4\pi} \frac{3(\sqrt{\rho_{\infty}/\rho} + 1)^2}{2\sqrt{\rho_{\infty}/\rho} + 1} \exp\left(-2[\operatorname{erfc}^{-1}(2f)]^2\right), \quad (2.63)$$

где a_s – характерная скорость деформации пламени;

ρ_{∞} – плотность потока воздуха.

Для нахождения зависимости массовой доли прекурсора сажи (ацетилена) от переменной смешения использовался редуцированный кинетический механизм горения н-гептана в воздухе, учитывающий 770 обратимых элементарных химических реакций между 159 реагирующими компонентами [103], [104]. Расчеты

выполнялись в программном пакете *Ansys Fluent*. Зависимость массовой доли ацетилена от переменной смешения представлена на рисунке 2.9.

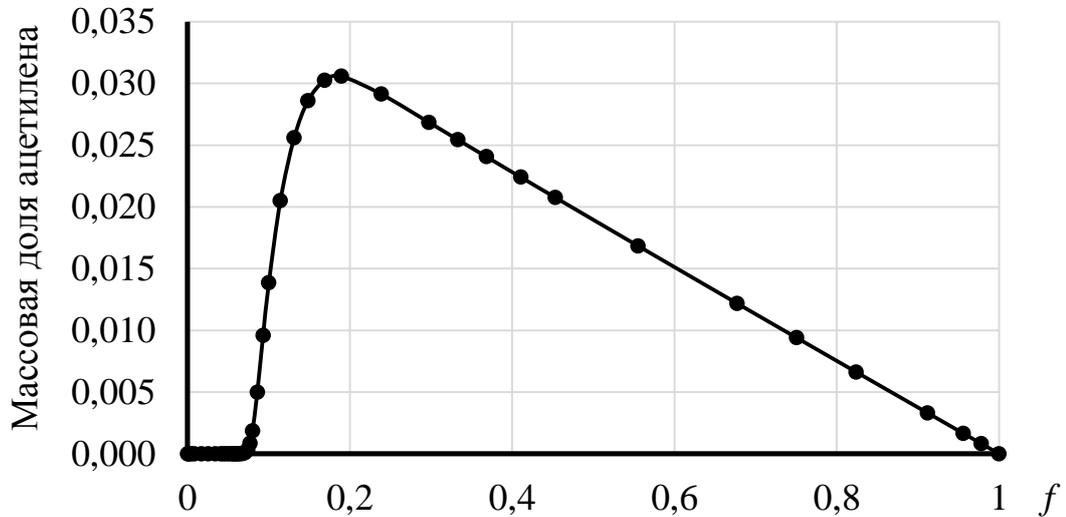


Рисунок 2.9 – Зависимость массовой доли ацетилена от переменной смешения

В результате обработки данных, представленных на рисунке 2.9, в программной среде *Excel* была получена кусочно-полиномиальная функция для массовой доли прекурсора сажи (ацетилена):

$$Y_{prec} = \begin{cases} \text{для } 0 \leq f < 0,1484; \\ 0,045451 - 0,022209f + 4,176643 \cdot 10^{-3} f^2 - 3,900028 \cdot 10^{-4} f^3 + \\ + 0,1922477 \cdot 10^{-4} f^4 - 0,0004801 \cdot 10^{-3} f^5 + 0,0000048 \cdot 10^{-3} f^6; \\ \text{для } 0,1484 \leq f < 0,7506; \\ 8,884111 \cdot 10^{-4} f + 1,9120415 \cdot 10^{-3} f^2 - 8,128719 \cdot 10^{-4} f^3 + \\ + 0,113581 \cdot 10^{-3} f^4 - 0,048935 \cdot 10^{-4} f^5; \\ \text{для } 0,7506 \leq f < 1; \\ -1,552133 \cdot 10^{-4} f + 2,182197 \cdot 10^{-4} f^2 - 0,175443 \cdot 10^{-4} f^3. \end{cases} \quad (2.64)$$

Полученная зависимость использовалась для решения уравнений (2.57) и (2.58).

2.3 Валидация теоретических моделей для определения параметров пожара пролива нефтепродуктов

С целью проведения валидации выбранных моделей, параметров расчетной сетки и временного шага предварительно были проведены экспериментальные исследования горения бензина в противне, диаметр которого был принят равным 1 м для обеспечения турбулентного режима горения [92], [93].

Задачей экспериментального исследования являлось выявление закономерностей процесса горения и определение плотности теплового потока в отсутствии ветрового воздействия.

Для исключения влияния возмущений в виде порывов естественного ветра эксперимент проводился в закрытом помещении размерами в плане 12×24 м и высотой 6 м. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 2.10.

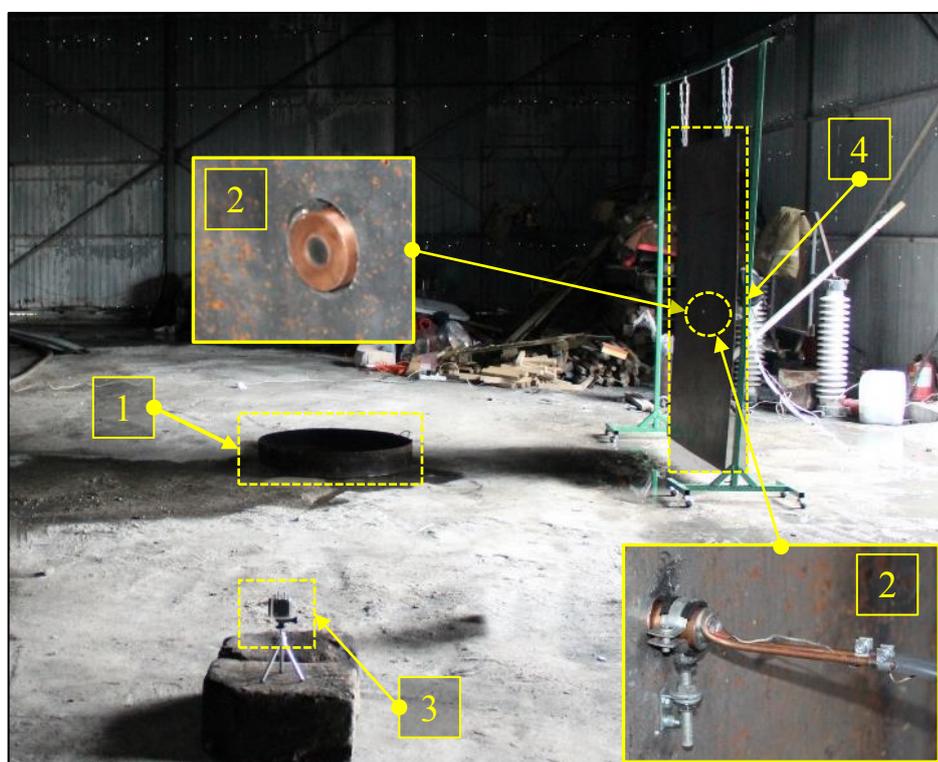


Рисунок 2.10 – Общий вид экспериментальной установки:

1 – противень с бензином, 2 – приемник теплового потока, 3 – видеокамера,

4 – стальной лист для крепления приемника теплового потока.

При проведении эксперимента для регистрации падающего лучистого теплового потока применялся прибор ПТП-2001 (рисунок 2.11), измеряемая плотность теплового потока находится в диапазоне от 1 до 100 кВт/м², чувствительность приемника – 93,5 (мкВ·м²)/кВт, погрешность измерения приемника составляет ± 4,8 % [136]. Выбор ПТП-2001, который является датчиком Гордона [107], был обусловлен его возможностью измерения более высоких значений плотности лучистого теплового потока в отличие от датчика Шмидта-Боултера [108].



Рисунок 2.11 – Приемник теплового потока ПТП-2001 (датчик Гордона)

Приемник теплового потока располагался на расстоянии 2,1 м от центра противня и на высоте 0,93 м от уровня пола помещения.

Регистрация сигнала, передаваемого приемником теплового потока осуществлялась с помощью цифрового мультиметра *UT60A*, диапазон измерения напряжения которого составляет 400 мВ ÷ 1000 В, а погрешность измерения ± 0,8 %. Мультиметр был подключен к персональному компьютеру через интерфейс *RS-232C* и провод *USB*. Мониторинг и запись данных осуществлялись в программном обеспечении *UT60A Interface Program*. Видеозапись эксперимента производилась на экшн-камеру *SJCAM M10 Cube Mini*, формат записи – 720p, частота кадров при съемке видео – 60 кадров/с.

Среднее значение измеренной плотности теплового потока составило 4,6 кВт/м². Характерный контур пламени, образующийся при горении бензина в противне, представлен на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Характерный контур пламени при горении бензина в противне, полученный в результате эксперимента

На рисунке 2.13а приведена геометрическая модель расчетной области, которая представляет собой параллелепипед со сторонами 4,2 м и высотой 6 м. Показанные на рисунке 2.13 четыре одинаковые вертикальные полосы используются для поддержания осевой симметрии потока и усреднения падающих лучистых тепловых потоков от пульсирующего пламени [82].

На входе в расчетную область (выделена красным цветом на рисунке 2.13б), задавался гомогенный поток паров горючего с осредненной температурой кипения и удельным расходом, равным $0,06 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, что соответствует удельной массовой скорости выгорания бензина, представленной в [105].

Для дискретизации расчетной области была построена гексаэдрическая сетка, состоящая из 3 835 200 элементов с максимальным размером 40 мм.

Задача решалась в нестационарной постановке с временным шагом 10^{-3} с , время моделирования горения – 10 с.

Сравнение контуров мгновенных разрешенных температур, полученных в результате численного моделирования и экспериментального исследования, представлено на рисунке 2.14 [82].

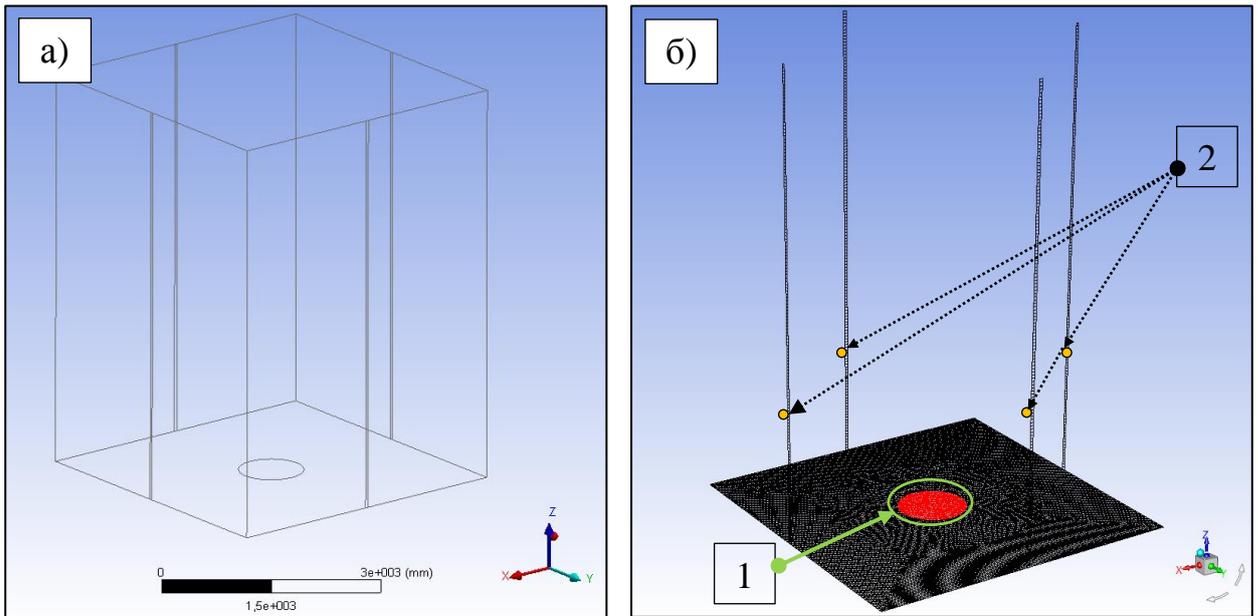


Рисунок 2.13 – Геометрическая модель расчетной области: 1 – очаг горения; 2 – точки, в которых производилось измерение плотности теплового потока

Полученные в результате численного моделирования контуры мгновенных разрешенных температур, частота и масштаб турбулентных пульсаций, образующихся при горении вихрей, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Регистрация плотности теплового потока при численном моделировании производилась в четырех точках, представленных на рисунке 2.13б и расположенных на вертикальных полосах. Высота размещения указанных точек измерения принималась равной высоте крепления приемника теплового потока при проведении экспериментального исследования. Учитывая асимметричность турбулентных пульсаций пламени, было произведено осреднение плотности теплового потока в точках измерения на каждом временном шаге.

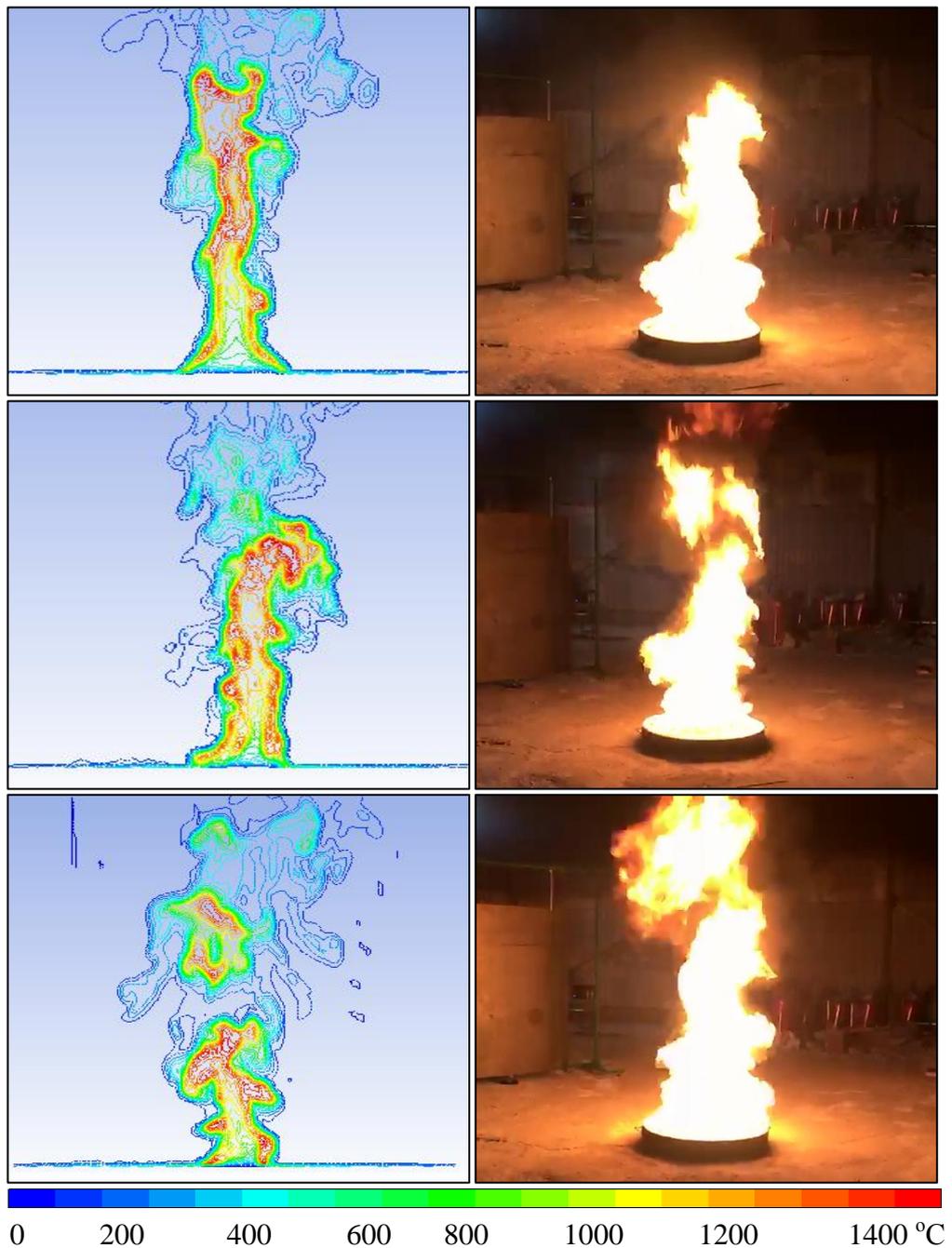


Рисунок 2.14 – Сравнение контуров мгновенных разрешенных температур, полученных в результате численного моделирования и экспериментального исследования

Анализ данных, представленных на рисунке 2.15, показал, что среднее расхождение значений плотности теплового потока, полученных в результате численного моделирования и экспериментального исследования, не превышает 10 % [92], [93].



Рисунок 2.15 – Зависимость плотности падающего лучистого теплового потока от времени

Удовлетворительная сходимость результатов численного моделирования и экспериментального исследования позволяет судить об успешной валидации выбранных моделей. Таким образом, дальнейшее исследование было направлено на численное моделирование пожара пролива на СНЭ с целью определения плотности теплового потока и обоснования требований к конструктивному исполнению водоупорных защитных экранов и их гидравлическим параметрам.

2.4 Численное моделирование пожара пролива бензина на железнодорожной сливноналивной эстакаде при ветровом воздействии

На рисунке 2.16а приведена геометрическая модель расчетной области, которая представляет собой параллелепипед с основанием 32×25 м и высотой h , равной 20 м.

Для дискретизации расчетной области была построена гексаэдрическая сетка, состоящая из 1 077 894 элементов с максимальным размером 230 мм. Площадь очага горения составила 75 м^2 (5×15 м).

В сеточных моделях безразмерный параметр Y^+ , характеризующий величину отношения размера пристеночной ячейки к толщине ламинарного подслоя был принят равным 2, а коэффициент нарастания сеточных линий по нормали к поверхностям составлял 1,1, что соответствует требованиям моделей турбулентности для расчета отрывных режимов [81].

Задача решалась в нестационарной постановке с временным шагом 10^{-2} с, время моделирования горения при каждой скорости ветра составило 10 с. Для моделирования очага пожара на входе в расчетную область задавался гомогенный поток паров бензина с осредненной температурой кипения и удельным расходом, равным удельной массовой скорости выгорания бензина, принятой в соответствии с [105]. Теплообмен между пламенем и котлом железнодорожной цистерны не учитывался. С целью уменьшения вычислительных затрат была создана плоскость симметрии. Измерение плотности лучистого потока производилось в 40 точках, размещенных равномерно по высоте расчетной области на расстоянии 15 м от очага пожара (рисунок 2.16 б) [83]–[86], [92].

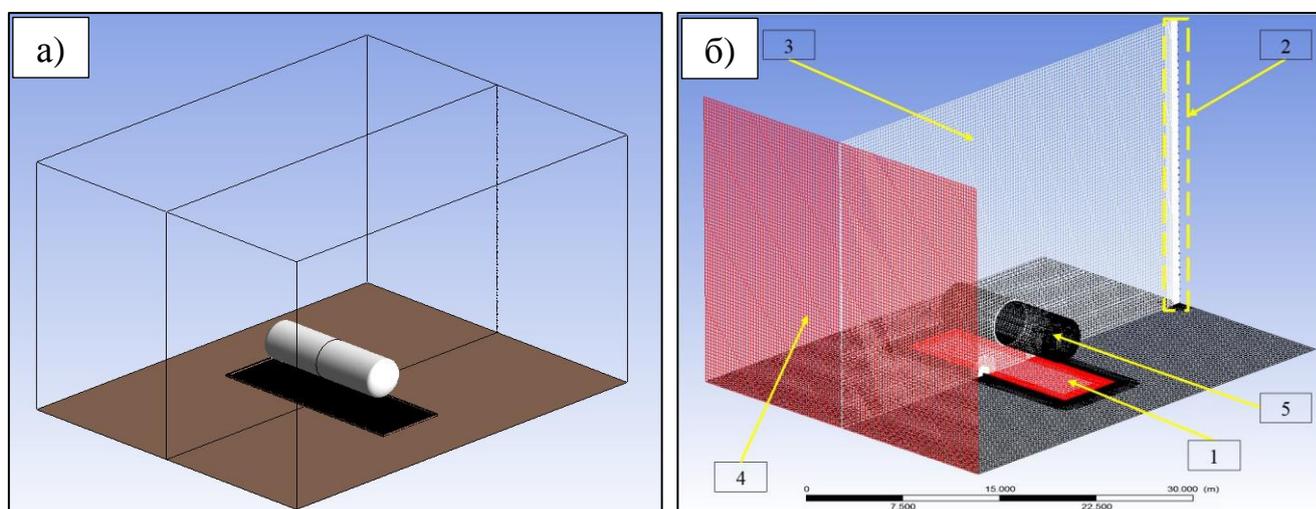


Рисунок 2.16 – Геометрическая (а) и сеточная (б) модели с граничными условиями:

- 1 – очаг пожара; 2 – точки, в которых производилось измерение плотности лучистого потока; 3 – плоскость симметрии; 4 – граница расчетной области, предназначенная для создания ветрового воздействия;
- 5 – котел железнодорожной цистерны

Контурные мгновенные разрешенные температуры в плоскости симметрии при различных скоростях ветра представлены на рисунке 2.17 [83]–[86].

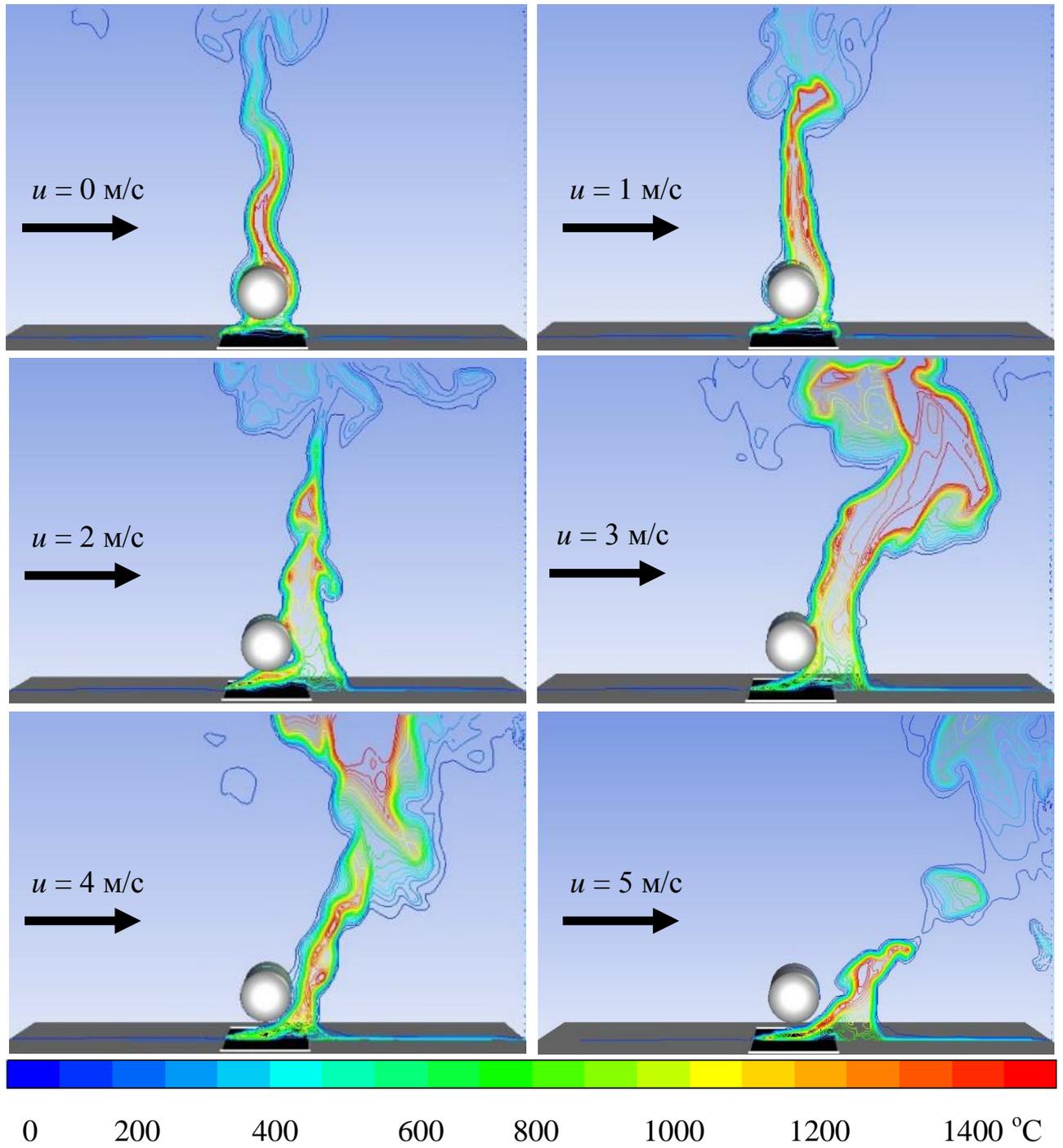


Рисунок 2.17 – Контурные мгновенные разрешенные температур в плоскости симметрии при различных скоростях ветра

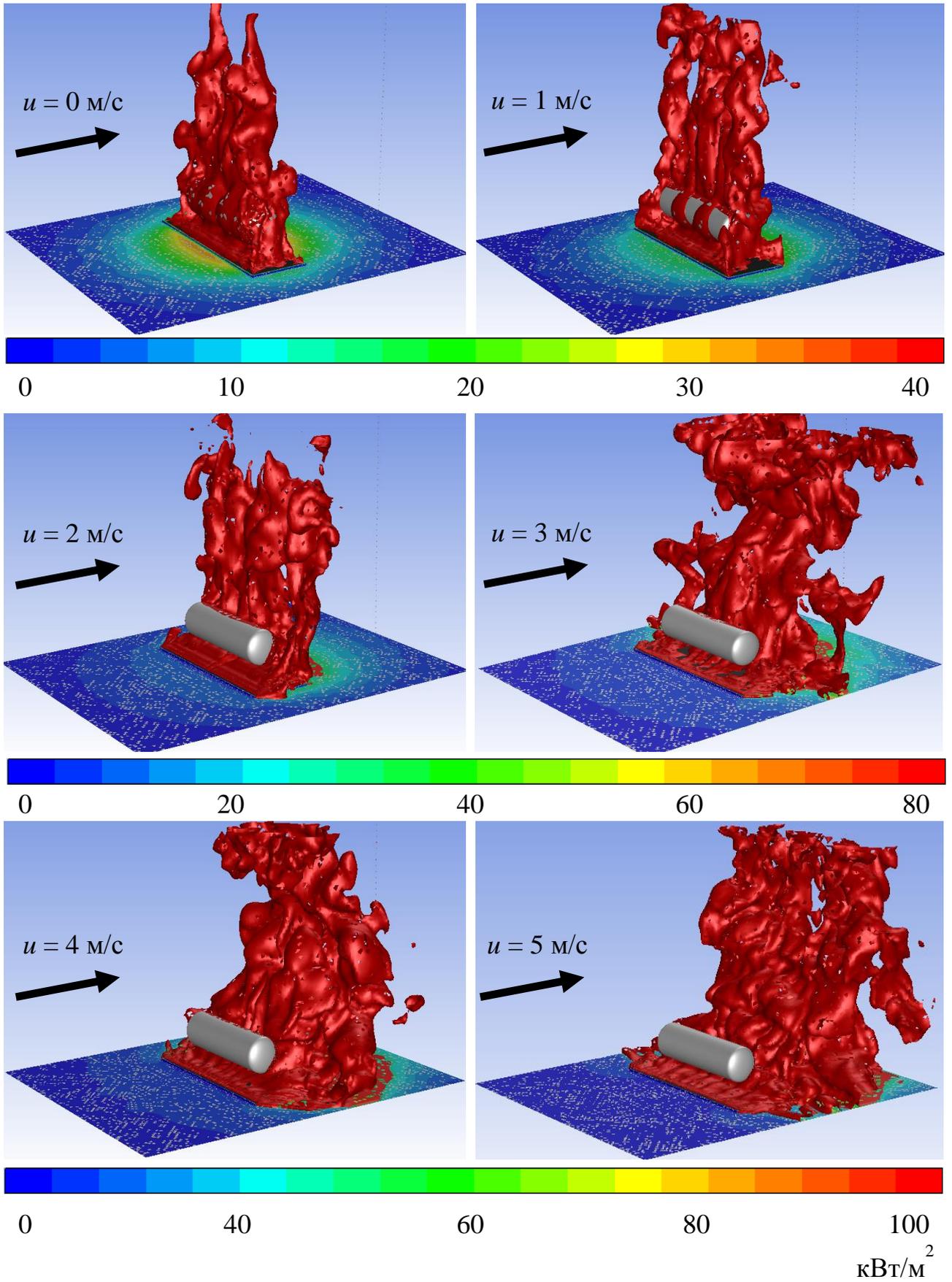


Рисунок 2.18 – Изоповерхности температуры и распределение плотности лучистого потока на уровне земли при различных скоростях ветра

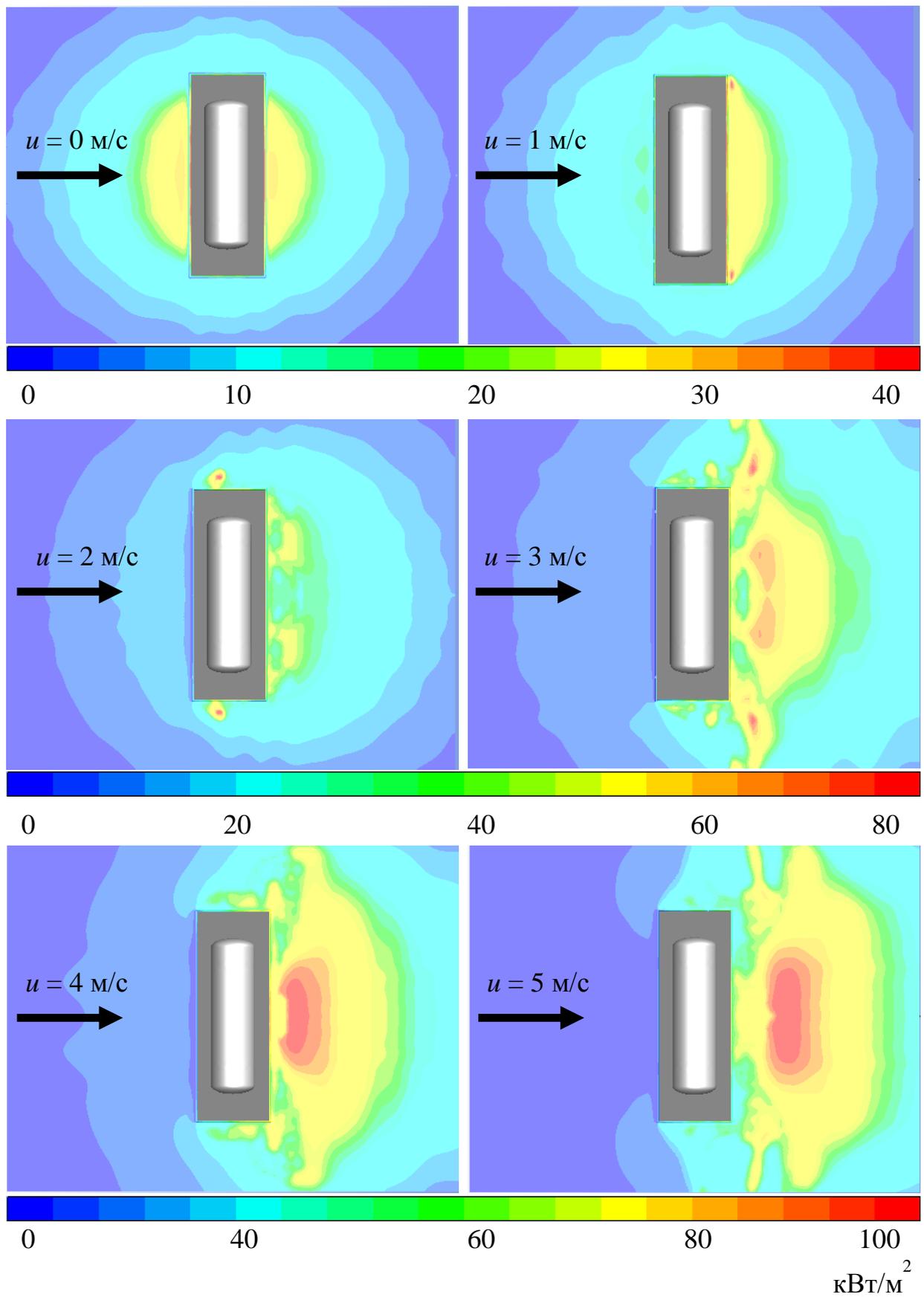


Рисунок 2.19 – Распределение плотности лучистого потока на уровне земли при различных скоростях ветра

Контуры светящейся зоны пламени, изображенные на рисунке 2.18, идентифицированы по изоповерхности с температурной 850 К [102]. На рисунках 2.18 и 2.19 представлено распределение плотности лучистого потока на уровне земли.

Полученная номограмма для определения средних значений плотности лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону водопленочного защитного экрана (ВПЭ), расположенного на пожарной вышке на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ, в зависимости от высоты при различных скоростях ветра изображена на рисунке 2.20 [83], [84].

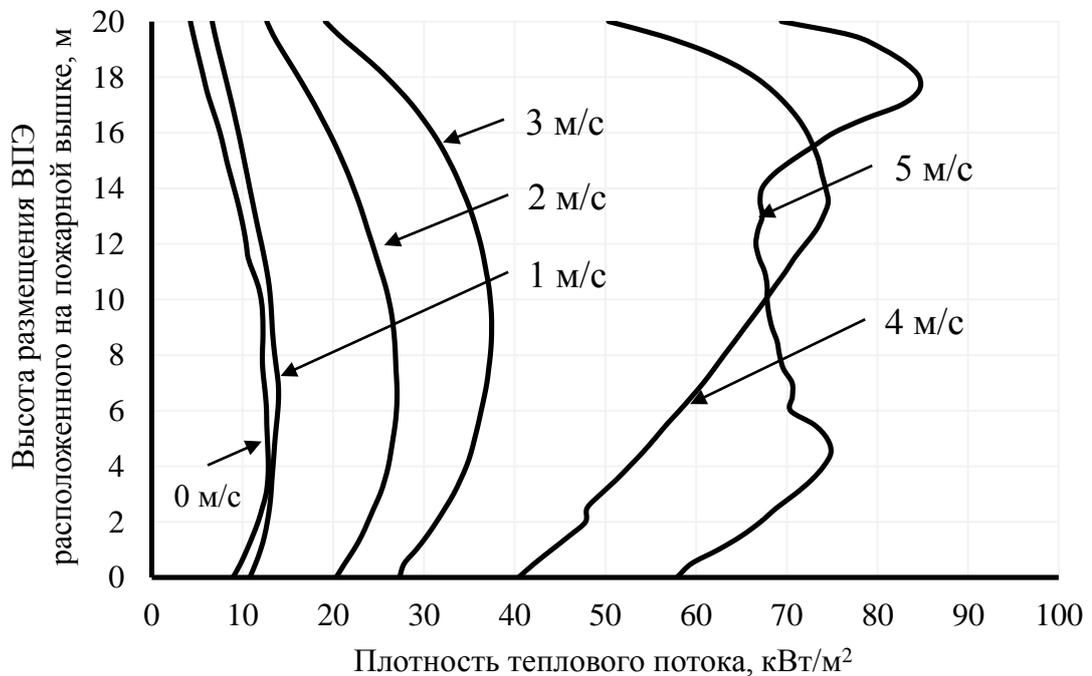


Рисунок 2.20 – Номограмма для определения средних значений плотности лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону ВПЭ, от высоты при различных скоростях ветра

Анализ результатов моделирования позволил установить, что при скоростях ветра 4 м/с и более возможно образование отрывных вихрей пламени, способных достигнуть пожарной вышки, расположенной на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ, а плотность лучистого потока в месте размещения ствольщика на пожарной вышке при этом может превышать 60 кВт/м².

Следует отметить, что использование пожарной вышки, расположенной с подветренной стороны напротив очага пожара при указанных скоростях ветра, не представляется возможным. В этом случае для охлаждения ЖДЦ необходимо использовать соседние пожарные вышки, поскольку в соответствии с СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности» для орошения каждой точки СНЭ должно быть предусмотрено не менее двух лафетных стволов [35].

Таким образом, ВПЭ, устанавливаемые на пожарных вышках СНЭ объектов нефтепродуктообеспечения на расстоянии не менее 15 м от железнодорожных путей, должны быть рассчитаны на плотность лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, не менее 60 кВт/м^2 при условии обеспечения снижения указанной плотности до допустимых значений – не более 5 кВт/м^2 на ствольщика, расположенного за экраном, в специальной защитной одежде пожарного.

ГЛАВА 3 ВОДОПЛЕНОЧНЫЙ ЗАЩИТНЫЙ ЭКРАН

3.1 Обзор теплозащитных экранов, устанавливаемых на пожарных вышках железнодорожных сливноналивных эстакад

Анализ результатов численного моделирования пожара пролива бензина на сливноналивной железнодорожной эстакаде показал, что защита ствольщика на пожарной вышке от теплового излучения пламени является актуальной задачей.

Одним из наиболее эффективных способов снижения тепловых потоков при пожаре на объектах нефтепродуктообеспечения является применение теплозащитных экранов [110]–[113].

В настоящее время для снижения плотности теплового потока, падающего на ствольщика, применяются теплозащитные сетчатые экраны, представленные на рисунке 3.1 [110], [113]–[120].

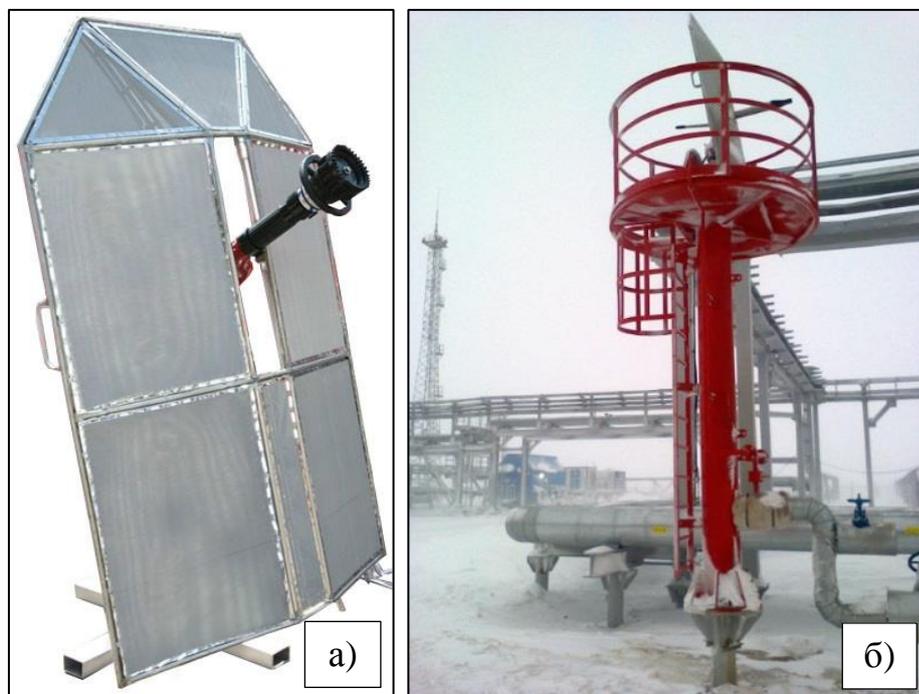


Рисунок 3.1 – Модель теплозащитного сетчатого экрана «Согда» 2А:

а – общий вид; б – размещение экрана на пожарной вышке

Указанный экран состоит из двух сеток, выполненных из нержавеющей стали с размером квадратного отверстия ячейки сетки $0,4 \times 0,4$ мм. В пространство между сетчатыми панелями экрана подается вода, распыляемая форсункой. 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 [119].

Форсунки, применяемые для распыла воды, имеют следующие параметры: площадь выходного отверстия – 4 мм^2 ; высота щели – $0,8$ мм. На рисунке 3.2 показаны продольный разрез и сечение плоскоструйной форсунки, предназначенной для образования плоского водяного факела с максимальным углом раскрытия 180° [119].

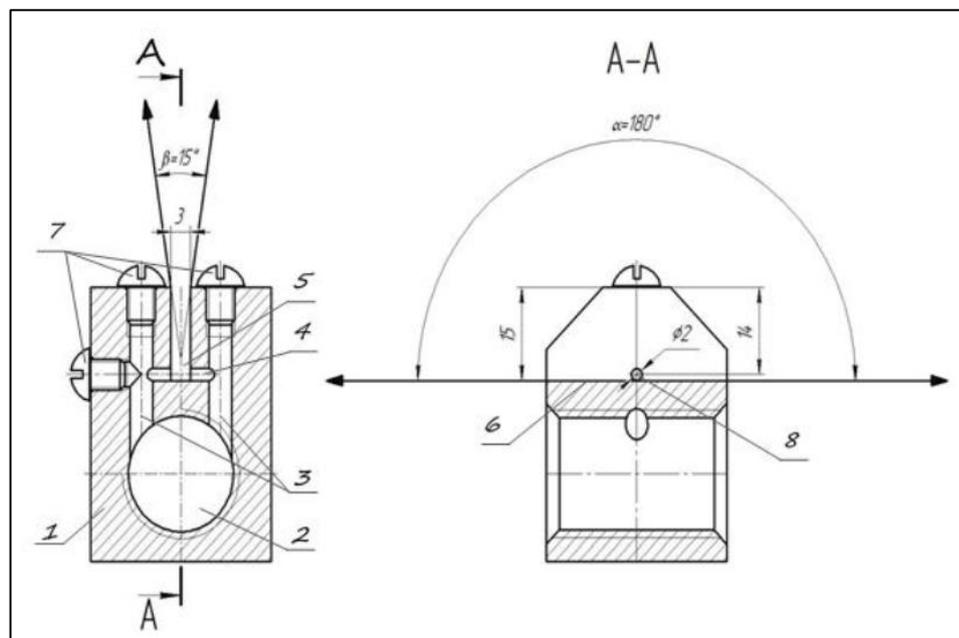


Рисунок 3.2 – Продольный разрез плоскоструйной форсунки и его сечение [119]:

- 1 – корпус форсунки; 2 – магистраль подачи воды; 3 – водоподводящие каналы;
 4 – канал для формирования факела воды; 5 – паз; 6 – плоское дно;
 7 – винты-заглушки; 8 – выходное отверстие канала 4

Корпус форсунки *1* выполнен из алюминиевого деформируемого сплава Д16 в виде параллелепипеда со скошенными гранями в верхней части. В форсунке имеется основная магистраль подачи воды *2*, взаимопараллельные водоподводящие каналы *3*, сообщающиеся с каналом *4* для формирования факела воды, паз *5* с плоским дном *6*. Для обеспечения доступа к каналам *3* и *4* с целью их очистки предусмотрены винты-заглушки *7*. Выходные цилиндрические отверстия *8*, образованные пересечением паза *5* с каналом *4*, расположены на одной оси напротив друг друга [119].

Принцип работы форсунки заключается в следующем (рисунок 3.3). 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* [119].

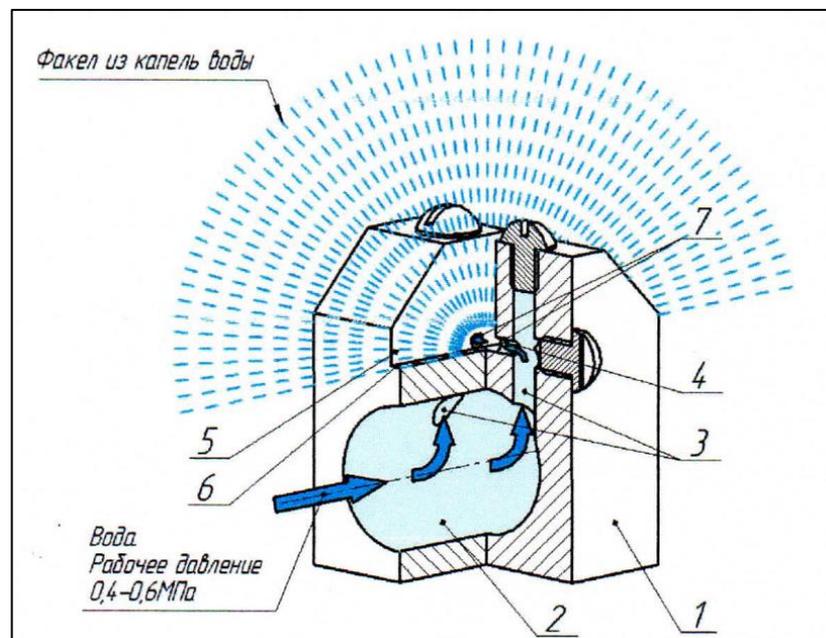


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема работы плоскоструйной форсунки [119]:

1 – корпус форсунки; *2* – магистраль подачи воды; *3* – водоподводящие каналы;

4 – канал для формирования факела воды; *5* – паз; *6* – плоское дно;

7 – винты-заглушки; *8* – выходное отверстие канала *4*

В работе [119] указывается, что эксплуатация экранов в естественных условиях предполагает воздействие на них различных внешних факторов, в том числе и атмосферных осадков. В частности, воздействие пыли и воды может привести к тому, что при длительном неиспользовании защитных экранов, распыливающие каналы и сопла форсунок могут забиваться грязью, что приведет к ухудшению или полному прекращению распыления воды форсунками при экстренной подаче воды в контур.

В этой связи возникает необходимость в защитном устройстве для каждой форсунки с целью предохранения ее каналов от воздействий внешних факторов в нерабочем состоянии, с возможностью легкого устранения этих устройств с корпуса форсунки при подаче воды в контур под давлением порядка 2 атм. Для этой цели автором предлагается использовать защитный колпачок в виде полукольца из легкого эластичного материала, например, капрона [119].

Недостатком рассмотренного экрана является возможность засорения форсунок продуктами коррозии трубопроводов системы противопожарного водоснабжения и другими механическими примесями при подаче воды на тушение пожара. Кроме того, после работы экрана в условиях отрицательных температур могут возникнуть трудности, связанные с удалением воды из форсунок и распыливающих каналов. Достоинством указанного экрана является низкий расход воды (около 0,4 л/с для модели экрана «Согда» 2А) при высоком значении коэффициента ослабления теплового потока (согласно данным производителя не менее чем в 50 раз) [120].

В патенте [121] представлена конструкция защитного экрана пожарного лафетного ствола. Защитный экран изготовлен из двух листов металла 1 и 3, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом 2 (например, асбестом), и имеет проем 5, предназначенный для ствола монитора (рисунок 3.4). Фронтальная I (обращенная к пламени) и боковые плоскости II экрана покрыты цинком, керамическим составом или другим материалом для защиты от теплового излучения. Для удобства управления лафетным стволом

в защитном экране предусматривается смотровое окно 4 прямоугольной формы с термоустойчивым стеклом, обладающим теплоотражающим эффектом.

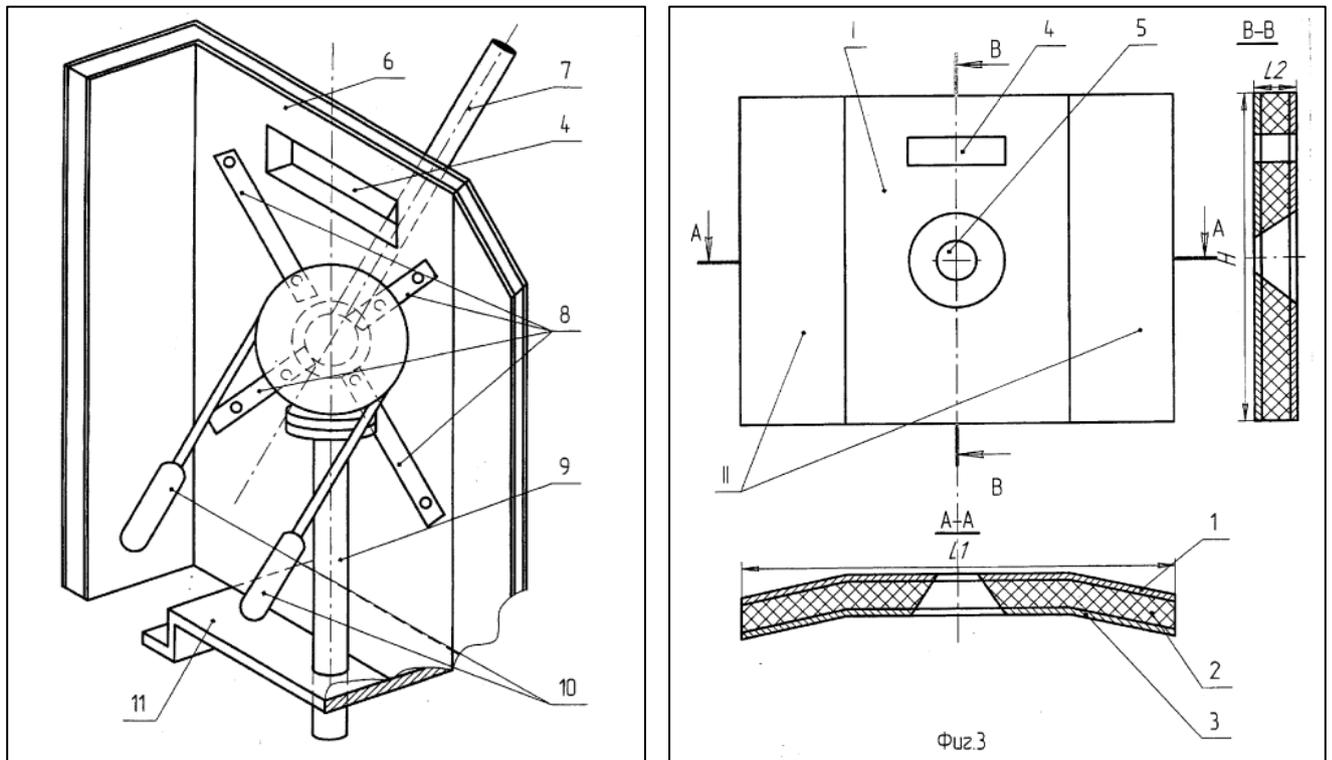


Рисунок 3.4 – Защитный экран пожарного лафетного ствола [121]:

1 – металлический лист; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – металлический лист; 4 – смотровое окно; 5 – проем; 6 – крепление защитного экрана; 7 – лафетный ствол; 8 – металлические тяги; 9 – трубопровод лафетного ствола; 10 – рукоять; 11 – неподвижное основание

Необходимо отметить, что рассмотренный экран уступает по эффективности водопленочным защитным экранам, поскольку при воздействии теплового излучения вода обеспечивает непрерывное охлаждение этих экранов за счет отвода тепла от их конструктивных элементов. Также необходимо учитывать, что при воздействии атмосферных осадков и огнетушащего вещества возможно нарушение структуры волокон асбеста, что приведет к его размягчению и снижению эксплуатационных характеристик.

Сведения об экранах иного конструктивного исполнения, устанавливаемых на пожарных вышках железнодорожных сливноналивных эстакад, в литературных источниках отсутствуют.

В связи с вышеизложенным возникла необходимость разработки водоупорного защитного экрана [122], отличающегося простотой и надежностью конструкции, повышенной защитой от разрушения при применении в условиях отрицательных температур наружного воздуха и дополнительной защитой проема для лафетного ствола.

3.2 Предлагаемая конструкция водоупорного защитного экрана

Совместно со специалистами общества с ограниченной ответственностью «Пожнефтехим – Проект» был разработан опытный образец ВПЭ, который крепится к трубопроводу лафетного ствола пожарной вышки [141].

ВПЭ представляет собой изогнутый щит *1* (рисунок 3.5) из нержавеющей стали, в верхней части которого предусмотрен перфорированный трубопровод *2* для создания на обогреваемой поверхности щита сплошной водяной пленки. В щите имеется окно *3* для лафетного ствола. Указанное окно оборудовано заслонкой *4*, предназначенной для защиты ствольщика от теплового потока при изменении угла наклона лафетного ствола. Подача воды в перфорированный трубопровод осуществляется от трубопровода лафетного ствола *5* через тройник *6* с помощью двух гибких шлангов в металлической оплетке *7*. Для регулировки расхода воды, подаваемой в гибкие шланги, используется шаровый кран *8*.

Для изготовления щита была выбрана сталь марки 12Х18Н10Т, характеристики которой представлены в таблице 3.1 [123].

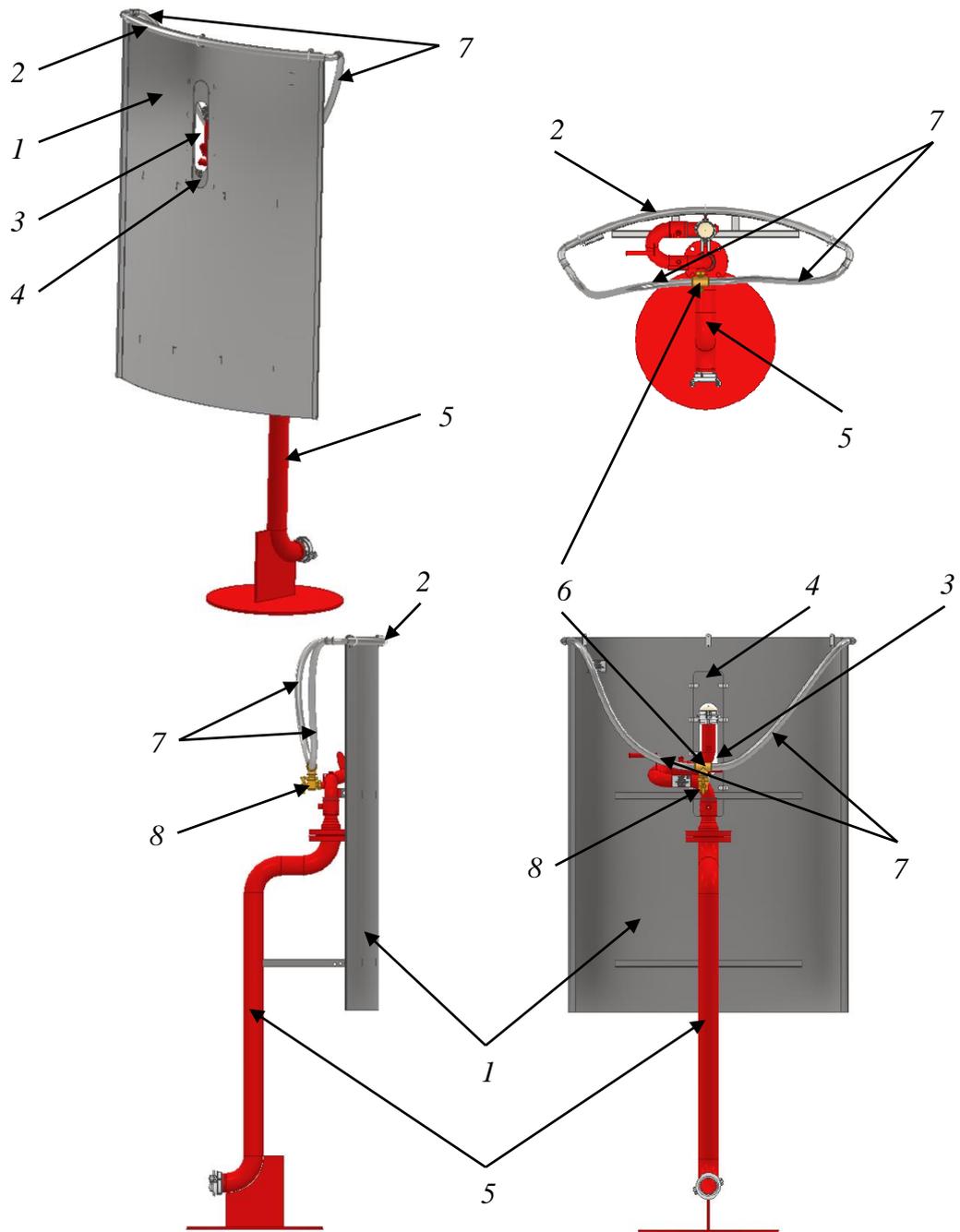


Рисунок 3.5 – Водопленочный защитный экран:

1 – щит из нержавеющей стали; 2 – перфорированный трубопровод;

3 – окно для размещения лафетного ствола; 4 – заслонка;

5 – трубопровод лафетного ствола; 6 – тройник;

7 – гибкие шланги в металлической оплетке; 8 – шаровой кран

Таблица 3.1 – Характеристики стали марки 12X18H10T

Параметр	Значение
Класс	Сталь конструкционная криогенная
Использование в промышленности	Детали, работающие до 600 °С. Сварные аппараты и сосуды, работающие в разбавленных растворах азотной, уксусной, фосфорной кислот, растворах щелочей и солей и другие детали, работающие под давлением при температуре от минус 196 до 600 °С, а при наличии агрессивных сред до 350 °С; При непрерывной работе стали устойчивы против окисления на воздухе и в атмосфере продуктов сгорания топлива при температуре до 900 °С и при работе в условиях теплосмен до 800 °С.
Удельный вес, кг/м ³	7920
Жаростойкость	в воздухе: при $t = 650$ °С 2-3 группа стойкости, при $t = 750$ °С 4-5 группа стойкости

Геометрические параметры щита подбирались с учетом эргономических особенностей работы ствольщика с лафетным стволом и представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Геометрические параметры щита

Геометрический параметр щита	Значение, мм
Высота	1650
Ширина	1250
Радиус закругления	1200
Толщина	2

3.3 Экспериментальное определение параметров водоупорного защитного экрана

При проведении гидравлических испытаний производился выбор оптимальной схемы подачи воды в перфорированный трубопровод, определялись его геометрические параметры, включая количество отверстий и их размеры,

а также находились значения расхода и давления воды, необходимые для создания сплошной устойчивой пленки на поверхности щита. Для измерения давления в системе на гибком шланге устанавливался манометр ТМ5 1-го класса точности [138]. Расход воды, подаваемой на поверхность щита, регистрировался электромагнитным ротаметром *EMF 300E* с погрешностью измерений $\pm 2\%$ (рисунок 3.6).

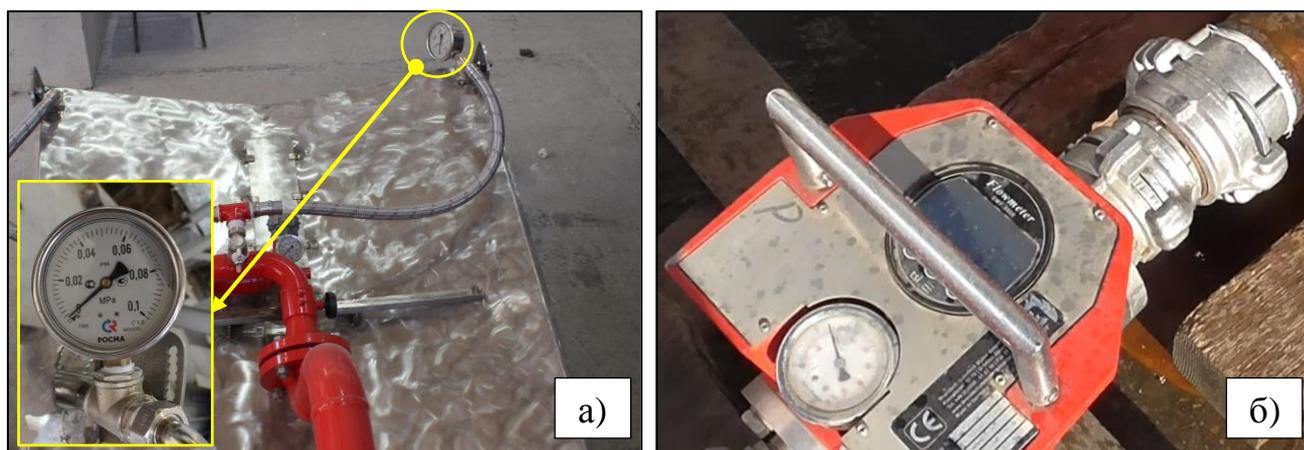


Рисунок 3.6 – Измерительное оборудование для проведения гидравлических испытаний:

а – манометр ТМ5; б – электромагнитный ротаметр *EMF 300E*

Типичная картина течения водяной пленки по поверхности щита представлена рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Пленочное течение воды на поверхности щита

Результаты гидравлических испытаний ВПЭ приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Гидравлические параметры ВПЭ

Наименование параметра	Значение
Схема подачи воды в перфорированный трубопровод	двухсторонняя (рисунок 3.5)
Диаметр перфорированного трубопровода, мм	33
Количество отверстий перфорированного трубопровода	70
Диаметр отверстий перфорированного трубопровода, мм	4
Рабочее давление на входе в перфорированный трубопровод, МПа	0,02-0,05
Диапазон рабочих расходов перфорированного трубопровода, л/с	1,0-1,5
Средняя скорость течения воды по поверхности щита, м/с	1,4

В связи с тем, что при скоростях ветра 4 м/с и более использование пожарной вышки, расположенной с наветренной стороны напротив очага пожара, не представляется возможным, были проведены качественные эксперименты по изучению ветрового воздействия на пленочное течение воды при скорости ветра, равной 5 м/с. Для создания стационарного ветрового воздействия была изготовлена специальная установка, которая представляет собой цилиндрический воздуховод 1 с установленным вентилятором 2 и хонейкомбом 3 (диаметр ячейки – 12 мм, ширина ячейки – 100 мм), предназначенным для разрушения крупных вихрей и стабилизации турбулентного потока, создаваемого вентилятором [139] (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Установка для создания стационарного ветрового воздействия:

1 – цилиндрический воздуховод; 2 – вентилятор; 3 – хонейкомб

Скорость движения воздуха у экрана измерялась электронным анемометром ТК ПКМ (рисунок 3.9) и путем подбора частоты вращения рабочего колеса вентилятора устанавливалась равной 5 м/с. Основная абсолютная погрешность измерений скорости движения воздуха v анемометра ТК ПКМ в диапазоне от 1 до 20 м/с равна $\pm (0,1 + 0,05 \cdot v)$ м/с [142].

Взаимное расположение установки для создания ветрового воздействия и ВПЭ при проведении экспериментов представлено на рисунке 3.10.

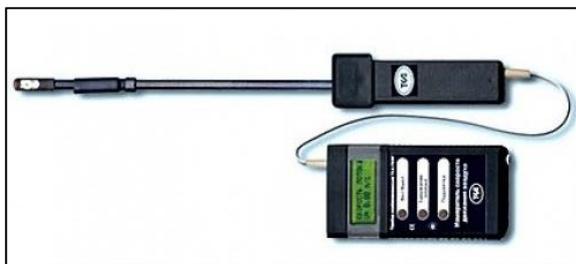


Рисунок 3.9 – Анемометр ТКА-ПКМ (50)

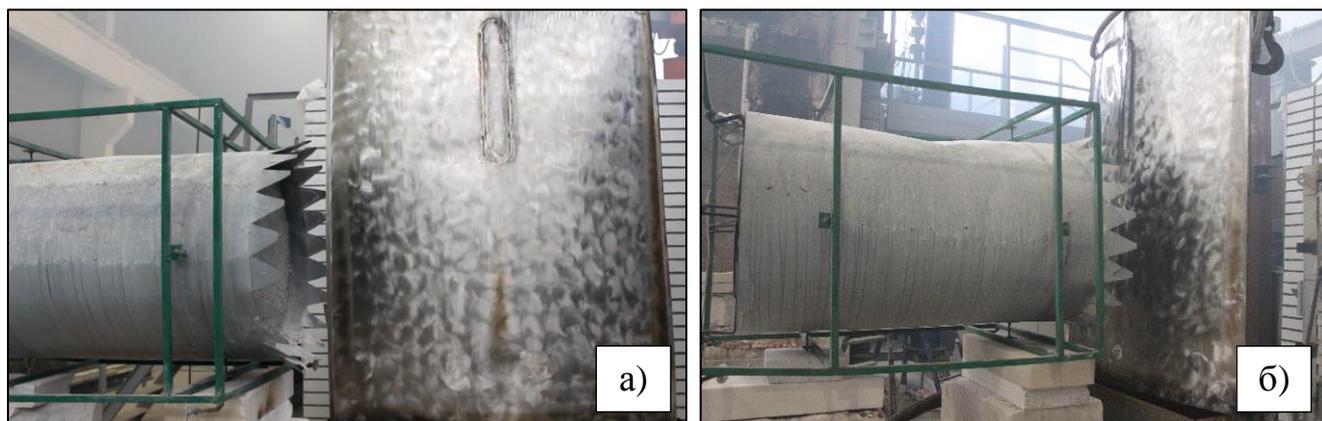


Рисунок 3.10 – Расположение установки для создания ветрового воздействия и ВПЭ: а – поперечное; б – фронтальное

Результаты экспериментов показали, что движение воздуха со скоростью 5 м/с не оказывает влияние на пленочное течение воды по поверхности щита ВПЭ.

С целью определения возможности применения ВПЭ на СНЭ объектов нефтепродуктообеспечения были проведены огневые испытания экрана в лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета [131], [132]. Необходимо отметить, что при проведении испытаний использовалось поверенное измерительное оборудование.

Создание теплового потока, падающего на ВПЭ, обеспечивалось в вертикальной огневой печи для испытания строительных конструкций на огнестойкость (далее – огневая печь) (рисунок 3.11) [125]. Выбор огневой печи для проведения испытаний был обусловлен возможностью регулировки плотности теплового потока, падающего на обогреваемую поверхность щита, путем изменения расхода природного газа, подаваемого на горелки. Кроме того, использование в качестве нагревательных элементов газовых горелок исключало крупномасштабные турбулентные пульсации пламени, характерные для пожара пролива нефтепродуктов, что позволяло обеспечить стационарность тепловых потоков в огневой печи [126], [127].

Для измерения температуры во внутреннем пространстве печи применялись кабельные термоэлектрические преобразователи (ТЭП) КТХА 0.2.02-938-к1-Н-Т310-3-2200/2000 первого класса точности с диапазоном измерения температуры от минус 40 до 1100°С [138].

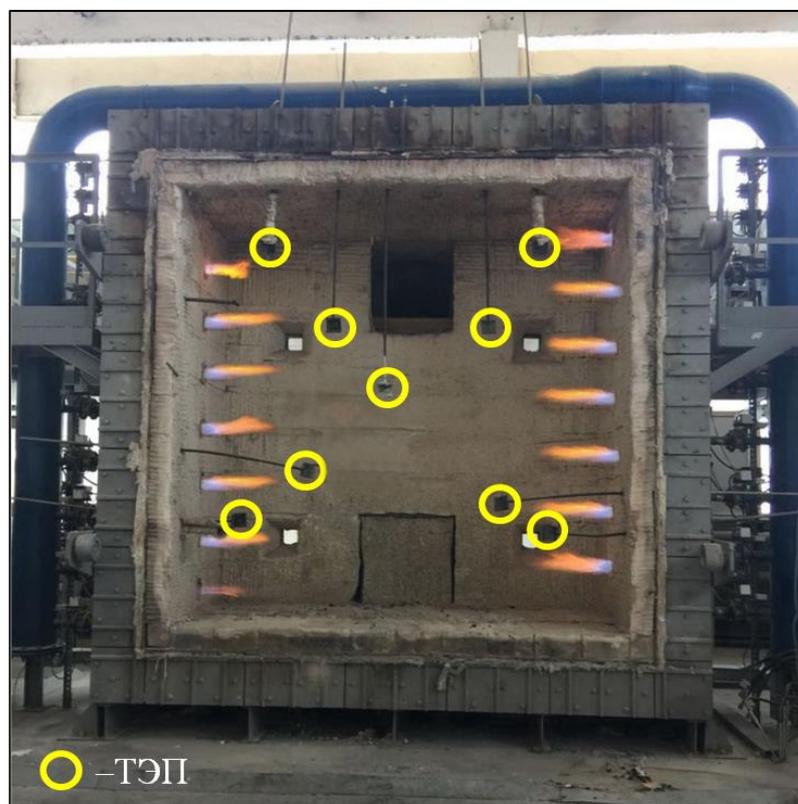


Рисунок 3.11 – Внутреннее пространство огневой печи:
размещение ТЭП и работа газовых горелок

С целью создания температурного режима, необходимого для равномерного нагрева стен печи, ее внутреннее пространство закрывалось ограждающей конструкцией из пенобетонных блоков, в проем которой устанавливался ВПЭ (рисунок 3.12).

Для имитации пожара в открытом пространстве между краями экрана и границей проема ограждающей конструкции предусматривался зазор шириной 10 см, который обеспечивал перенос тепла за ВПЭ в результате конвективных течений продуктов сгорания. Указанный зазор позволил создать наиболее жесткие условия проведения эксперимента, так как температура в огневом пространстве печи при падающем тепловом потоке на обогреваемую поверхность экрана, равном 100 кВт/м^2 , превышала $800 \text{ }^\circ\text{C}$.

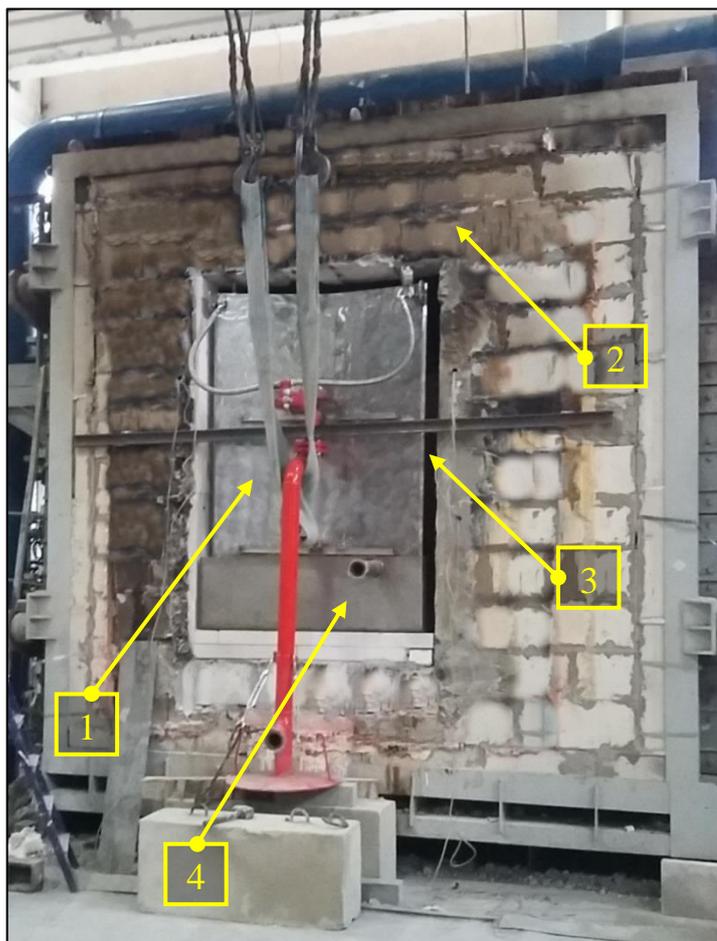


Рисунок 3.12 – Монтаж ВПЭ в проем ограждающей конструкции огневой печи:

1 – ВПЭ; 2 – ограждающая конструкция;

3 – зазор шириной 10 см; 4 – противень для сбора воды

Подача воды в трубопровод лафетного ствола осуществлялась через рукавную линию от переносной мотопомпы. При проведении огневых испытаний вместо лафетного ствола устанавливалась заглушка, а окно для его размещения полностью закрывалось заслонкой. Регулировкой производительности мотопомпы подбирался расход, равный 1,25 л/с, который обеспечивал с помощью перфорированного трубопровода создание сплошной водяной пленки на обогреваемой поверхности щита.

Для сбора воды, стекающей со щита, в проеме ограждающей конструкции был установлен противень с быстроразъемным соединением (рисунок 3.12), от которого вода через рукавную линию отводилась в канализацию.

При проведении огневых испытаний для измерения плотности теплового потока применялись приемники теплового потока (ПТП) ПТП-2001 с диапазоном измерения от 1 до 100 кВт/м², чувствительностью от 82 до 94 (мкВ·м²)/кВт и погрешностью измерений $\pm 4,8$ % [136].

Для регистрации теплового потока, падающего на обогреваемую сторону ВПЭ, в ограждающей конструкции по периметру проема были просверлены четыре сквозных отверстия, в которые устанавливались ПТП и крепились так, чтобы принимающая поверхность приемника лежала в одной плоскости с внутренней поверхностью ограждающей конструкции. Для регистрации теплового потока с необогреваемой стороны ВПЭ ПТП устанавливались на штативе на расстоянии 0,5 м от щита. Указанное расстояние было принято исходя из позиции ствольщика на пожарной вышке при работе с лафетным стволом.

Для регистрации температуры необогреваемой поверхности щита применялись кабельные ТЭП КТХА 0.2.02-937-к1-О-С321-3-500/500 первого класса точности с диапазоном измерения от минус 40 до 500 °С [138], которые были закреплены с помощью термостойкого скотча.

Схема установки ПТП и ТЭП представлена на рисунке 3.13.

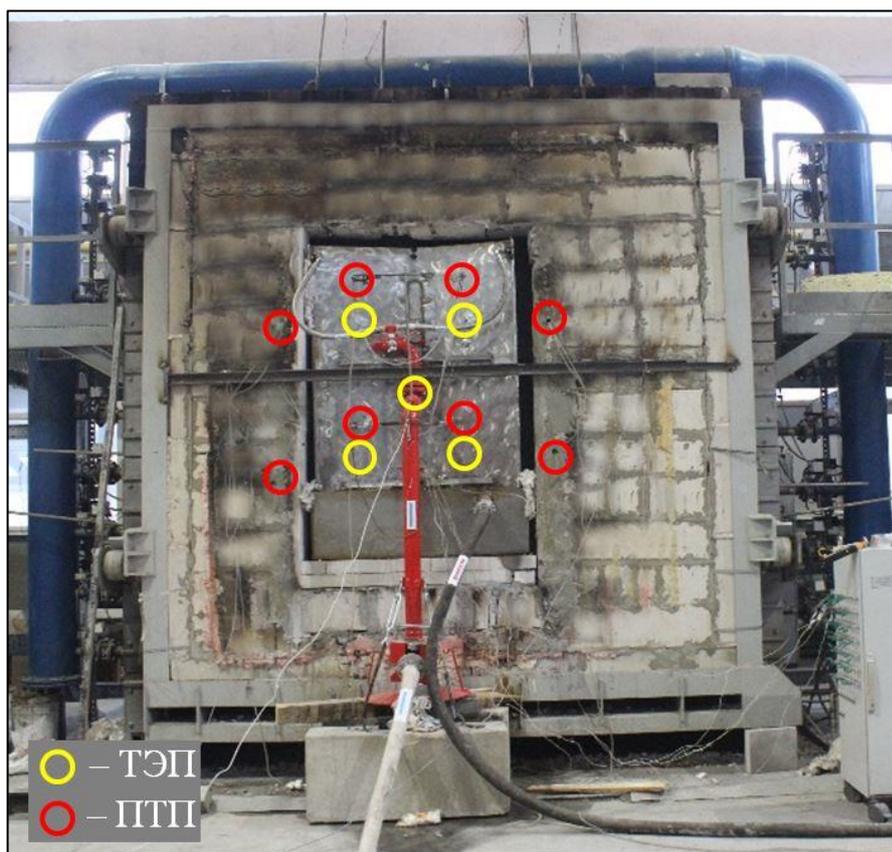


Рисунок 3.13 – Схема установки ПТП и ТЭП

Таким образом, все датчики, используемые при проведении огневых испытаний ВПЭ, в зависимости от их назначения можно разделить на четыре группы (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Группы датчиков в зависимости от их назначения

Название группы	Измеряемый параметр	Кол-во датчиков в группе
ТЭП 1	Температура во внутреннем пространстве печи	9
ТЭП 2	Температура необогреваемой поверхности ВПЭ	5
ПТП 1	Плотность теплового потока, падающего на обогреваемую сторону ВПЭ	4
ПТП 2	Плотность теплового потока, падающего на ствольщика	4

Регистрация сигналов, передаваемых ПТП, осуществлялась с помощью цифровых мультиметров МУ 60 в диапазоне измерения напряжения от 0 до 200 мВ и погрешностью измерений $\pm 0,5 \% \pm 1$ [137].

Регистрация сигналов, передаваемых ТЭП, производилась с помощью щита сбора данных с выводом графиков температуры на монитор компьютера в режиме реального времени.

Размещение измерительного оборудования представлено на рисунке 3.14.

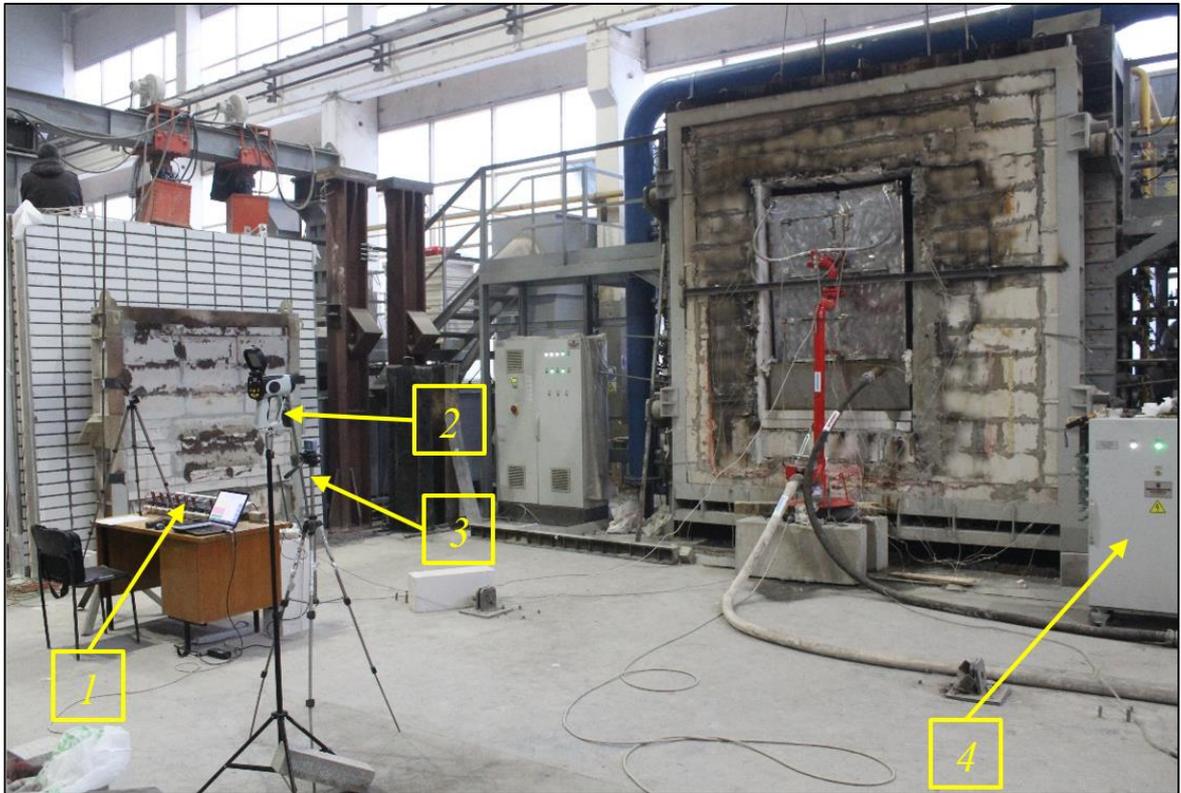


Рисунок 3.14 – Размещение измерительного оборудования:

1 – мультиметры; 2 – тепловизор;

3 – цифровая видеокамера; 4 – щит сбора данных

Испытания проводились при следующих параметрах окружающей среды:

- температура воздуха 10,2 °С;
- атмосферное давление 99,0 кПа;
- относительная влажность воздуха 64 %.

В ходе проведения огневых испытаний мощность горелок последовательно увеличивалась до достижения плотности теплового потока, падающего на обогреваемую поверхность щита, 100 кВт/м^2 , что определялось верхней границей диапазона измерения ПТП. Общее время теплового воздействия на ВПЭ составило 80 мин.

Температурные поля на необогреваемой поверхности экрана регистрировались тепловизором *NEC ThermoTracer TH 7800* с диапазоном измерения температуры от минус 20 до 1000 °С и погрешностью измерения $\pm 2,0 \% \pm 2,0$ °С. Степень черноты поверхности нержавеющей стали 12Х18Н10Т, применяемой для изготовления щита, определялась экспериментально исходя из условия равенства значений температур, полученных в результате измерения тепловизором и ТЭП [128]. Численное значение степени черноты в интервале измеренных температур составило 0,55. Типичная термограмма и оптическое изображение, зарегистрированные тепловизором, представлены на рисунке 3.15.

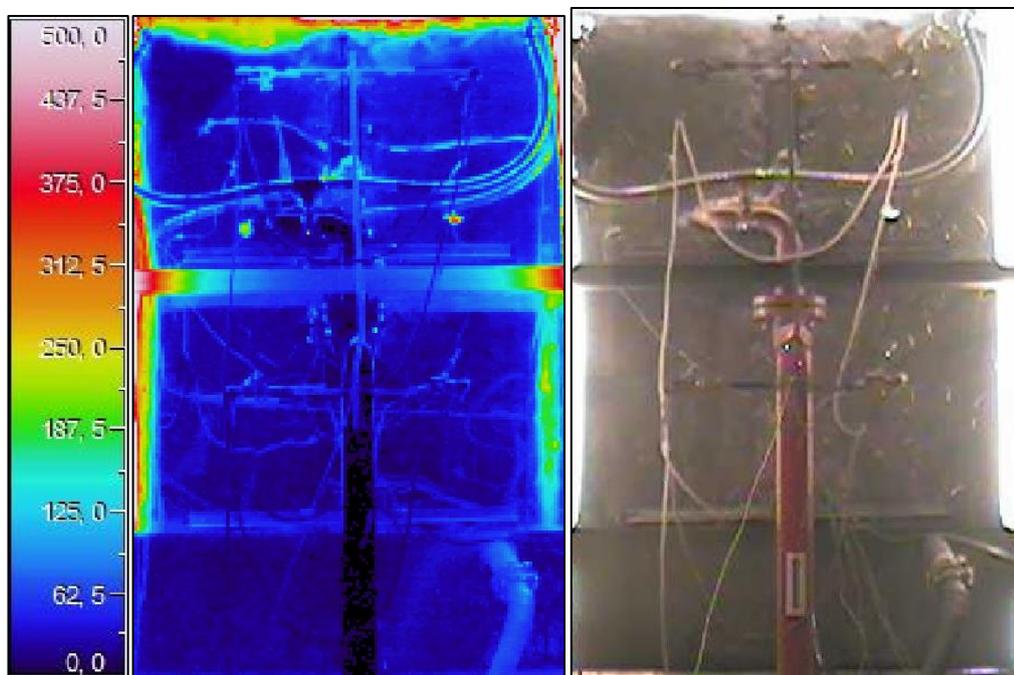


Рисунок 3.15 – Типичная термограмма и оптическое изображение, регистрируемые тепловизором (единицы измерения шкалы температуры, представленной на рисунке, – градусы Цельсия)

График изменения среднеобъемной температуры среды во внутреннем пространстве огневой печи представлен на рисунке 3.16 [129], [131], [132]. Необходимо отметить, что при пожаре пролива нефтепродукта на СНЭ температура газовой среды вблизи ВПЭ будет ниже. Указанное обстоятельство обусловлено тем, что на реальном объекте пожар происходит в открытом пространстве, а зона пламенного горения расположена значительно дальше.

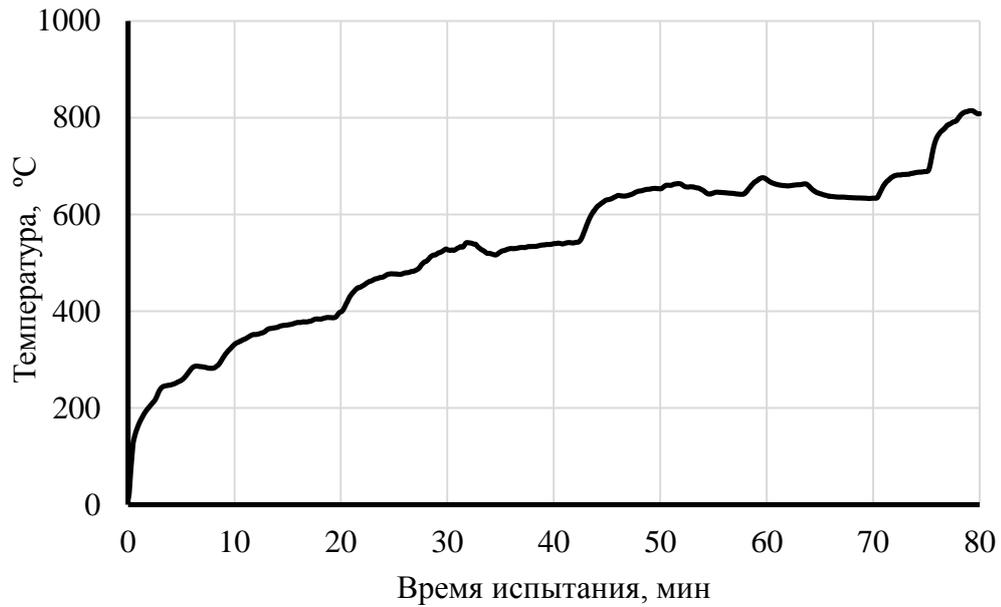


Рисунок 3.16 – Среднеобъемная температура в вертикальной огневой печи при проведении огневых испытаний

Так как для каждой рассматриваемой группы датчиков (таблица 3.2) зависимость их показаний от конкретных мест установки выражалась слабо, было произведено осреднение полученных данных в каждой группе датчиков. Графики зависимости осредненных значений температуры и плотности теплового потока от времени представлены на рисунках 3.17-3.19.

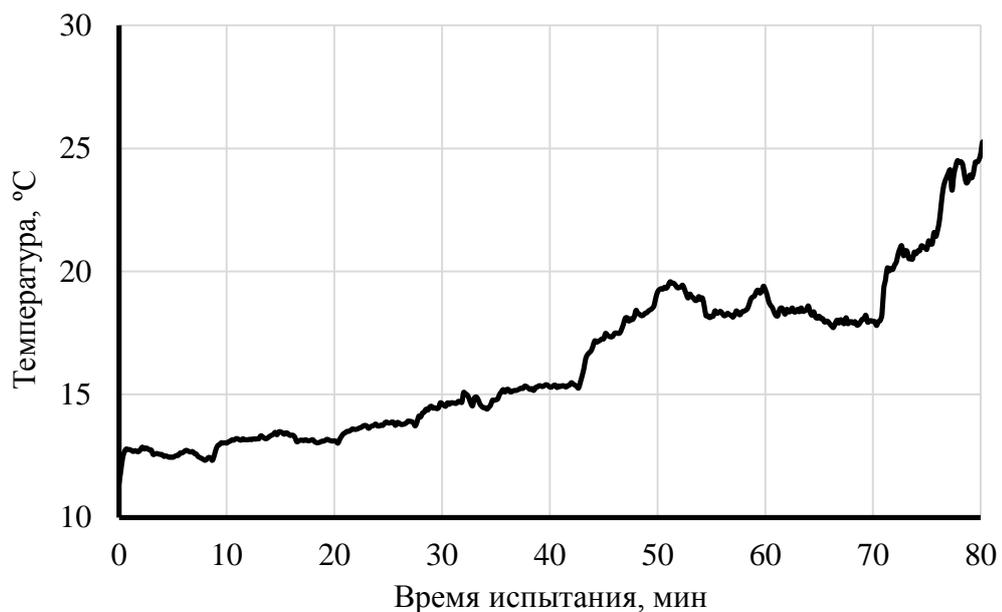


Рисунок 3.17 – Зависимость осредненной температуры необогреваемой поверхности ВПЭ от времени



Рисунок 3.18 – Зависимость осредненной плотности теплового потока, падающего на обогреваемую сторону ВПЭ, от времени

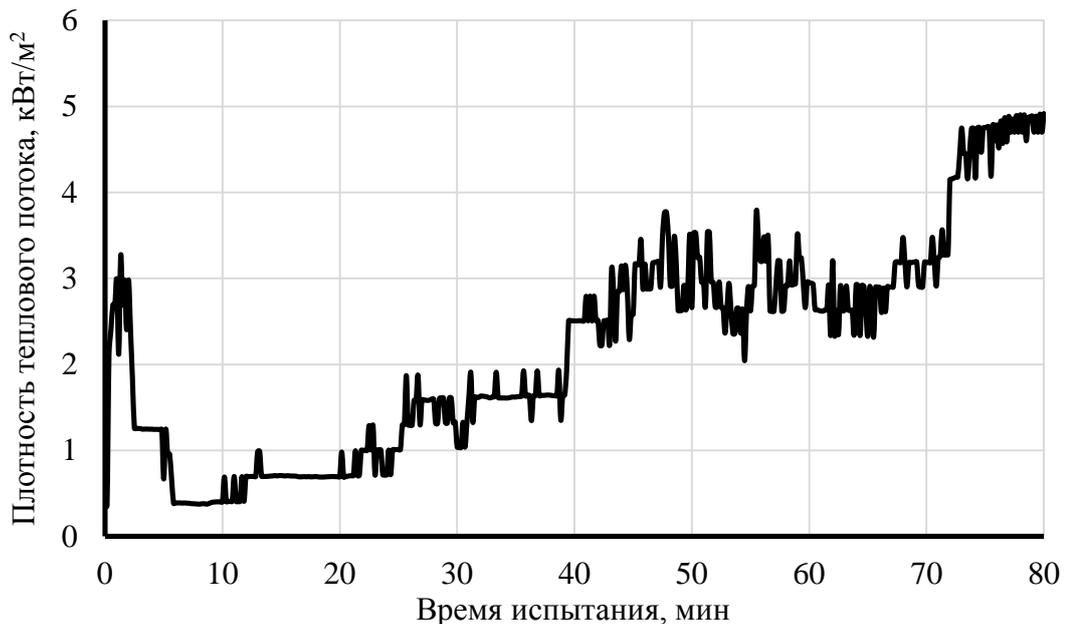


Рисунок 3.19 – Зависимость осредненной плотности теплового потока, падающего на ствольщика, от времени

В связи с тем, что осредненная температура необогреваемой поверхности экрана не превышала $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, а осредненная плотность теплового потока, падающая на ствольщика, достигала 5 кВт/м^2 , было предположено, что значительное влияние на показания приемников теплового потока, расположенных с необогревае-

мой стороны экрана, оказывают нагретые продукты сгорания, поступающие в рабочую зону ствольщика через зазор между краями экрана и границей проема ограждающей конструкции огневой печи.

Для проверки данной гипотезы была определена осредненная плотность теплового потока излучения необогреваемой поверхности экрана по закону Стефана-Больцмана (рисунок 3.20) [130]:

$$E = \varepsilon \sigma_0 T^4, \quad (3.1)$$

где ε – экспериментально определенная степень черноты, 0,55;

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);

T – осредненные значения температуры, полученные группой датчиков ТЭП 2, К.

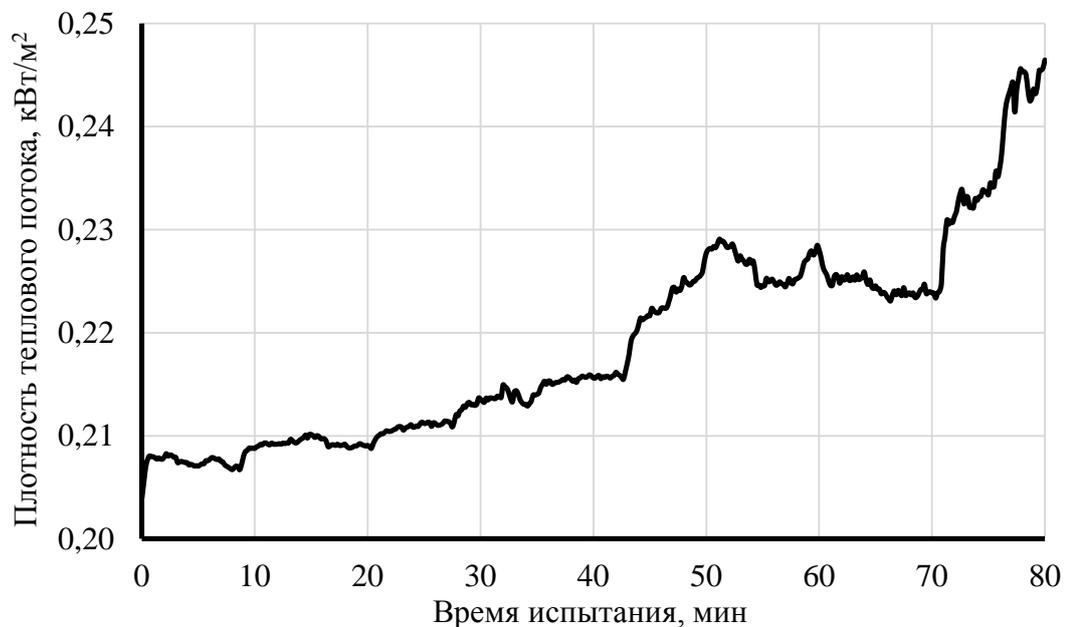


Рисунок 3.20 – Зависимость осредненной плотности теплового потока излучения необогреваемой поверхности экрана от времени

Анализ графиков, представленных на рисунках 3.19 и 3.20, позволил установить, что лучистый тепловой поток от необогреваемой поверхности экрана составляет около 5 % от суммарного теплового потока, падающего на ствольщика.

Основным параметром, характеризующим эффективность работы ВПЭ, является коэффициент ослабления теплового потока, который представляет собой отношение осредненных плотностей теплового потока, падающего на обогреваемую сторону экрана и ствольщика [133]–[135].

Поскольку при пожаре на реальном объекте, например, при порывах ветра, возможен заброс высоконагретых продуктов сгорания в рабочую зону ствольщика, находящегося за экраном на пожарной вышке, было принято решение построить два графика для коэффициента ослабления теплового потока ВПЭ: с учетом конвективного течения продуктов сгорания за экраном и без него (рисунок 3.21) [131].

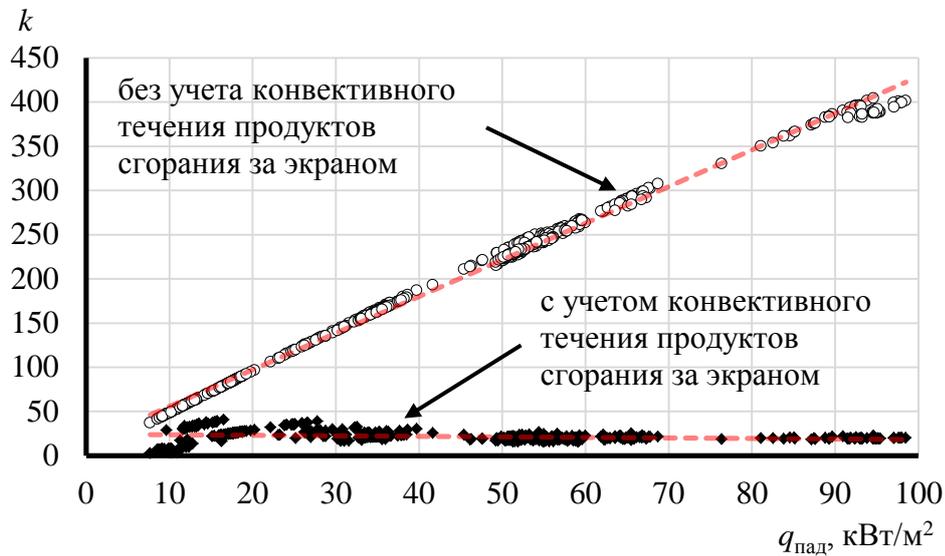


Рисунок 3.21 – Коэффициент ослабления плотности теплового потока

Анализ графиков, представленных на рисунке 3.21, позволил сделать вывод, что коэффициент ослабления теплового потока k в случае отсутствия воздействия конвективных течений высоконагретых продуктов сгорания в рабочей зоне ствольщика пропорционален плотности теплового потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, и описывается формулой (3.2) с величиной достоверности аппроксимации 0,996:

$$k = 4,143q_{пад} + 14,449, \quad (3.2)$$

где $q_{пад}$ – плотность теплового потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, кВт/м².

Коэффициент ослабления теплового потока с учетом воздействия конвективных течений высоконагретых продуктов сгорания практически не зависел от плотности теплового потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, а его среднее арифметическое значение составило 22.

Внешний осмотр экрана, произведенный после завершения огневых испытаний (рисунок 3.22), позволил установить отсутствие деформаций его конструктивных элементов, однако по контуру щита наблюдались цвета побежалости, характеризующие высокий нагрев, обусловленный неустойчивым течением водяной пленки в этих зонах. Необходимо отметить, что размер этих зон был незначительным, а экран при проведении огневых испытаний не утратил свои функциональные свойства.



Рисунок 3.22 – ВПЭ до и после проведения огневых испытаний

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанный ВПЭ соответствует требованиям п. 13.2.15 СП 155.13130.2014, обеспечивает снижение теплового потока не менее чем в 22 раза и может применяться на объектах нефтепродуктообеспечения, где величина теплового потока, падающего на экран, не превышает 100 кВт/м^2 .

3.4 Водопеночный защитный экран – элемент лафетного пожарного комплекса

ВПЭ представляет собой устройство для снижения плотности лучистого теплового потока пламени при пожаре на оператора (ствольщика) или оборудование и предназначен для совместного применения с лафетными стволами и пожарными вышками на СНЭ объектов нефтепродуктообеспечения [141].

Необходимость использования ВПЭ регламентируется требованиями СП 155.13130, СП 231.1311500.2015, СП 326.1311500.2017, а также СП «Эстакады сливноналивные для легковоспламеняющихся, горючих жидкостей и сжиженных углеводородных газов на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Требования пожарной безопасности» (находится на стадии утверждения).

Технические характеристики экранов модификаций ВПЭ-ВР (III) и ВПЭ-ВР (VII) представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Технические характеристики ВПЭ

Наименование параметра	Значение	
	ВПЭ-ВР (III)	ВПЭ-ВР (VII)
Диапазон рабочих расходов, л/с	1,0-1,5	
Интенсивность теплового излучения за экраном при воздействии теплового потока со стороны водяной завесы 100 кВт/м ² не более	5	
Масса ВПЭ, кг	50	
Ветровая нагрузка, кгс/м ² , не более/ скорость ветра, м/с, не более	38/25,2	85/37,7
Срок службы, лет, не менее	10	

Изображения серийного образца ВПЭ приведены на рисунке 3.23.



Рисунок 3.23 – Водопленочный экран, представленный на выставке в рамках научно-практической конференции «Развитие Российской пожарной охраны: история, перспективы, цифровизация»

Лафетный пожарный комплекс (ЛПК) [144] состоит из лафетного пожарного ствола (ЛС), пожарной вышки универсальной (ПВУ) и водопленочного защитного экрана (ВПЭ) (рисунок 3.24).

ЛПК предназначен для подачи огнетушащих веществ на большие расстояния для тушения или водяного охлаждения защищаемых объектов. При этом ЛПК должен обеспечить работу ствольщика или защиту лафетного ствола с дистанционным управлением (ЛСД) при пожаре на СНЭ.

На входе ЛПК рекомендуется устанавливать пожарный фильтр универсальный (ПФУ) с узлом для технического обслуживания, а также дозатор пожарный напорный типа ДПН-С при применении лафетного пожарного ствола типа ЛС-СУ [141]–[143].

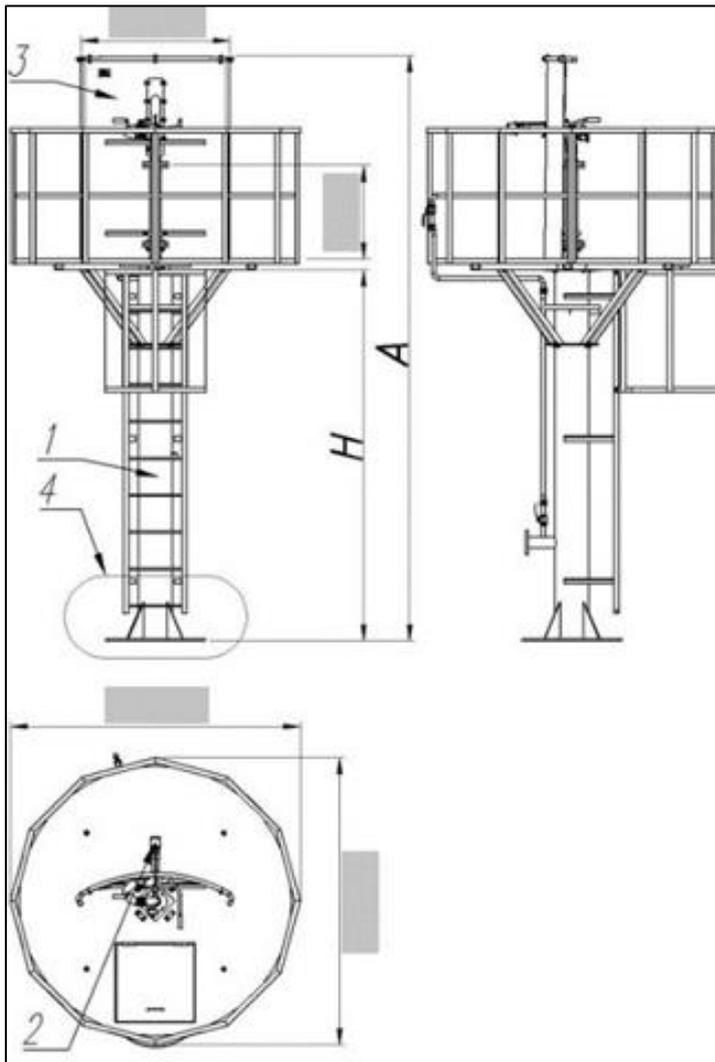


Рисунок 3.24 – ЛПК

для одного ствола:

1 – ПВУ для одного ствола;

2 – ЛС; 3 – ВПЭ;

4 – основание ЛПК

ПФУ представляет собой устройство для фильтрации воды, пенообразователей, растворов пенообразователей и других жидкостей. Основным элементом предотвращающим загрязнение является фильтрующий элемент с размером ячеек сетки 1×1 мм. ПФУ предназначен для защиты от засорения противопожарного оборудования (генераторов пены, водяных стволов, оросителей, дозирующих устройств, лафетных стволов и т.д.) при подаче огнетушащих веществ в зоны горения. Предотвращает выход из строя в период эксплуатации стационарных установок пожаротушения, водяного охлаждения (орошения), водяных завес и др. Кроме того, ПФУ способствуют проведению высокоэффективных пусконаладочных работ по промывке трубопроводов, а также предварительных и приемочных испытаний.

Изображения ЛПК с установленным ВПЭ, а также ПФУ представлены на рисунке 3.25.

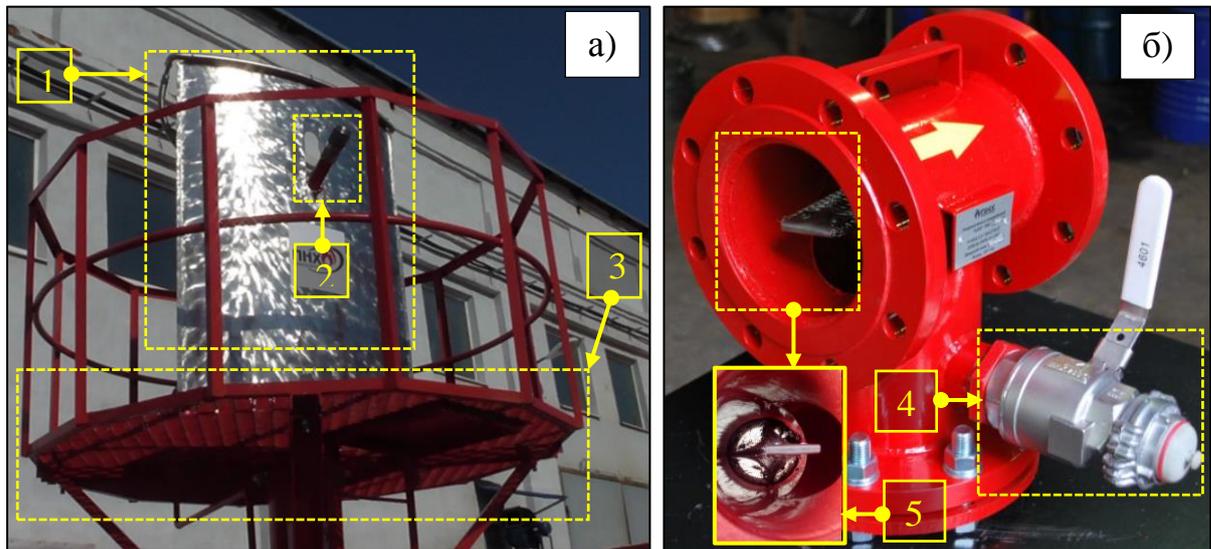


Рисунок 3.25 – Лафетный пожарный комплекс:

а – Общий вид ЛПК; б – ПФУ;

1 – ВПЭ; 2 – лафетный ствол; 3 – ПВУ;

4 – патрубок для промывки от загрязнений; 5 – фильтрующий элемент

Таким образом, водопленочный защитный экран с лафетным стволом и пожарной вышкой образуют лафетный пожарный комплекс, обеспечивающий высокую надежность при работе в условиях длительной эксплуатации, а также в отсутствии своевременного и трудоемкого обслуживания, связанного с удалением продуктов коррозии из трубопроводов системы противопожарного водоснабжения на железнодорожных сливноналивных эстакадах нефти и нефтепродуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ статистических данных и характерных примеров пожаров с участием железнодорожных цистерн с нефтью и нефтепродуктами свидетельствует, что подобного рода пожары продолжают иметь место, а их последствия могут носить катастрофический характер. Отсутствие своевременного охлаждения железнодорожных цистерн, попавших в зону непосредственного воздействия пламени, может привести к их взрыву с образованием огненного шара.

2. Для орошения железнодорожных цистерн требования нормативных документов регламентируют применение стационарных лафетных стволов, устанавливаемых на пожарных вышках на расстоянии не менее 15 м от железнодорожных путей сливноналивной эстакады. Стационарные лафетные стволы рекомендуется оборудовать водоуплочными защитными экранами, обеспечивающими снижение плотности падающего лучистого теплового потока пламени при пожаре на ствольщика (оператора) в специальной защитной одежде пожарного до допустимых значений (не более 5 кВт/м^2). Однако требований к конструктивному исполнению этих экранов и их гидравлическим параметрам в нормативных документах не приводится.

3. Обоснована совокупность моделей вычислительной гидродинамики для определения плотности падающего лучистого теплового потока при пожаре пролива нефтепродуктов, учитывающая ветровое воздействие, влияние пространственного расположения технологического оборудования на параметры процессов горения, а также форму площади пролива, которая может быть представлена геометрической фигурой произвольной конфигурации. Для решения данной задачи предлагается использовать: модель турбулентности *DES (Detached Eddy Simulation)*; модель горения *Eddy Dissipation*, модель излучения *Discrete Ordinates* и модель образования сажи *Moss-Brookes*. С целью определения зависимости массовой доли прекурсора сажи от переменной смешения необходимо применять детальные или редуцированные кинетические механизмы горения

преобладающих компонентов нефтепродуктов в воздухе с использованием модели *Steady Diffusion Flamelet*.

4. В результате численного моделирования пожара пролива бензина на сливноналивной железнодорожной эстакаде получена номограмма для определения плотности лучистого теплового потока, падающего на обогреваемую сторону водопленочного защитного экрана, расположенного на пожарной вышке на расстоянии 15 м от железнодорожных путей эстакады, в зависимости от высоты и скорости ветра. Анализ полученных данных позволил установить, что водопленочные защитные экраны, применяемые на железнодорожных сливноналивных эстакадах нефти и нефтепродуктов (за исключением СПГ и СУГ), должны быть рассчитаны на плотность лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, не менее 60 кВт/м^2 при условии обеспечения снижения указанной плотности до допустимых значений – не более 5 кВт/м^2 .

5. Анализ применяемых на сегодняшний день теплозащитных экранов показал, что они обладают рядом недостатков, в связи с чем был разработан опытный образец водопленочного защитного экрана, отличающийся простотой конструкции, повышенной защитой от разрушения при применении в условиях отрицательных температур наружного воздуха и дополнительной защитой проема для стационарного лафетного ствола.

6. Огневые испытания опытного образца водопленочного защитного экрана, проведенные по методике, разработанной с учетом результатов численного моделирования, позволили установить, что он соответствует предъявляемым требованиям, обеспечивает снижение плотности теплового потока не менее чем в 22 раза и может применяться на железнодорожных сливноналивных эстакадах нефти и нефтепродуктов, где величина теплового потока, падающего на экран, не превышает 100 кВт/м^2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российский статистический ежегодник. 2018 [Текст] / Стат. сб. // Росстат. – Р76 М. – 2018. – 694 с.
2. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами [Текст] / О.М. Волков // СПб. Изд.-во Политехн. ун.-та. – 2010. – 398 с.
3. Волков О.М. Пожарная безопасность на предприятиях транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов [Текст] / Волков О.М., Проскураков Г. А. // М.: Недра, 1981. – 256 с.
4. Блинов В.И. О влиянии ветра на скорость выгорания и распределение температуры в нефтепродуктах, сгорающих в резервуарах [Текст] / Блинов В.И., Худяков Г.Н. // Отчет ЭНИНАНСССР. – 1957. – 22 с.
5. Блинов В.И. О трех режимах горения жидкостей в резервуарах [Текст] / Блинов В.И. // Изв. АН СССР, ОТН. – 1956. – №4. – 115 с.
6. Блинов В.И. О некоторых закономерностях диффузионного горения жидкостей / Блинов В.И., Худяков Г.Н. // ДАН СССР. – 1957. – №5 – С. 1094-1098.
7. Грушевский Б.В. Исследование параметров, влияющих на величину противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями промышленных объектов. Канд. дисс. М.: Высшая школа МВД СССР. – 1969. – 220 с.
8. Измаилов А.С. Противопожарные разрывы на складах легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. Канд. дисс. М.: ВИПТШ МВД СССР. – 1972. – 191 с.
9. Сучков В.П. Распределение падающих тепловых потоков в зоне боевых действий пожарных подразделений при горении нефтепродуктов в резервуарном парке / Сучков В.П., Джумагалиев Р.М., Парцевский В.В. // Сборник трудов. М.: ВИПТШ МВД СССР. – 1990. – С. 80-83.
10. Сливоналивные эстакады для легковоспламеняющихся, горючих жидкостей и сжиженных углеводородных газов. Требования пожарной безопасности. Рекомендации [Электронный ресурс]: Рекомендации (согласованы письмом Управления ГПН МЧС России от 11 мая 2007 г. № 19-2-1831) // СПС КонсультантПлюс. –

Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

11. Устройства для слива и налива железнодорожных цистерн [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://discoverrussia.interfax.ru/wiki/30/> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

12. Об утверждении Правил технической эксплуатации нефтебаз [Электронный ресурс]: правила (утв. и введ. в действие приказом Минэнерго РФ от 19 июня 2003 г. N 232) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

13. ВНТП 5-95. Нормы технологического проектирования предприятий по обеспечению нефтепродуктами (нефтебаз) [Электронный ресурс]: отраслевые технические нормы (утв. и введ. в действие приказом Минтопэнерго России 03.04.95 г. N 64) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

14. Сливно-наливные устройства для железнодорожного транспорта [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ros-pipe.ru/clauses/slivo-nalivnyye-ustroystva-dlya-zheleznodorozhnogo-/> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

15. Пример расчета молниезащиты сливноналивной эстакады [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://zandz.com/ru/news/Primer_rascheta_molniezaschityi_slivo_nalivnoy_estakadyi (дата обращения: 19.06.2019 г.).

16. Технический словарь. Том V [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ai08.org/index.php/term/Технический+словарь,+Том,+V,14772-odinchnyij-stoyak.xhtml> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

17. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов. Справочное пособие [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Index1/49/49926.htm> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

18. Коршак А. А. Основы нефтегазового дела [Текст] / Коршак А. А., Шаммазов А. – М.: Учебник для вузов. – 3-е изд., испр. и доп. – Уфа.: ООО «Дизайн-ПолиграфСервис», 2005. – 528 с.

19. Сливно-наливная эстакада сжиженных газов, завод «Мономер» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://firecenter.ru/2073> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

20. УП АУТН-96. Указания по проектированию автоматизированных установок тактового налива светлых нефтепродуктов в железнодорожные и автомобильные цистерны [Электронный ресурс]: отраслевые технические нормы (утв. Госгортехнадзором РФ 28.05.1996, Минтопэнерго РФ 03.06.1996) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

21. Пожар на территории УПТК ОАО «Омскнефтепроводстрой» в г. Омск [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://fireman.club/knigaramuaty/munaev-tlegen-zhumabaevich/> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

22. На станции «Люберцы» сгорели четыре цистерны с бензином [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2001/07/11/fire> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

23. Пожар на Ногинской нефтебазе потушен [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gia.ru/20050615/40523623.html> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

24. Информация об авариях, групповых несчастных случаях и случаях со смертельным исходом, происшедших на предприятиях нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности за 10 мес. 2005 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ib.safety.ru/assets/pdf/Bull_21/Bull_21_27-65.pdf (дата обращения: 19.06.2019 г.).

25. Взрыв цистерн с нефтепродуктами в Польше [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bigpicture.ru/?p=95992> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

26. Пожар на железнодорожной станции «Горький-Сортировочный» в г. Нижний Новгород [Электронный ресурс] // Новости [сайт]. Режим доступа: http://www.vremyan.ru/news/pozhar_na_sortirovke_proizoshel_iz-za_povrezhdennoj_vo_vremja_spuska_cisterny.html (дата обращения 22.06.2018 г.).

27. Пожар в Мытищах на железнодорожной станции [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.bigmytishi.ru/2013/01/pozhar-1-janvaria-na-zhd-stancii.html> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

28. На станции Лоста - сортировочная произошло возгорание цистерны с бензином [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.gorodche.ru/news/incident/18793/> (дата обращения: 19.06.2019 г.).

29. На железной дороге под Кировом сгорели 12 цистерн с жидким топливом [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://www.kommersant.ru/doc/2400582> (дата обращения: 24.06.2019 г.).

30. Пожар на Рязанском нефтезаводе локализован [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.vesti.ru/doc.html?id=1277995> (дата обращения: 25.06.2019 г.).

31. Пожар на промывочно-пропарочной станции железной дороги в пос. Увек Саратовской области [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://novosti-saratova.ru/v-poselke-uvek-pod-saratovom-polyihalo-chnoe-zoloto.html> (дата обращения 22.06.2018 г.).

32. В штате Оклахома сошел с рельсов и загорелся грузовой поезд [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2008/08/23/train/> (дата обращения: 26.06.2019 г.).

33. Крушение состава с нефтью в Лак-Мегантик (Квебек) [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Крушение_состава_с_нефтью_в_Лак-Мегантик_\(Квебек\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Крушение_состава_с_нефтью_в_Лак-Мегантик_(Квебек)) (дата обращения: 26.06.2019 г.).

34. Lautkaski R. Fire-fighting readiness of railway yard [Text] / R. Lautkaski, K. Virolainen // Ministry of transport and Communications, Helsinki. Reports and Memoranda. – 2002. – 11 p.

35. СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 26.12.2013 г. № 837) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

36. СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 24.04.2013 г. № 288) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

37. СП 225.1326000.2014. Станционные здания, сооружения и устройства [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом Минтранса России от 02.12.2014 г. № 331) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

38. СНиП 2.11.03-93 (СП 110.13330.2011). Склады нефти и нефтепродуктов. Противопожарные нормы [Электронный ресурс]: строительные нормы и правила (утв. Гос. ком. РФ по вопросам архитектуры и строительства от 26.04.1993 г. № 18-10) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

39. СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом Мин. рег. разв. РФ от 29.12.2011 г. № 620) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

40. СП 231.1311500.2015. Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 17.06.2015 г. № 302) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

41. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля [Электронный ресурс]: национальный стандарт (утв. Приказом Ростехрегулирования от 27.12.2012 г. № 1971-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

42. ВУП СНЭ-87. Ведомственные указания по проектированию железнодорожных сливо-наливных эстакад легковоспламеняющихся и горючих жидкостей и сжиженных углеводородных газов [Электронный ресурс]: ведомственные указания (утв. Приказом Миннефтехимпрома СССР от 17.07.1986 г. № 685) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

43. ВУПП-88. Ведомственные указания по противопожарному проектированию предприятий, зданий и сооружений нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности [Электронный ресурс]: ведомственные указания (утв. Приказом Миннефтехимпрома СССР от 17.08.1979 г. № 726) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

44. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений [Электронный ресурс]: межгосударственный стандарт (утв. Приказом Ростехрегулирования от 22.11.2013 г. № 1608-ст) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

45. СП 30.13330.2016. Внутренний водопровод и канализация зданий. Актуализированная редакция СНиП 2.04.01-85* (с поправкой) [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом Минстроя России от 16.12.2016 г. № 951/пр) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

46. СП 8.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Источники наружного противопожарного водоснабжения. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 25.03.2009 г. № 178) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

47. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом Минрегион России от 29.12.2011 г. № 635/14) // СПС

КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

48. СП 10.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Внутренний противопожарный водопровод. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 25.03.2009 г. № 180) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

49. Пожнефтехим о подготовке свода правил по пожарной безопасности сливноналивных эстакад ЛВЖ и ГЖ [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.pnx-spb.ru/media_centra/news/1162/ (дата обращения: 24.06.2019 г.).

50. Marc J. Assael. Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions. Effects Calculation and Risk Analysis [Text] / Marc J. Assael, Konstantinos E. Kakosimos // CRC Press. – 2010. – 349 p.

51. Пузач С.В. Методы расчета тепломассобмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожарвзрывобезопасности [Текст] / Пузач С.В. // Академия ГПС МЧС России. – 2005. – 336 с.

52. Yumoto T., Heat transfer from flame to fuel surface in large pool fires [Text] / Yumoto T. // Combustion and flame. – 17. – 1971 – pp. 108-110.

53. Babrauskas V. Estimating Large Pool Fire Burning Rates [Text] / Babrauskas V. // Fire Techn. – 1983. – №19 – pp. 251-261.

54. Zabetakis M.G. Research on the Hazards Associated with the Production and Handling of Liquid Hydrogen [Text] / Zabetakis M.G., Burgess D.S. // Bureau of Mines, Pittsburgh. – 1961. – p. 5707.

55. Кучер В.М. Расчетные значения скорости выгорания органических жидкостей [Текст] / Кучер В.М., Козлов В.А., Меркулов В.А. // Проблемы горения и тушения пожаров. Сб. ВНИИПО. – М. – 1975. – С. 113-114.

56. Кучер В.М. Скорость выгорания органических жидкостей. Автоматические установки пожаротушения [Текст] / Кучер В.М., Меркулов В.А. // Сб. трудов ВНИИПО. – М. – 1985. – С. 56-66.

57. Кучер В.М. Экспериментальное определение скорости выгорания жидкостей со свободной поверхности [Текст] / Кучер В.М., Козлов В.А. // Проблемы горения и тушения пожаров. Сб. ВНИИПО. – М. – 1975. – С. 115-116.

58. Burgess D.S. Diffusive Burning of Liquid Fuels in Open Trays [Text] / Burgess D.S., Strasser A. and Grumer L. // Fire Res. Abstr. Rev. – 196. – pp. 177-193.

59. Hottel H.C. Review - Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids, by V.I. Blinov and G.N. Khudiakov [Text] / Hottel H.C. // Fire Res. Abstr. Rev. – 1958. – №1 – pp. 41-44.

60. Mudan K.S. Thermal Radiation from Hydrocarbon Pool and Vapor Fires [Text] / Mudan K.S. // Arthur D. Little Inc. – Report 50688. – 1985. – pp. 59-80.

61. Burgess D.S. Advances in Thermal Engineering / Burgess D.S. and Herzberg M. [Text] // Wiley and Sons, Chichester, UK. – 1974. – 413 p.

62. Драздейл Д. Введение в динамику пожаров [Текст] / Драздейл Д. // Стройиздат. – 1990. – 424 с.

63. Thomas P.H. The Size of Flames of Natural Fires [Text] / Thomas P.H. // Proc. 9th Symp. on Combustion, Academic Press, New York. – 1963. – pp. 844-859.

64. Lee F.P. Loss prevention in process industries [Text] / Lee F.P. // London, Batterworths. – 1980. – 1316 p.

65. Mizher G.A. Large-Scale LNG and LPG Pool Fires [Text] / Mizher G.A., Eyre J.A., // The assessment of Major Hazards, The Inst. Of Chem. Eng., Symp. Ser. – №71. –1982. – pp. 147-165.

66. Кондрашков Ю.А. Механизм горения водорода при его испарении с открытой поверхности [Текст] / Кондрашков Ю.А., Кривенко О.В. // Процессы горения и проблемы тушения пожаров. Материалы III Всесоюзной научно-технической конференции. – ВНИИПО. – 1973. – С. 68-76.

67. Heskestad G. Luminous heights of turbulent diffusion flames [Text] / Heskestad G. // Fire Safety Journal. – 1983. – №5. – pp.103-108.

68. Heskestad G. Peak Gas Velocities and Flame Heights of Buoyancy-Controlled Turbulent Diffusion Flames [Text] / Heskestad G. // Eighteenth Fire Hazard

Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires 3–311 Symposium (International) on Combustion. – Combustion Institute, Pittsburgh. – 1981. – pp. 951-960.

69. Zukoski E.E. Entrainment in fire plumes [Text] / Zukoski E.E., Kubota T., Cetegan B. // Fire Safety Journal. – 1981. – № 3. – pp. 107-121.

70. Croce P.A. Thermal radiation from LNG trench fires [Text] / Croce P.A., Mudan K. S. // Gastech. – 1985. – № 85 – pp. 158-164.

71. American Gas Association, LNG Safety Research Programm [Text] / AGA // Report IS 3-1. – 1974.

72. Welker J.R. Bending of wind-blown flames from liquid pools [Text] / Welker J.R., Sliepcevich C.M. // Fire Technology. – 1966. – № 2. – pp. 127-135.

73. Thomas P.H. The Size of Flames of Natural Fires [Text] / Thomas P.H. // Proc. 9th Symp. on Combustion, Academic Press, New York.– 1963. – pp. 844-859.

74. Vela I. CFD prediction of thermal radiation of large, sooty, hydrocarbon pool fires [Text] / Vorhersage der thermischen Strahlung großer, rußender Kohlenwasserstoff-Poolfeuer mit CFD Simulation // Essen. – 2009. – 183 p.

75. Pritchard M.J. A new Approach for Predicting Thermal Radiation Levels from Hydrocarbon Pool Fires [Text] / Pritchard M.J., Binding T.M. // IChemE Symp. Series. – 1992. – № 130 – pp. 491-505.

76. Moorhouse J. Scaling Criteria for Pool Fires Derived from Large-Scale Experiments [Text] / Moorhouse J. // I. Chemical Symposium. – 1982. – pp. 165-179.

77. Bagster D.G. Thermal Hazards in the Process Industry [Text] / Bagster D.G., Pittblado R.M. // Chemical Engineering Progress. – 1989. – pp. 69-75.

78. Зверев И.Н. Газодинамика горения [Текст] / Зверев И.Н., Смирнов Н.Н. // Изд.-во Моск. Ун.-та.– 1987. – 307 с.

79. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности [Электронный ресурс]: свод правил (утв. Приказом МЧС России от 09.12.2010 г. № 643) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

80. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] / Патанкар С.В. // М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 152 с.

81. *Ansys Fluent: Solver Theory Guide [Text]* / ANSYS, Inc Southpointe. – 2011. – 14.5. – 862 p.

82. Ибатулин, Р.К. Численное моделирование горения бензина методом крупных вихрей в программном комплексе *Ansys Fluent* [Текст] / Ибатулин Р.К. // Материалы II Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» Часть 1. – 2018. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 279-281.

83. Ибатулин, Р.К. Моделирование пожара на сливноналивной железнодорожной эстакаде с использованием программного комплекса *Ansys Fluent* [Текст] / Ибатулин Р.К. // Материалы 27-й Международная научно-технической конференции «Системы безопасности – 2018». – 2018. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 192-196.

84. Ибатулин, Р.К. Численное моделирование пожара пролива бензина на сливноналивной железнодорожной эстакаде при ветровом воздействии [Текст] / В.В. Воробьев, Р.К. Ибатулин, А.П. Петров, Е.Д. Веселов, С.А. Панов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация: научный журнал. – 2019. – № 1. С. 47-55.

85. Ибатулин, Р.К. Численное моделирование пожара пролива в программном комплексе *Ansys Fluent* при ветровом воздействии [Текст] / Ибатулин Р.К. // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» 2019. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 112-116.

86. Ибатулин, Р.К. Численное моделирование пожара пролива бензина на сливо-наливной железнодорожной эстакаде при ветровом воздействии [Текст] / Ибатулин Р.К. // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей». – 2019. – Самара: Изд.-во Самарского унив.- та, 2019. – С. 72-73.

87. Ansys Fluent: Users Guide [Text] / ANSYS, Inc. Southpointe. – 2011. – 14.5. – 2498 p.
88. Ansys Fluent: Tutorials [Text] / ANSYS, Inc. Southpointe. – 2011. – 14.5. – 146 p.
89. Lee K.B. On the Rate of Combustion of Soot in a Laminar Soot Flame [Text] / Lee K.B., Thring M.W., Beer J.M. // *Combustion and Flame*. – 1962. – № 8. – pp. 437-443.
90. Ибатулин, Р.К. Реализация принципов технического регулирования при обосновании проектных решений систем безопасности [Текст] / Игнатцев А. С., Воробьев В.В., Ибатулин Р.К. // *Материалы Международной научно-практической конференции «Проблемы правового регулирования обеспечения пожарной безопасности на современном этапе и пути решения – 2019»*. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 189-191.
91. Snegirev A. The effect of soot modeling on thermal radiation in buoyant turbulent diffusion flames [Text] / Snegirev A., Kokovina E., Tsoy A., Harris J., Wu T. // *Journal of Physics: Conference Series* 745. – 2016. – 8 p.
92. Воробьев В.В. Валидация моделей программного пакета *ANSYS Fluent* для определения параметров пожара пролива нефтепродуктов [Текст] // Воробьев В.В., Ибатулин Р.К., Игнатцев А.С. // *научно-технический журнал «Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация»*. – 2018. – № 3. – С. 15-19.
93. Ибатулин Р.К. Экспериментальное исследование лучистого теплового потока пламени бензина при ветровом воздействии [Текст] / Ибатулин Р.К. // *Материалы научно-практической конференции «Школа молодых ученых и специалистов МЧС России-2018»*. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 105-109.
94. Снегирев А.Ю. Основы теории горения [Текст] / А.Ю. Снегирев // СПб. Изд-во Политехн. ун-та. – 2014. – 352 с.
95. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.

96. Lindstedt R.P. In Proc. IUTAM Conf. on Aerothermo-Chemistry in Combustion [Text] / Lindstedt R.P. // Taipei, Taiwan. – 1991.
97. Fenimore C.P. Oxidation of soot by hydroxyl radicals [Text] / Fenimore C.P., Jones G.W. // J. Phys. Chem. – 1967. – № 71. – pp. 593-597.
98. Brookes S.J. Prediction of Soot and Thermal Radiation in Confined Turbulent Jet Diffusion Flames [Text] / Brookes S.J., Moss J.B. // Combustion and Flame. – 1999. – № 116. – pp. 486-503.
99. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. // Пер. с англ. Г.Л. Агафонова. Под. ред. П.А. Власова. – М.: Физматлит. – 2003. – 352 с.
100. Pitsch Н. A consistent flamelet formulation for non-premixed combustion considering differential diffusion effects [Text] / Pitsch Н., Peters N. // Combustion and Flame. – 1998. – № 114. – pp. 26-40.
101. Kim J. S. Extinction of diffusion flames with non-unity Lewis number [Text] / Kim J. S., Williams F.A. // Eng. Math. – 1997. – № 31. – pp. 101-118.
102. Астапенко В.М. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В.М. Астапенко [и др.] // Под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: Стройиздат. – 1988. – 448 с.
103. Seiser Н. Extinction and Autoignition of n-Heptane in Counterflow Configuration [Text] / Seiser Н., Н. Pitsch, К. Seshadri, W. J. Pitz, and Н. J. Curran // Proceedings of the Combustion Institute. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA. – 2000. – № 28 – pp. 2029-2037.
104. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA. n-Heptane, Reduced Mechanism [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://combustion.llnl.gov/content/assets/docs/combustion/ic8_2e_mech.txt (дата обращения 18.03.2018г.).
105. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: методика (утв. и введ. в действие приказом МЧС России от 10.07.2009 г. № 404, зарегистрировано в Минюсте РФ 17.08.2009 г. № 14541) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

106. Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа» [Электронный ресурс]: методика (утв. и введ. в действие приказом федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 26.12.2018 г. № 647, зарегистрировано в Минюсте РФ 16.12.2013 г. № 30605) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

107. Gardon R. An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation [Text] / Gardon R. // Rev. Sci. Instrum. C: ISA – 1953. – № 24 – pp. 366-370.

108. Kidd C.T. How the Schmidt-Boiler gage really works [Text] / Kidd C.T., Nelson C.G. // International instrumentation Symposium, research triangle park, NC: ISA – 1995. – № 41 – pp. 347-368.

109. Купцов А.И. Анализ действующих нормативных методик расчета последствий пожара пролива горючих веществ на нефтехимических производствах [Текст] / Купцов А. И., Исламхузин Д. Я., Гимранов Ф. М. // – Вестник Казанского техн. Университета. – 2013. – № 9 – С. 243-245.

110. Рекомендации по применению теплозащитных экранов [Текст] / ФГБУ ВНИИПО МЧС России. – М.: ВНИИПО. – 2012. – 29 с.

111. Копылов Н.П. Эффективность применения теплозащитных экранов для защиты от тепловых потоков при пожарах [Текст] / Копылов Н.П., Хасанов И.Р. // – Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 11. – С. 38-43.

112. Будыкина Т.А. Прогрессивные технологии и средства тушения пожаров на нефтебазах [Текст] / Будыкина Т.А., Будыкина К.Ю. // Вестник Российского университета дружбы народов. – 2017. – № 1. – С. 132-144.

113. Усманов М.Х. Опыт применения теплозащитных экранов «Согда» на пожаровзрывоопасных объектах в Узбекистане [Текст] / Усманов М.Х., Кулдашев А.Х., Музафаров У.Т., Екубов У.А., Кулдашев И.Х. // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – №5. – С. 50-60.

114. Пат. 188009 Российская Федерация, МПК А62С2/08 Устройство для защиты пожарного от теплового излучения [Текст] / Усманов М.Х. [и др.];

заявитель и патентообладатель Усманов М.Х. (UZ). – № 2018135518; заявл. 09.10.2018; опубл. 26.03.2019. – 12 с.

115. Пат. IAP 02163 Узбекистан, МПК А62С2/08. 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, Бюл. № 2. – 3 с.

116. Брушлинский Н.Н. Экраны «Согда» [Текст] / Брушлинский Н.Н., Копылов Н.П., Усманов М. Х., Шимко В.Ю. // Пожарное дело. – 2009.– №11. – С. 34-35.

117. Брушлинский Н.Н. Экраны «Согда» [Текст] / Брушлинский Н.Н., Копылов Н.П., Усманов М. Х., Шимко В.Ю. // Пожарное дело. – 2009. – №12. – С. 38-39.

118. Шимко В. Ю. Новый тип противопожарных преград для объектов нефтегазового комплекса [Текст] / Шимко В. Ю. // Материалы XXIX Международной научн. практ. конф., посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России: Горение и проблемы тушения пожаров. М.: ВНИИПО МЧС России. – 2017. – Ч. 2. – С. 175-177.

119. Шимко В. Ю. Противопожарные преграды на основе теплозащитных сетчатых экранов для защиты объектов нефтегазового комплекса [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Шимко Василий Юрьевич. – М., 2018. – 149 с.

120. Теплозащитный экран «Согда» 2А [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://спесрозhtech.ru/rus/production/teplozashhitnyij-ekran-sogda-2a> (дата обращения 05.07.2018г.).

121. Пат. 65767 Российская Федерация, МПК А62С39/00, А62С27/00. Защитный экран пожарного лафетного ствола (варианты) [Текст] / Иоффе Ю.Я. [и др.]; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Сургут-нефтегаз» (RU). – № 2007101986/22; заявл. 18.01.2007; опубл. 27.08.2007. – 10 с.

122. Шойгу, С. К. Пожарная безопасность. Энциклопедия [Текст] / С. К. Шойгу, М.М. Верзилин, Г.Н. Кириллов. - Москва ФГУ ВНИИПО МЧС России. – 2007. – 416 с.

123. Сталь марки 12X18H10T [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/12X18H10T (дата обращения 05.07.2018г.).

124. Сергель О. С. Прикладная гидрогазодинамика [Текст] / О. С. Сергель // М.: Машиностроение. – 1981. – 298 с.

125. Вертикальная огневая печь [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mgsu.ru/customer/Oborudovaniye/Bezopasnot-v-stroitelstve/Vertikalnaya-pech/> (дата обращения 05.07.2018г.).

126. Абрамов Ю. А. Оценка пульсаций пламени при горении нефтепродуктов [Текст] / Абрамов Ю. А., Басманов А. Е. // Радиоэлектроника и информатика.– 2006. – № 1. – С. 40-42.

127. Старков Н. Н. Тушение пожаров нефтепродуктов и полярных жидкостей в резервуаре диоксидом углерода твердым гранулированным [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. / Старков Н. Н. М.: Академия ГПС МЧС России. – 2006. – 174 с.

128. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена [Текст] / Кутателадзе С. С. // М.: Атомиздат. – 1979. – 416 с.

129. Протокол научно-исследовательских испытаний водопленочного защитного (теплозащитного) экран, типа ВПЭ, изготавливаемый по ТУ 28.99.39-049-72410778-2018 [Текст] / Мытищи: ИЛ Института комплексной безопасности в строительстве НИУ МГСУ. – 2018. – 17 с.

130. Кошмаров Ю. А. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле [Текст] / Кошмаров Ю. А., Башкирцев М. П. // М.: ВИПТШ МВД СССР. –1987. – 443 с.

131. Ибатулин Р.К. Результаты огневых испытаний водопленочного защитного экрана [Электронный ресурс] / Ибатулин Р.К., Веселов Е.Д., Панов С.А., Воробьев В.В., Швырков С.А. // Технологии техносферной безопасности. – 2019. № 2. – С. 14-26.

132. Ибатулин Р.К. Водопленочный защитный экран от теплового излучения пожара пролива нефтепродуктов на железнодорожной сливноналивной

эстакаде [Электронный ресурс] / Ибатулин Р.К. // Технологии техносферной безопасности. – № 3 (85). – 2019. – С. 24-36.

133. Шимко В. Ю. Использование водопленочных теплозащитных экранов для защиты от теплового излучения при горении проливов сжиженного природного газа [Текст] / Шимко В. Ю. // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – № 12. – С. 63-67.

134. Шимко В. Ю. Использование конструкций на основе водопленочных экранов для повышения пожаровзрывобезопасности объектов хранения и распределения сжиженного природного газа [Текст] / Шимко В. Ю. // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – № 1. – С. 58-61.

135. Шимко В. Ю. Новый тип противопожарных преград для объектов нефтегазового комплекса [Текст] / Шимко В. Ю. // Материалы XXIX Международной научн.-практ. конф., посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России: Горение и проблемы тушения пожаров. М.: ВНИИПО МЧС России. – 2017. – С. 175-177.

136. Паспорт на приемник теплового потока типа преобразователя термоэлектрического ТП-2001 [Текст] / Москва: ФГУП «ВНИИФТРИ». – 2004. – 4 с.

137. Цифровой мультиметр Mastech MY-60 [Электронный ресурс]: инструкция // сайт. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/270/DOC000270992.pdf> (дата обращения 10.07.2019).

138. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования [Электронный ресурс]: государственный стандарт (утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 12.11.1980 г. № 5320) // СПС КонсультантПлюс. – Электрон. Дан. – М., 2019. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

139. Лабораторные работы по курсу физики. Физические основы механики и молекулярной физики. Часть 1 [Текст] / В.М. Астапенко, А.Е. Иванов, Д.Н. Ончуков, В.А. Семенов. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1990. – 89 с.

140. Прибор комбинированный «ТКА-ПКМ» (50). Анемометр [Текст] / Руководство по эксплуатации // НТП «ТКА», Санкт-Петербург. – 2017.– 12 с.

141. Пат. 188762 Российская Федерация, МПК А62С2/06. Устройство для защиты от теплового потока [Текст] / Веселов Е.Д. и др.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Пожнефтехим» (RU). – № 2019100792; заявл. 10.01.2019; опубл. 23.04.2019, Бюл. №12. – 5 с.

142. Водопленочный теплозащитный экран (ВПЭ) [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.pnx-spb.ru/catalog/vodoplenochny-ekran_waterfilm-shield/ (дата обращения: 09.07.2019 г.).

143. Водопленочный теплозащитный экран ВПЭ «Пожнефтехим» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.pnx-spb.ru/media_centр/news/1168/ (дата обращения: 09.07.2019 г.).

144. Лафетный пожарный комплекс (ЛПК) «Антифайер» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.pnx-spb.ru/catalog/lafetny-pozharny-komplex-firefighting-monitor/> (дата обращения: 09.07.2019 г.).

ПРИЛОЖЕНИЕ

(обязательное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



ГК «ПОЖНЕФТЕХИМ» • ООО «ТПК Пожнефтехим»
109428, Москва, Рязанский пр-т., д. 10, стр.18, этаж 6, ком.1-7
+7 (499) 703 0132 • mail@pnx-spb.ru • www.pnx-spb.ru



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «ТПК Пожнефтехим»,
кандидат технических наук



С.А. Панов

2019 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Ибатулина Равшана Камаловича на тему: «Водоуплотненный защитный экран от теплового излучения пожара пролива нефтепродуктов на железнодорожной сливноналивной эстакаде» в конструкторскую документацию на серийное производство водоуплотненных защитных экранов, устанавливаемых на пожарных вышках железнодорожных сливноналивных эстакад для защиты ствольщика от теплового излучения пожара пролива нефтепродуктов.

Комиссия в составе: председателя - кандидата технических наук Ю.К. Потеряева, начальника нормативно-технического отдела С.В.Титенкова, специалиста отдела ОКР и сертификации В.В.Антропова подтверждает, что при разработке конструкторской документации на серийное производство водоуплотненных защитных экранов, устанавливаемых на пожарных вышках железнодорожных сливноналивных эстакад для защиты ствольщика от теплового излучения пожара пролива нефтепродуктов, использовались результаты диссертационной работы Р.К. Ибатулина, а именно:

- численное моделирование пожара пролива бензина на сливноналивной железнодорожной эстакаде при ветровом воздействии;
- эскиз опытного образца водоуплотненного защитного экрана;
- результаты гидравлических и огневых испытаний водоуплотненного защитного экрана.

Председатель комиссии _____ Ю.К.Потеряев, к.т.н.

Член комиссии _____ С.В.Титенков, начальник
нормативно-технического отдела

Член комиссии _____ В.В.Антропов, специалист
отдела ОКР и сертификации

Исл. Николорев А. mail@pnx-spb.ru, +7 (499) 703 01 32

ООО «Торгово-Производственная Компания Пожнефтехим» входит в ГК «Пожнефтехим»
Проектирование систем пожаротушения. Консультации по техническим и коммерческим вопросам
ИНН 7709980842 КПП 772101001 ОГРН 5167746348424 ОКВЭД 46.90, 20.13, 33.14, 43.21, 46.75.2, 71.12

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по учебной работе,
кандидат военных наук, доцент,
полковник внутренней службы

М.В. Бедило
« 10 » 2019 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы
Ибатулина Равшана Камаловича на тему:
«Водоуплотненный защитный экран от теплового излучения пожара пролива
нефтепродуктов на железнодорожной сливноналивной эстакаде»
в учебный процесс Академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе: начальника кафедры пожарной безопасности технологических процессов (ПБТП), д.т.н., доцента, полковника внутренней службы Швыркова Сергея Александровича; профессора кафедры ПБТП, д.т.н., профессора Петрова Анатолия Павловича; профессора кафедры ПБТП, д.т.н., профессора Назарова Владимира Петровича; профессора кафедры ПБТП, к.т.н., доцента Клубаня Владимира Семеновича подтверждает, что результаты диссертационной работы Ибатулина Р.К. внедрены в учебный процесс по дисциплине «Пожарная безопасность технологических процессов», а именно, использованы при написании второй редакции одноименного учебника для бакалавров, а также применяются при чтении лекций и проведении практических занятий со слушателями бакалавриата, специалитета и магистратуры Академии ГПС МЧС России.

Начальник кафедры ПБТП,
д.т.н., доцент, полковник внутренней службы

 С.А. Швырков

Профессор кафедры ПБТП, д.т.н., профессор

 А.П. Петров

Профессор кафедры ПБТП, д.т.н., профессор

 В.П. Назаров

Профессор кафедры ПБТП, к.т.н., доцент

 В.С. Клубань