

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России на кафедре пожарной безопасности технологических процессов

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Воробьев Владимир Викторович

Официальные оппоненты: Таранцев Александр Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет
ГПС МЧС России», профессор кафедры
организации пожаротушения
и проведения аварийно-спасательных работ

Зубрилин Иван Александрович,
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет имени академика
С.П. Королева», старший научный сотрудник
лаборатории моделирования процессов горения
научно-образовательного центра
газодинамических исследований

Ведущая организация: ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета»
научно-исследовательский институт
противопожарной обороны МЧС России»

Защита состоится «17» марта 2020 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/8b9/8b984e245e412ee0a9def4c819cf3f1c.pdf>

Автореферат разослан «15» января 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сивенков Андрей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из наиболее востребованных способов транспортировки нефтепродуктов к местам хранения, распределения и потребления является их перевозка железнодорожным транспортом. Процессы заполнения и опорожнения железнодорожных цистерн осуществляются на железнодорожных сливноналивных эстакадах, которые характеризуются 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.

В соответствии с СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности» 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). 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;
- теплозащитные экраны, изготовленные из двух листов металла, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом.

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 мм^2).

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.

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. 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 железнодорожной сливноналивной 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.

Анализ рассмотренных работ показал, что они реализованы на основании эмпирических и полумэмпирических 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.

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 СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности».

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 водопеночного 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 водопеночного 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 пространственного 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 водопеночного 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 водопеночного 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 опытного образца 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 науч.-практич. конф.: «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018); Научн.-практич. конф. «Школа молодых ученых и специалистов МЧС России»

2018» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018); 27-ой Международная научн.-технич. конф.: «Системы безопасности – 2018» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018); VI Всероссийской научн.-практич. конф.: «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (Иваново, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019); Международной научн.-практич. конф.: «Проблемы правового регулирования обеспечения пожарной безопасности на современном этапе и пути решения – 2019» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019); XI Всероссийской научн.-технич. конф. с международным участием «Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей» (Самара, Самарский нац. исслед. унив. им. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы и степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, представлены методология и методы исследования, а также степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе «Пожарная опасность и способы обеспечения пожарной безопасности железнодорожных сливноналивных эстакад» представлена характеристика железнодорожных сливноналивных эстакад нефти и нефтепродуктов и особенностей проводимых технологических операций, приведены примеры пожаров железнодорожных цистерн с нефтью и нефтепродуктами, а также выполнен анализ требований нормативных документов к системе противопожарной защиты железнодорожных сливноналивных эстакад.

Во второй главе «Пожар пролива нефтепродуктов на железнодорожной сливноналивной эстакаде при ветровом воздействии» приведен обзор исследований по определению плотности падающего лучистого теплового потока при пожарах пролива нефти и нефтепродуктов, обоснована совокупность моделей вычислительной гидродинамики для решения данной задачи, а также представлены результаты численного моделирования пожара пролива бензина на железнодорожной сливноналивной эстакаде.

Для обоснования требований, предъявляемым к водопленочным защитным экранам, устанавливаемым на пожарных вышках железнодорожных сливноналивных эстакад, необходимо определить плотность падающего на экран лучистого теплового потока при пожаре пролива нефтепродуктов.

Проведение натурных экспериментов для достижения поставленной цели связано с большими трудностями и высокой опасностью для жизни и здоровья их участников. Способы, применяемые в существующих методиках 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 железнодорожной цистерны, находящейся над очагом пожара пролива, на структуру пламени. 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 определило необходимость использования для решения поставленной задачи методов численного моделирования на основе пакетов вычислительной гидродинамики (*CFD* пакеты). 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.

Для моделирования пожара пролива и прогнозирования плотности лучистого потока на расстоянии 15 м от железнодорожных путей эстакады использовался один из современных пакетов вычислительной гидродинамики *ANSYS Fluent*, содержащий широкий набор верифицированных моделей, обеспечивающих получение точных результатов.

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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho Y_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Y_\alpha}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\mu}{Sc_\alpha} \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_j} + R_{\alpha,r}, \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_j} - \frac{\partial F_j^r}{\partial x_j}, \quad (4)$$

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 .

Турбулентные флуктуации учитывались с использованием модели *DES* (*Detached Eddy Simulation*). Эта 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.

Уравнения, используемые в модели турбулентности *LES*, получают путем фильтрации характеристик реального турбулентного течения по времени от коротковолновых неоднородностей. Данный процесс позволяет отфильтровать вихри, масштабы которых меньше размера фильтра или локального размера расчетной сетки. Отфильтрованная переменная определяется по формуле:

$$\bar{\phi}(x) = \int_D \phi(x') G(x; x') dx', \quad (5)$$

где ϕ – актуальная переменная; D – объем расчетной области; G – функция фильтра; x – координата рассматриваемой точки потока.

Процессы горения учитывались с использованием модели *EDM* (*Eddy Dissipation Model*). 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 $Da \gg 1$). 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:

$$R_{\alpha,r} = \min(R_{\alpha,r(react)}, R_{\alpha,r(prod)}), \quad (6)$$

$$R_{\alpha,r(react)} = \nu'_{\alpha,r} M_{w,\alpha} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_{\Re} \left(\frac{Y_{\Re}}{\nu'_{\Re,r} M_{w,\Re}} \right), \quad (7)$$

$$R_{\alpha,r(prod)} = \nu'_{\alpha,r} M_{w,\alpha} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j \nu''_j M_{w,j}}, \quad (8)$$

где ν' и ν'' – стехиометрические коэффициенты для реагентов и продуктов горения; A и B – эмпирические константы, соответственно равные 4,0 и 0,5; M_w – молярная масса; $\mathcal{R}$ и P – индексы, характеризующие реагенты и продукты горения.

В модели турбулентности *LES* турбулентная скорость смешения ε/k в выражениях (7) и (8) заменяется подсеточной скоростью смешения, определяемой по формуле:

$$\tau_{sgs}^{-1} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad (9)$$

где S_{ij} – тензор скоростей деформации.

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

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

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega', \quad (10)$$

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 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 1.

Таблица 1 – 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

Образование сажи учитывалось с использованием модели *Moss-Brookes*, которая решает уравнения переноса для приведенной концентрации радикалов зародышей сажи b_{nuc}^* и ее массовой доли Y_{soot} :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{soot}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_{soot}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{soot}} \nabla Y_{soot} \right) + \frac{dM}{dt}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho b_{nuc}^*) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} b_{nuc}^*) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{nuc}} \nabla b_{nuc}^* \right) + \frac{1}{N_{norm}} \frac{dN}{dt}, \quad (12)$$

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: $b_{nuc}^* = N / (\rho N_{norm})$.

Для определения зависимости массовой доли прекурсора сажи (ацетилена) от переменной смешения применялся редуцированный кинетический механизм горения н-гептана в воздухе, учитывающий 770 обратимых элементарных химических реакций между 159 реагирующими компонентами. Генерация профиля массовой доли ацетилена производилась с использованием модели *Steady Diffusion Flamelet*. В результате обработки данных была получена кусочно-полиномиальная функция для прекурсора сажи:

$$Y_{prec} = \begin{cases} 0 \leq f < 0,1484: \\ \quad 0,045451 - 0,022209 f + 4,176643 \cdot 10^{-3} f^2 - 3,900028 \cdot 10^{-4} f^3 + \\ \quad + 0,1922477 \cdot 10^{-4} f^4 - 0,0004801 \cdot 10^{-3} f^5 + 0,0000048 \cdot 10^{-3} f^6; \\ 0,1484 \leq f < 0,7506: \\ \quad 8,884111 \cdot 10^{-4} f + 1,9120415 \cdot 10^{-3} f^2 - 8,128719 \cdot 10^{-4} f^3 + \\ \quad + 0,113581 \cdot 10^{-3} f^4 - 0,048935 \cdot 10^{-4} f^5; \\ 0,7506 \leq f < 1: \\ \quad -1,552133 \cdot 10^{-4} f + 2,182197 \cdot 10^{-4} f^2 - 0,175443 \cdot 10^{-4} f^3. \end{cases}, \quad (13)$$

где Y_{prec} – массовая доля прекурсора сажи; f – переменная смешения.

С целью проведения валидации выбранных моделей предварительно были проведены экспериментальные исследования горения бензина в противне диаметром 1 м для обеспечения турбулентного режима горения. 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 1.

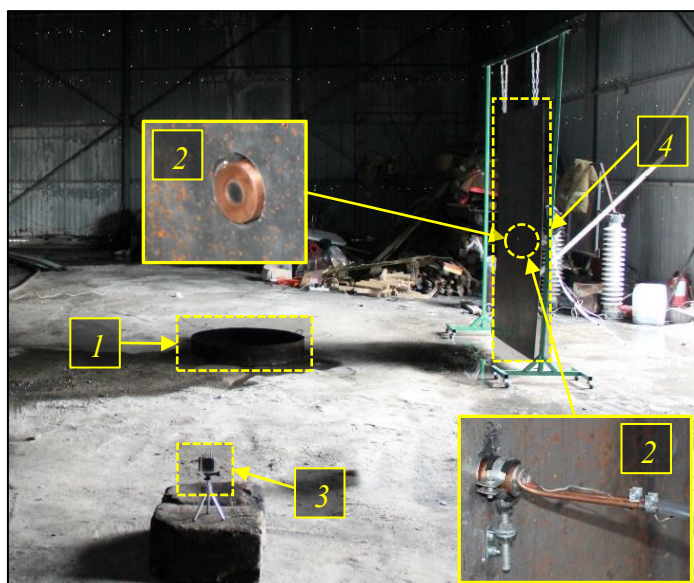


Рисунок 1 – Общий вид экспериментальной установки:
 1 – противень с бензином;
 2 – приемник теплового потока;
 3 – видеокамера;
 4 – стальной лист для крепления приемника теплового потока

Для регистрации падающего лучистого теплового потока применялся прибор ПТП-2001 (диапазон измерений от 1 до 100 кВт/м²; чувствительность приемника 93,5 (мкВ·м²)/кВт; погрешность измерений $\pm 4,8$ %). Регистрация сигнала, передаваемого приемником теплового потока, осуществлялась с помощью цифрового мультиметра UT60A с погрешностью измерения $\pm 0,8$ %. Приемник теплового потока располагался на расстоянии 2,1 м от центра противня и на высоте 0,9 м от уровня пола помещения. Среднее значение измеренной плотности теплового потока составило 4,6 кВт/м².

При моделировании проведенного эксперимента в *ANSYS Fluent* на входе в расчетную область задавался гомогенный поток паров горючего с осредненной температурой кипения и удельным расходом, равным 0,06 кг/(м²·с), что соответствует удельной массовой скорости выгорания бензина. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментального исследования представлено на рисунке 2.

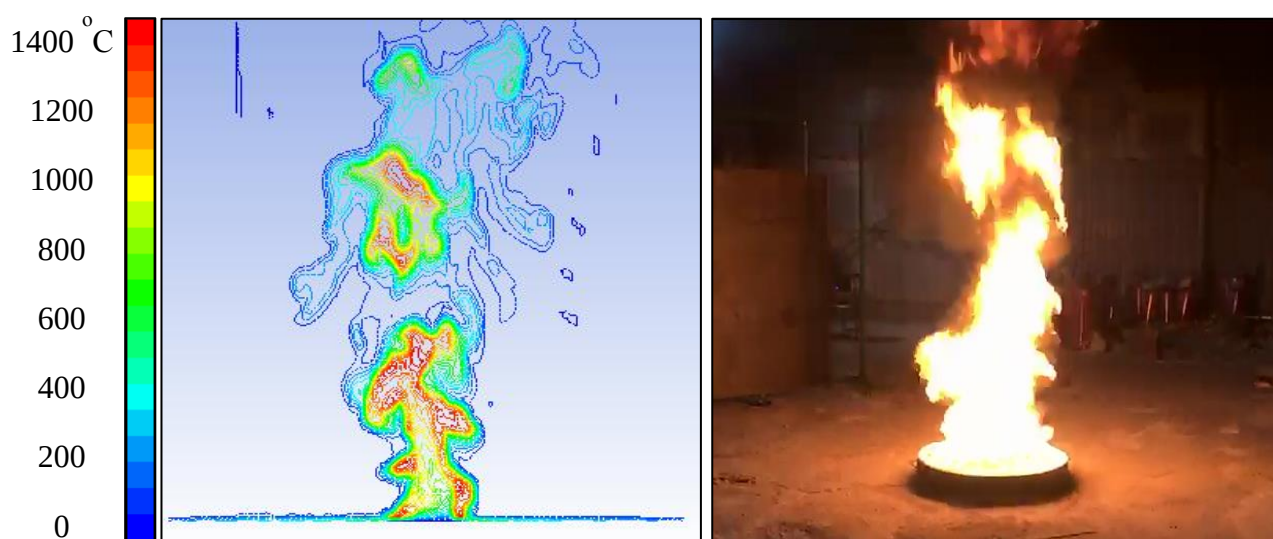


Рисунок 2 – Сравнение контуров мгновенных разрешенных температур, полученных в результате численного моделирования и экспериментального исследования

Анализ данных, представленных на рисунке 3, показал, что среднее расхождение значений плотности падающего лучистого теплового потока, полученных в результате численного моделирования и экспериментального исследования, не превышает 10 %.



Рисунок 3 – Зависимость плотности падающего лучистого теплового потока от времени

Удовлетворительная сходимость результатов численного моделирования и экспериментального исследования позволила сделать вывод об успешной валидации выбранных моделей. Таким образом, дальнейшее исследование было направлено на численное моделирование пожара пролива на железнодорожной сливноналивной эстакаде с целью определения плотности лучистого теплового потока, падающего на защитный экран, для обоснования его гидравлических и конструктивных параметров. На рисунке 4 приведена геометрическая модель расчетной области, представляющая параллелепипед с основанием 32×25 м и высотой 20 м, площадь очага горения составила 75 м^2 (5×15 м).

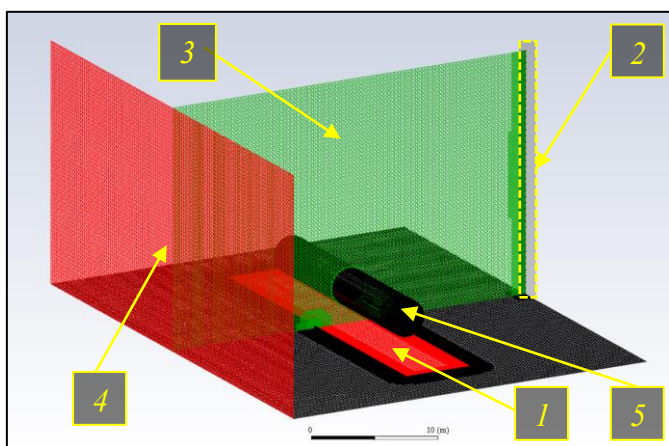


Рисунок 4 – Геометрическая модель расчетной области:
1 – очаг пожара;
2 – точки измерения плотности лучистого потока;
3 – плоскость симметрии;
4 – граница расчетной области для задания скорости ветра;
5 – котел цистерны

В сеточной модели безразмерный параметр Y^+ , характеризующий величину отношения размера пристеночной ячейки к толщине ламинарного подслоя, не превышал 2, а коэффициент нарастания сеточных линий по нормали к поверхностям составлял 1,1, что соответствует требованиям моделей турбулентности для расчета отрывных режимов.

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. Полученные в результате моделирования контуры светящейся зоны пламени, изображенные на рисунке 5, идентифицированы по изоповерхности с температурной 850 К.

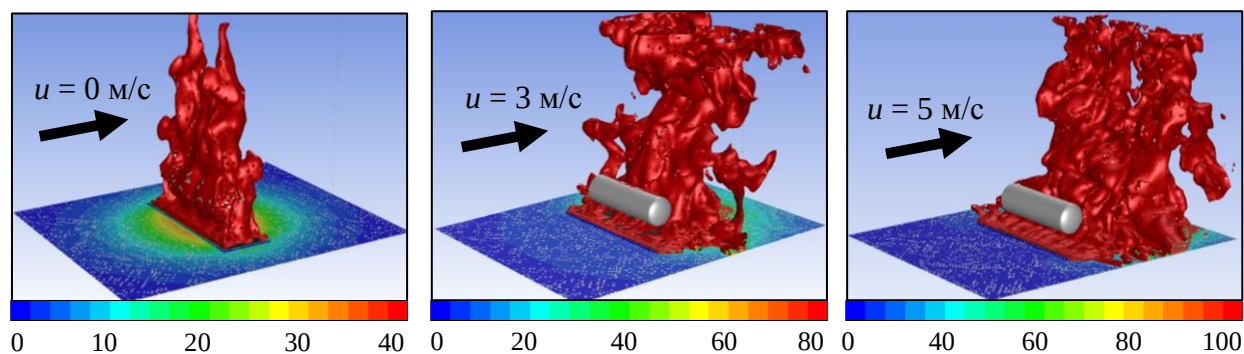


Рисунок 5 – Изоповерхности температуры и распределение плотности падающего лучистого потока (q , кВт/м²) на уровне земли при различных скоростях ветра (u)

Номограмма для определения средних значений плотности лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, расположенного на пожарной вышке на расстоянии 15 м от железнодорожных путей эстакады, в зависимости от высоты (h) при различных скоростях ветра представлена на рисунке 6.

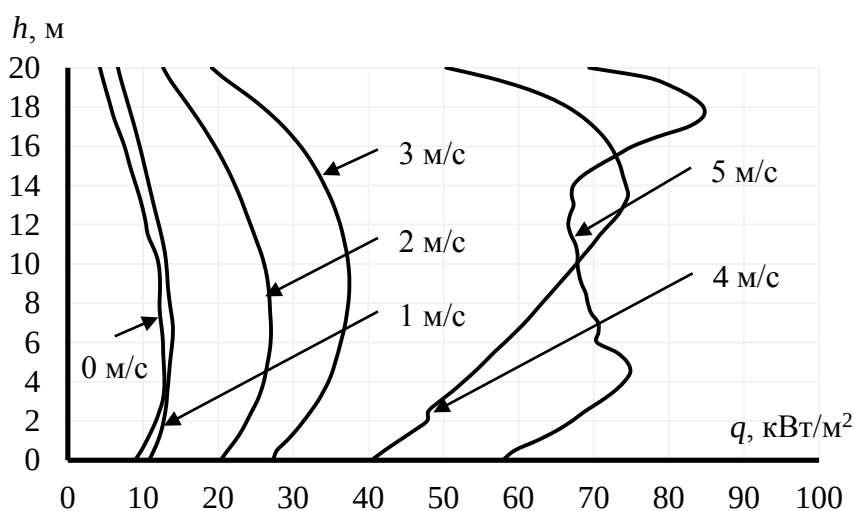


Рисунок 6 – Номограмма для определения средних значений плотности лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, от высоты при различных скоростях ветра

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 эстакады, а плотность лучистого потока в месте размещения ствольщика на пожарной вышке при этом может превышать 60 кВт/м².

Таким образом, использование пожарной вышки, расположенной с подветренной стороны напротив очага пожара, при данных скоростях ветра не представляется возможным. В этом случае для охлаждения цистерны необходимо использовать соседние пожарные вышки, поскольку в соответствии с СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности» для орошения каждой точки железнодорожной сливноналивной эстакады должно быть предусмотрено не менее двух лафетных стволов.

Анализ результатов численного моделирования пожара пролива бензина на железнодорожной эстакаде показал, что защита ствольщика на пожарной вышке от теплового излучения пламени является актуальной задачей. При этом водоупленочные защитные экраны должны быть рассчитаны на величину плотности падающего лучистого теплового потока не менее 60 кВт/м^2 при условии обеспечения снижения указанной плотности до допустимых значений.

В третьей главе «Водоупленочный защитный экран» выполнен обзор теплозащитных экранов, устанавливаемых на пожарных вышках железнодорожных эстакад, представлена конструкция разработанного водоупленочного защитного экрана, экспериментальным путем определены его гидравлические параметры, описаны огневые испытания разработанного экрана и приведены их результаты, рассмотрен лафетный пожарный комплекс, элементом которого является водоупленочный защитный экран.

Совместно со специалистами ООО «Пожнефтехим – Проект» разработан опытный образец экрана, который крепится к трубопроводу лафетного ствола пожарной вышки (рисунок 7).

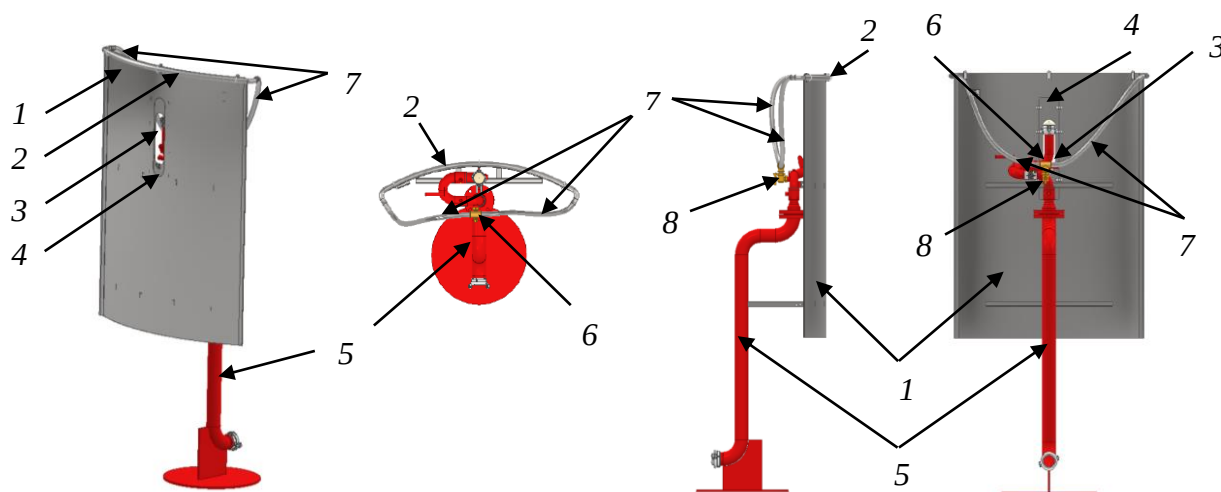


Рисунок 7 – Водоупленочный защитный экран:

- 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 – шаровый кран

Конструктивно экран представляет собой изогнутый щит 1 из нержавеющей стали марки 12X18H10T (высота 1,65 м; ширина 1,25 м; толщина 0,002 м), 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, оборудованное 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 шаровой кран 8.

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. Расход воды, подаваемой на поверхность щита, регистрировался электромагнитным ротаметром *EMF 300E* с погрешностью измерений $\pm 2\%$.

Типичная картина течения водяной пленки по поверхности щита представлена на рисунке 8, а результаты гидравлических испытаний экрана приведены в таблице 2.



Рисунок 8 – Пленочное течение воды на поверхности щита

Таблица 2 – Гидравлические параметры водо пленочного защитного экрана

Наименование параметра	Значение
Схема подачи воды в перфорированный трубопровод	двухсторонняя
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 представляла собой цилиндрический воздуховод с установленным вентилятором и хонейкомбом (диаметр ячейки – 12 мм, ширина ячейки – 100 мм), предназначенным для разрушения крупных вихрей и стабилизации турбулентного потока создаваемого вентилятором. Скорость движения воздуха у экрана измерялась электронным анемометром ТК ПКМ. Взаимное расположение установки для создания ветрового воздействия и экрана при проведении экспериментов представлено на рисунке 9.

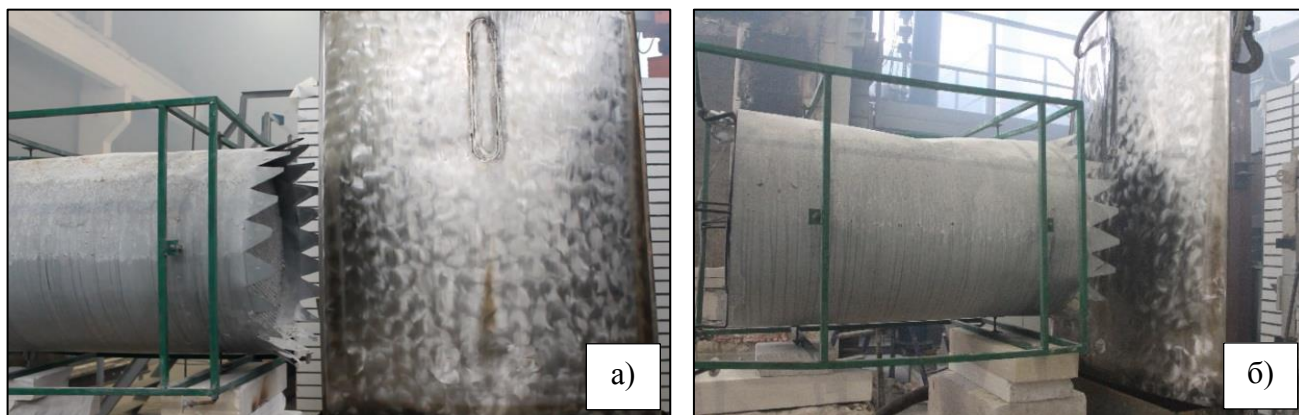


Рисунок 9 – Расположение установки для создания ветрового воздействия и экрана:
а) поперечное; б) фронтальное

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

С целью оценки возможности применения экрана на эстакадах объектов нефтепродуктообеспечения проведены его огневые испытания в лаборатории Национального исследовательского Московского государственного строительного университета. Создание теплового потока, падающего на экран, обеспечивалось в вертикальной огневой печи для испытаний строительных конструкций на огнестойкость (далее печь). 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.

С целью создания температурного режима, необходимого для равномерного нагрева стен печи, ее внутреннее пространство закрывалось ограждающей конструкцией из пенобетонных блоков, в проем которой устанавливался экран (рисунок 10). Для имитации пожара в открытом пространстве между краями экрана и границей проема ограждающей конструкции предусматривался зазор шириной 10 см, который обеспечивал перенос тепла за экран 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 °С.

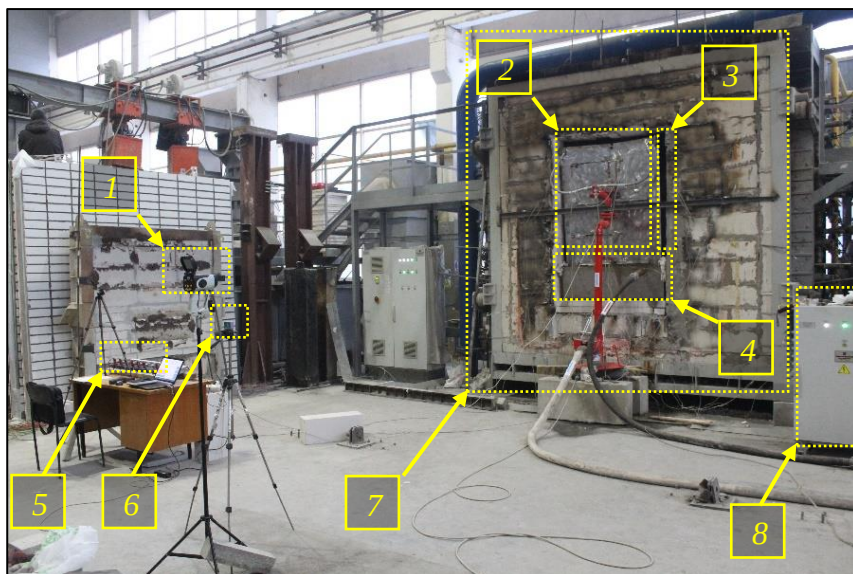


Рисунок 10 – Размещение измерительного оборудования:
 1 – тепловизор;
 2 – экран;
 3 – зазор шириной 10 см;
 4 – противень для сбора воды;
 5 – мультиметры;
 6 – цифровая видеокамера;
 7 – ограждающая конструкция;
 8 – щит сбора данных

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, от которого вода через рукавную линию отводилась в канализацию.

При проведении огневых испытаний для измерения плотности теплового потока применялись приемники теплового потока ПТП-2001. Для регистрации теплового потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, в ограждающей конструкции по периметру проема были просверлены четыре сквозных отверстия, в которые устанавливались ПТП и крепились так, чтобы принимающая поверхность приемника находилась в одной плоскости с внутренней поверхностью ограждающей конструкции. Для регистрации теплового потока с необогреваемой стороны экрана ПТП устанавливались на штативе на расстоянии 0,5 м от щита. Данное 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, которые были закреплены с помощью термостойкого скотча. Регистрация сигналов, передаваемых ПТП, осуществлялась с помощью цифровых мультиметров МУ 60 в диапазоне измерения напряжения от 0 до 200 мВ и погрешностью измерений $\pm 0,5 \% \pm 1$. Регистрация сигналов, передаваемых ТЭП, производилась с помощью щита сбора данных с выводом графиков температуры на монитор компьютера в режиме реального времени.

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 экран 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 $\pm 2,0 \% \pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Степень черноты поверхности нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, применяемой для изготовления щита, определялась экспериментально исходя из условия равенства значений температур, полученных в результате измерения тепловизором и ТЭП. Численное значение степени черноты в интервале измеренных температур составило 0,55. Типичная термограмма и оптическое изображение, зарегистрированные тепловизором, представлены на рисунке 11.

График изменения среднеобъемной температуры среды во внутреннем пространстве огневой печи представлен на рисунке 12. Необходимо отметить, что при пожаре пролива нефтепродукта на эстакаде температура газовой среды вблизи экрана будет ниже. Это обстоятельство обусловлено тем, что на реальном объекте пожар происходит в открытом пространстве, а зона пламенного горения расположена значительно дальше. Графики зависимости осредненных значений температуры и плотности теплового потока от времени представлены на рисунках 13–15.

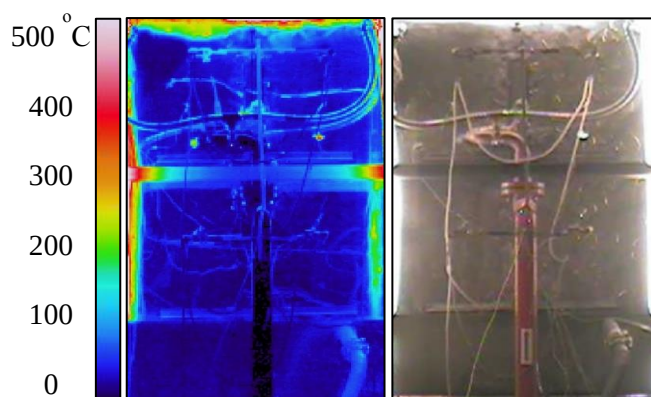


Рисунок 11 – Типичная термограмма и оптическое изображение, регистрируемые тепловизором

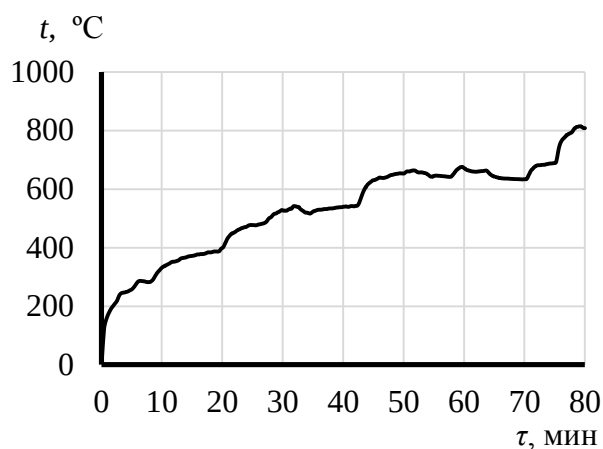


Рисунок 12 – Среднеобъемная температура в вертикальной огневой печи при проведении огневых испытаний

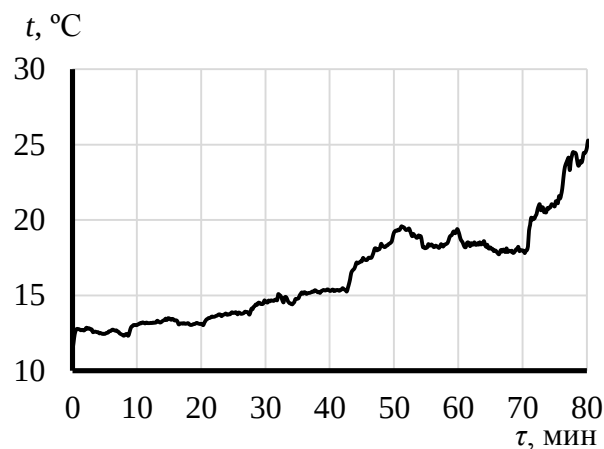


Рисунок 13 – Зависимость осредненной температуры необогреваемой поверхности экрана от времени

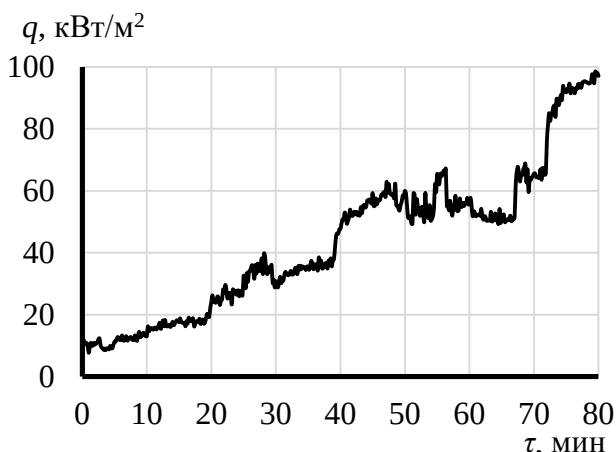


Рисунок 14 – Зависимость осредненной плотности теплового потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, от времени

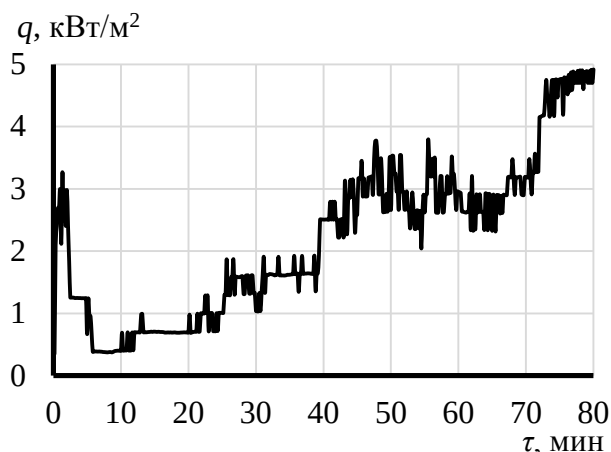


Рисунок 15 – Зависимость осредненной плотности теплового потока, падающего на ствольщика, от времени

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 необогреваемой 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 16):

$$E = \varepsilon \sigma_0 T^4, \quad (14)$$

где ε – экспериментально определенная степень черноты, $0,55$; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8}\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4)$; T – осредненные значения температуры, полученные группой датчиков, установленных на необогреваемой поверхности экрана, К.

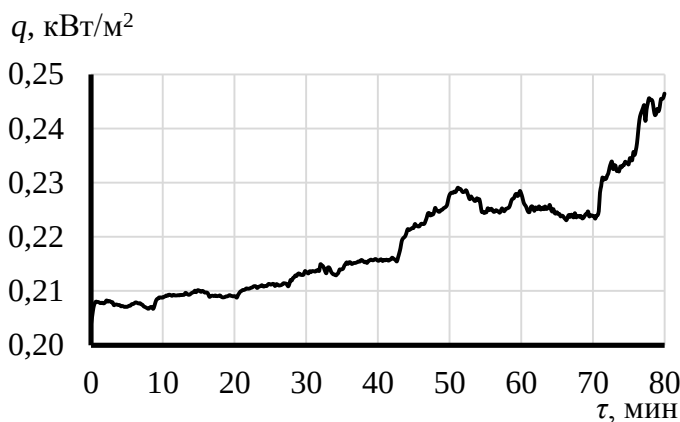


Рисунок 16 – Зависимость осредненной плотности теплового потока излучения необогреваемой поверхности экрана

Анализ графиков, представленных на рисунках 15 и 16, 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 экрана, является коэффициент ослабления теплового потока (k), который представляет собой отношение осредненных плотностей

теплового потока, падающего на обогреваемую сторону экрана и ствольщика. 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 графики для коэффициента ослабления теплового потока экрана с учетом конвективного течения продуктов сгорания за экраном и без него (рисунок 17).

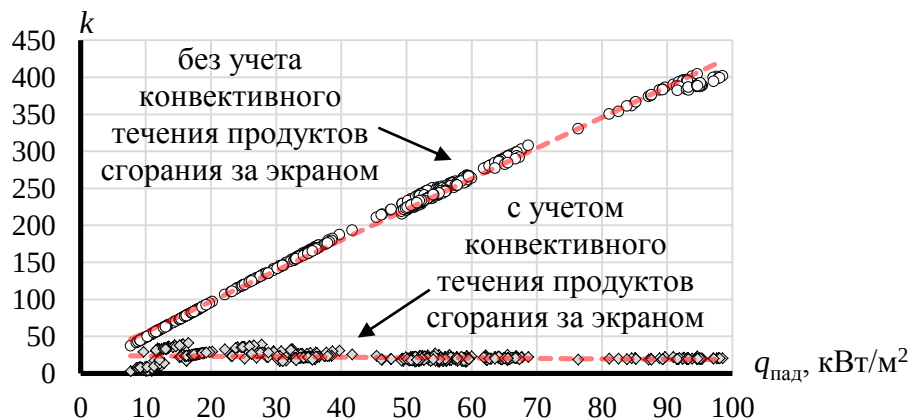


Рисунок 17 – Коэффициент ослабления плотности теплового потока

Анализ графиков, представленных на рисунке 17, позволил сделать вывод, что коэффициент ослабления теплового потока в случае отсутствия воздействия конвективных течений высоконагретых продуктов сгорания в рабочей зоне ствольщика пропорционален плотности теплового потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, и описывается следующей формулой с величиной достоверности аппроксимации 0,996:

$$k = 4,143q_{\text{пад}} + 14,449, \quad (15)$$

где $q_{\text{пад}}$ – 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 после завершения огневых испытаний не выявил 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 испытаний не утратил свои функциональные свойства.

Таким образом, сделан вывод о том, что разработанный экран соответствует требованиям 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/м². Пример установки серийного образца защитного экрана в составе лафетного пожарного комплекса представлен на рисунке 18.



Рисунок 18 – Общий вид
водопленочного защитного экрана
в составе лафетного пожарного комплекса

Заключение содержит констатацию основных научных и практических результатов работы. В **приложении** представлены акты внедрения результатов диссертации.

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 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). 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 смещения 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 .

Основные научные результаты работы опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. Воробьев, В.В. Валидация моделей программного пакета *Ansys Fluent* для определения параметров пожара пролива нефтепродуктов [Текст] / В.В. Воробьев, Р.К. Ибатулин, А.С. Игнатцев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация: научный журнал. – 2018. – № 3. – С. 15-20. – DOI: 10.25257/FE.2018.3.15-20.

2. Ибатулин, Р.К. Результаты огневых испытаний водопленочного защитного экрана [Электронный ресурс] / Р.К. Ибатулин [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 2. – 13 с. – DOI: 10.25257/TTS.2019.2.84.14-26 – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2019-2/08-02-19.ttb.pdf>. (дата обращения 17.07.2019).

3. Ибатулин, Р.К. Водопленочный защитный экран от теплового излучения пожара пролива нефтепродуктов на железнодорожной сливноналивной эстакаде [Электронный ресурс] / Р.К. Ибатулин // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 3. – 13 с. – DOI: 10.25257/TTS.2019.3.85.24-36 – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2019-3/10-03-19.ttb.pdf>. (дата обращения 07.10.2019).

Остальные публикации по теме диссертации:

4. Воробьев, В.В. Численное моделирование пожара пролива бензина на сливноналивной железнодорожной эстакаде при ветровом воздействии [Текст] / В.В. Воробьев [и др.] // Пожары чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация: научный журнал. – 2019. – № 1. – С. 47-55. – DOI: 10.25257/FE.2019.1.47-55.

5. Ибатулин, Р.К. Численное моделирование горения бензина методом крупных вихрей в программном комплексе *Ansys Fluent* [Текст] / Р.К. Ибатулин // 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.

6. Ибатулин, Р.К. Экспериментальное исследование лучистого теплового потока пламени бензина при ветровом воздействии [Текст] / Р.К. Ибатулин // Материалы научно-практической конференции «Школа молодых ученых и специалистов МЧС России-2018». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 105-109.

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

8. Ибатулин, Р.К. Численное моделирование пожара пролива в программном комплексе *Ansys Fluent* при ветровом воздействии [Текст] / Р.К. Ибатулин // 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. – Компьютерные файлы: 11,1 Мб. – ISBN 978-5-6042853-0-5. – Режим доступа: <http://edufire37.ru/files/2018-2019/Сборник%202019.pdf> (дата обращения: 09.06.2019).

9. Игнатцев, А. С. Реализация принципов технического регулирования при обосновании проектных решений систем безопасности [Текст] / А. С. Игнатцев, В.В. Воробьев, Р.К. Ибатулин // 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.

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

Подписано в печать 10.01.2020. Формат 60x84/1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 10.

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4