

Р. К. Ибатулин

(Академия ГПС МЧС России; e-mail: irk.agps@mail.ru)

ВОДОПЛЁНОЧНЫЙ ЗАЩИТНЫЙ ЭКРАН ОТ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЖАРА ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЛИВОНАЛИВНОЙ ЭСТАКАДЕ

Представлен разработанный специалистами Академии ГПС МЧС России и ООО "Пожнефтехим – Проект" водоплёночный защитный экран, предназначенный для снижения плотности падающего лучистого теплового потока на ствольщика при пожаре пролива нефтепродуктов на железнодорожной сливноналивной эстакаде. Возможность применения водоплёночного защитного экрана на объектах нефтепродуктообеспечения подтверждена результатами теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: пожар пролива, железнодорожная сливноналивная эстакада, железнодорожная цистерна, водоплёночный защитный экран, численное моделирование, огневые испытания.

Одним из наиболее востребованных способов транспортировки нефтепродуктов к местам хранения, распределения и потребления является их перевозка железнодорожным транспортом [1]. Процессы заполнения и опорожнения **железнодорожных цистерн (ЖДЦ)** осуществляются на железнодорожных **сливноналивных эстакадах (СНЭ)**, 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. Воздействие открытого пламени на корпус цистерны с нефтепродуктом приводит к её взрыву с образованием огненного шара. В связи с этим, ликвидация подобного рода пожаров является одной из наиболее сложных и опасных задач для подразделений пожарной охраны.

В соответствии с нормативными документами по пожарной безопасности, 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 со сводом правил "Склады нефти и нефтепродуктов", стационарные лафетные стволы рекомендуется оборудовать **водоплёночными экранами (ВПЭ)**, обеспечивающими снижение теплового потока на ствольщика в специальной защитной одежде 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 подаётся вода, распыляемая форсунками [2, 3];

- экраны, изготовленные из двух листов металла, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом¹.

Основной недостаток сетчатых экранов обусловлен возможностью засорения форсунок продуктами коррозии трубопроводов и другими механическими примесями при подаче воды на тушение пожара (площадь выходного отверстия форсунки – 4 мм²).

Вторые экраны уступают по эффективности водоплёночным защитным экранам, поскольку в них отсутствует непрерывный отвод тепла от их конструктивных элементов на всём протяжении теплового воздействия.

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

Для обоснования параметров водоплёночного защитного экрана 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^{2,3,4} по определению параметров процессов горения нефтепродуктов, не позволяют получить достоверные результаты, так как реализованы на основании эмпирических и полуэмпирических методов и не учитывают влияние ЖДЦ, находящихся над очагом пожара, на структуру пламени. Необходимо добавить, что процессы горения, образования сажи, теплового излучения пламени и его рассеяния в атмосфере отличаются сложным взаимным влиянием, которые учесть в рамках упрощённых аналитических соотношений практически невозможно. Всё это определяет необходимость использования для решения подобного рода задач методов численного моделирования на основе пакетов вычислительной гидродинамики (*CFD* пакеты). При таком моделировании сложная взаимосвязь тепло- и массообменных процессов, сопровождающих развитие пожара, учитывается посредством совместного решения дифференциальных уравнений переноса массы, импульса, энергии и турбулентных характеристик [4].

¹ Пат. 65767 Российская Федерация, МПК А62С39/00, А62С27/00. Защитный экран пожарного лафетного ствола (варианты) / 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.;

² Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах;

³ ГОСТ Р 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля;

⁴ Методика оценки пожаробезопасных расстояний при проектировании промышленных предприятий

Для моделирования пожара пролива и прогнозирования плотности теплового потока на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ было принято решение использовать один из пакетов вычислительной гидродинамики *ANSYS Fluent*, который содержит широкий набор верифицированных моделей, обеспечивающих быстрое получение точных результатов для широкого круга задач [5-7].

Для решения задачи были выбраны: модель турбулентности *LES (Large Eddy Simulation)* с подсеточной моделью *Smagorinsky-Lilly*; модель горения *Eddy Dissipation*; модель излучения *Discrete Ordinates*; модель образования сажи *Moss-Brookes* [5-7] с моделью окисления *Lee* [12].

С целью определения возможности применения выбранных моделей для расчётного определения плотности лучистого теплового потока при пожаре на СНЭ была проведена их успешная валидация путём сравнения результатов численного моделирования и экспериментального исследования горения бензина в противне диаметром 1 м (рис. 1) [11].

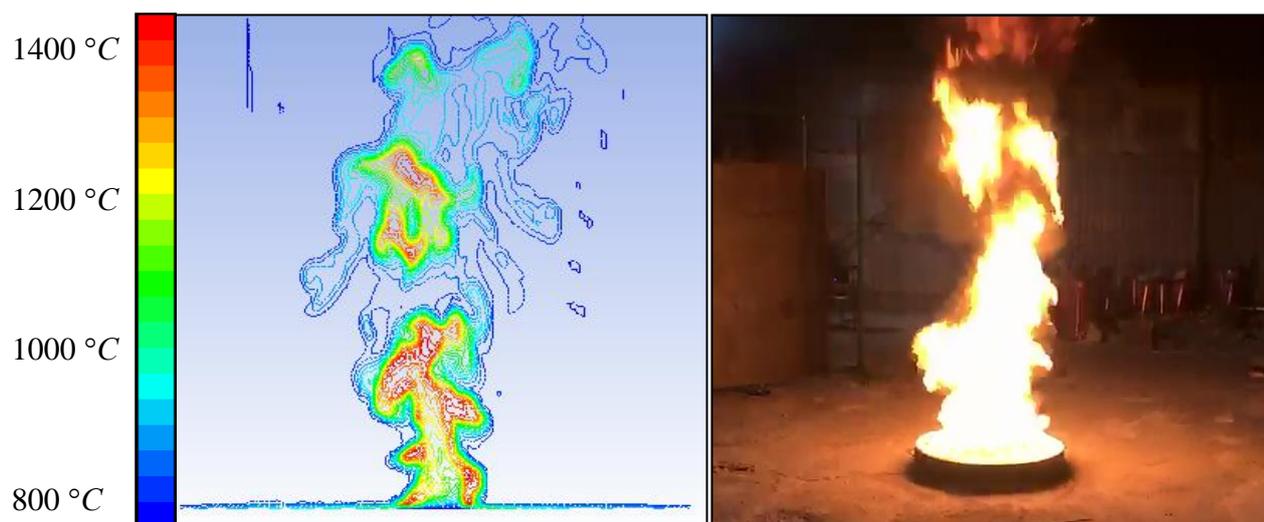


Рис. 1. Сравнение контуров мгновенных разрешенных температур, полученных в результате численного моделирования и экспериментального исследования [11]

Задача о моделировании пожара пролива бензина на СНЭ [10] решалась в нестационарной постановке, теплообмен между пламенем и котлом железнодорожной цистерны не учитывался. Измерение плотности лучистого потока производилось на поверхности плоских элементарных площадок диаметром 0,1 м, расположенных равномерно по высоте расчётной области на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ.

Контуры светящейся зоны пламени, идентифицированные по изоповерхности с температурной 850 K [13], и распределение плотности лучистого потока на уровне земли при различных скоростях ветра представлены на рис. 2.

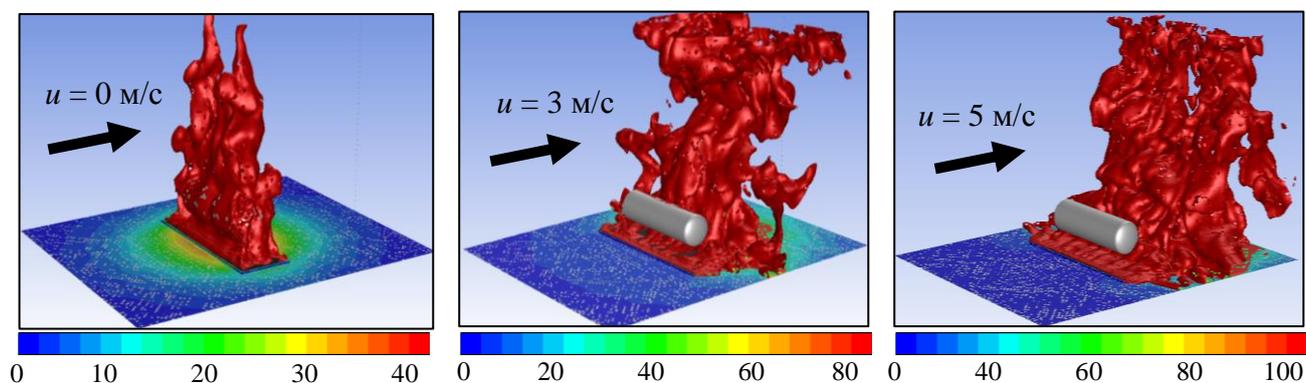


Рис. 2. Изоповерхности температуры и распределение плотности падающего лучистого потока (q , kВт/м^2) на уровне земли при различных скоростях ветра [10]

Номограмма для определения средних значений плотности лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону ВПЭ, расположенного на пожарной вышке на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ, в зависимости от высоты при различных скоростях ветра изображена на рис. 3.

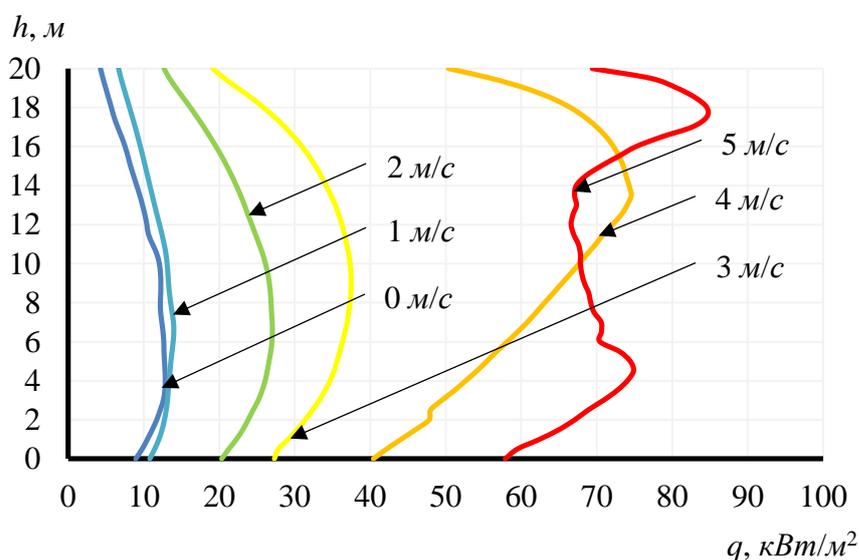


Рис. 3. Номограмма для определения средних значений плотности лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, от высоты при различных скоростях ветра [10]

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/м^2 .

Если использование пожарной вышки, расположенной с наветренной стороны напротив очага пожара при указанных скоростях ветра, не представляется возможным, то 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.

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.

Совместно со специалистами ООО "Пожнефтехим – Проект" и Академией Государственной противопожарной службы МЧС России был разработан опытный образец экрана, который крепится к трубопроводу лафетного ствола пожарной вышки (рис. 4) [8].

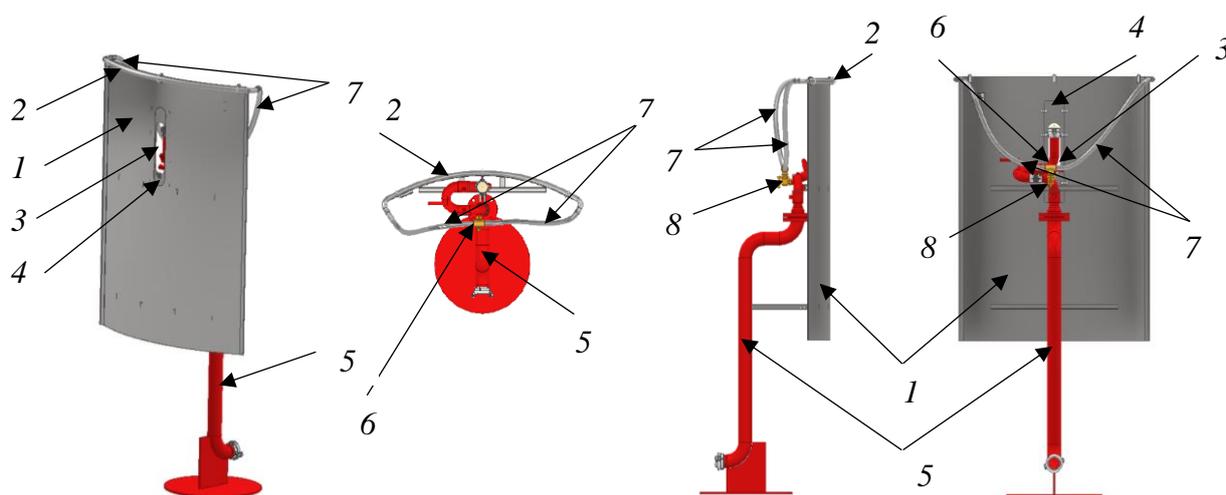


Рис. 4. Водопленочный защитный экран:

- 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

ВПЭ представляет собой изогнутый щит 1 (рис. 4) из нержавеющей стали, в верхней части которого предусмотрен перфорированный трубопровод 2 для создания на обогреваемой поверхности щита сплошной водяной плёнки. 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 оплётке 7. Для регулировки расхода воды, подаваемой в гибкие шланги, используется шаровой кран 8.

С целью определения возможности применения экранов на объектах нефтепродуктообеспечения были проведены огневые испытания экрана в лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, условия которых должны быть максимально приближены к реальным [8]. Необходимо отметить, что методики таких испытаний, утвержденной в установленном порядке, в настоящее время не имеется [9].

Огневые испытания проводились с применением вертикальной огневой печи для испытания строительных конструкций на огнестойкость (рис. 5) [14, 15]. Выбор огневой печи для проведения испытаний был обусловлен возможностью регулировки плотности теплового потока, падающего на обогреваемую поверхность щита, путём изменения расхода природного газа, подаваемого на горелки.

Для обеспечения стационарного теплового потока, падающего на обогреваемую сторону ВПЭ, в качестве нагревательных элементов были использованы газовые горелки, исключающие крупномасштабные пульсации пламени, характерные для пожара пролива нефтепродуктов [14, 15].

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 плёнки на обогреваемой поверхности щита.

Для сбора воды, стекающей со щита, в проёме ограждающей конструкции был установлен противень с быстроразъемным соединением (рис. 5), от которого вода через рукавную линию отводилась в канализацию.

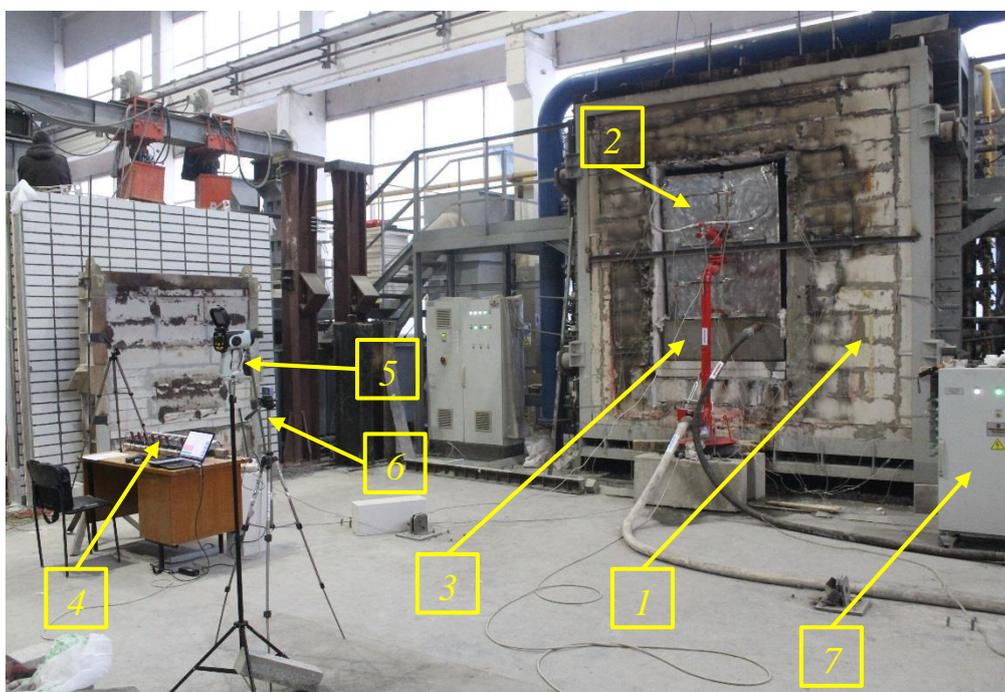


Рис. 5. Размещение измерительного оборудования:
1 – огневая печь; 2 – ВПЭ; 3 – противень для сбора воды; 4 – мультиметры;
5 – тепловизор; 6 – цифровая видеокамера; 7 – щит сбора данных

В ходе проведения огневых испытаний регистрировались следующие параметры:

- температура во внутреннем пространстве печи;
- температура необогреваемой поверхности ВПЭ;
- плотность теплового потока, падающего на обогреваемую сторону ВПЭ;
- плотность теплового потока, падающего на ствольщика.

Плотность теплового потока, падающего на обогреваемую поверхность щита, достигала 100 кВт/м^2 , данное значение определялось верхней границей диапазона измерения приемников теплового потока. Общее время теплового воздействия на ВПЭ составило 80 мин.

Графики зависимости осредненных значений температуры и плотности теплового потока от времени представлены на рис. 6-9.

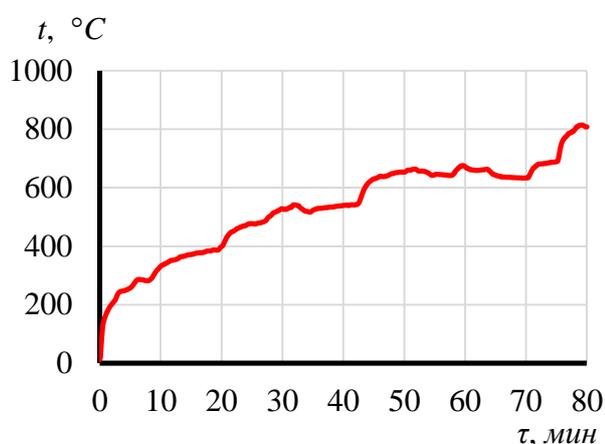


Рис. 6. Среднеобъемная температура в вертикальной огневой печи при проведении огневых испытаний

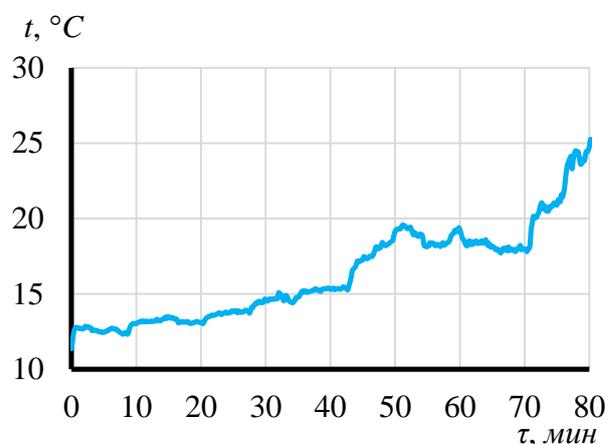


Рис. 7. Зависимость осредненной температуры необогреваемой поверхности экрана от времени

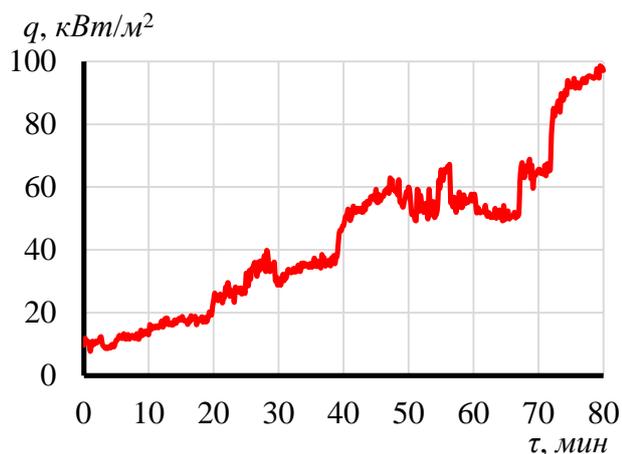


Рис. 8. Зависимость осредненной плотности теплового потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, от времени

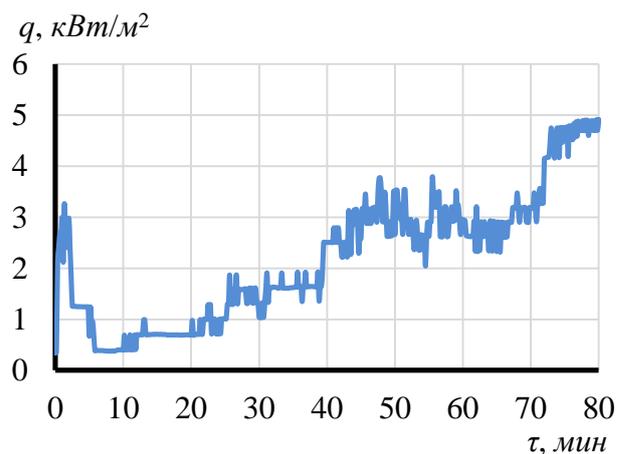


Рис. 9. Зависимость осредненной плотности теплового потока, падающего на ствольщика, от времени

Типичная термограмма и оптическое изображение, зарегистрированные тепловизором на необогреваемой стороне ВПЭ, представлены на рис. 10.

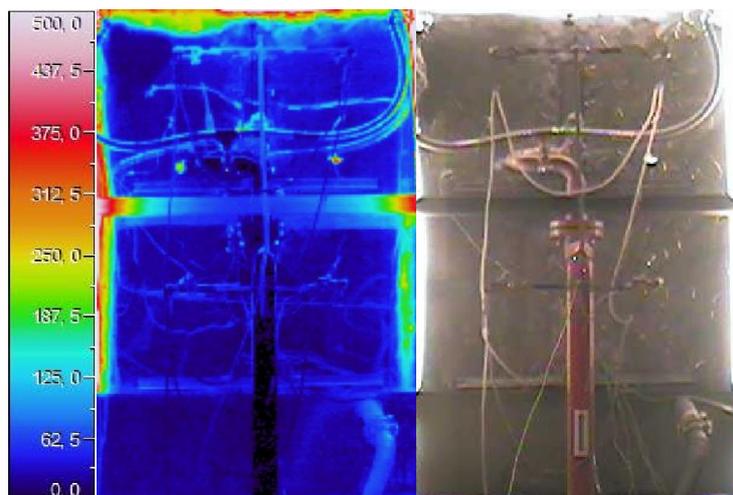


Рис. 10. Типичная термограмма и оптическое изображение, регистрируемые тепловизором (единицы измерения шкалы температуры, представленной на рисунке, – градусы Цельсия)

В связи с тем, что осреднённая 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 приёмников 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 (рис. 11).

Анализ графиков, представленных на рис. 9 и 11, 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 учётом конвективного течения продуктов сгорания за экраном и без него (рис. 12).

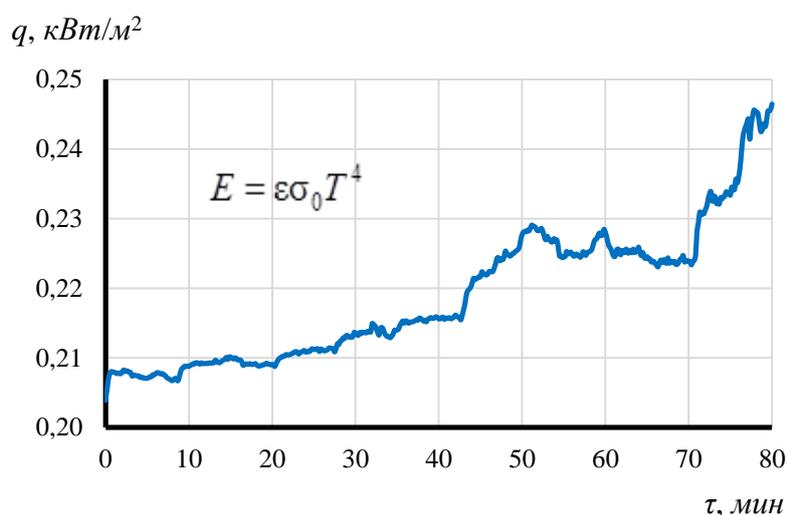


Рис. 11. Зависимость осредненной плотности теплового потока излучения необогреваемой поверхности экрана от времени:

ε – экспериментально определенная степень черноты, 0,55;

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

T – осредненные значения температуры, полученные группой датчиков, установленных на необогреваемой поверхности экрана, К

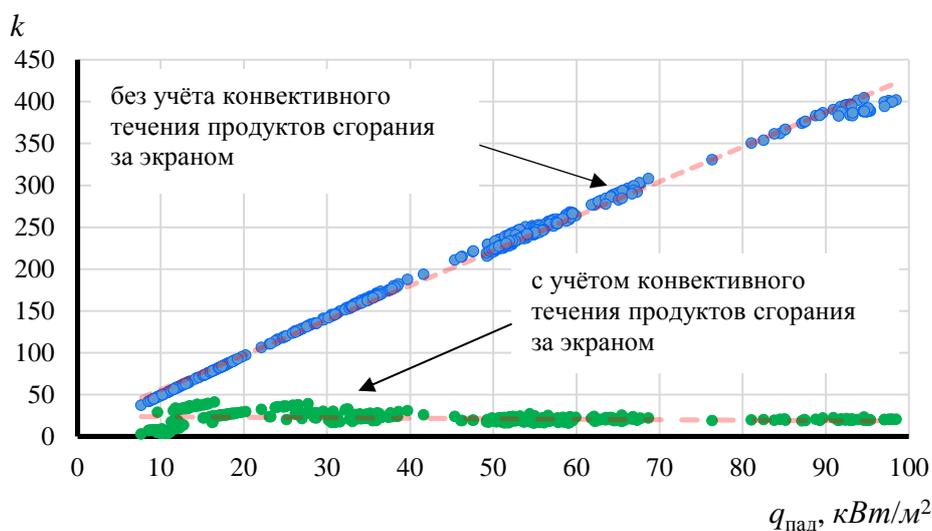


Рис. 12. Коэффициент ослабления плотности теплового потока

В результате анализа полученных данных был сделан вывод, что разработанный ВПЭ при воздействии теплового потока плотностью до $100 \text{ кВт}/\text{м}^2$ обеспечивает его снижение до допустимых значений (плотность тепловых потоков, падающего на ствольщика, не превышает $5 \text{ кВт}/\text{м}^2$).

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 плёнки 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/м^2 . Пример установки серийного образца защитного экрана в составе лафетного пожарного комплекса представлен на рис. 13.



Рис. 13. Общий вид водопленочного защитного экрана в составе лафетного пожарного комплекса

Литература

1. Российский статистический ежегодник. 2018. М.: Росстат, 2018. 694 с.
2. Шимко В. Ю. Использование водоуплённых теплозащитных экранов для защиты от теплового излучения при горении проливов сжиженного природного газа // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22. № 12. С. 63-67.
3. Шимко В. Ю. Новый тип противопожарных преград для объектов нефтегазового комплекса // 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.
4. Снегирев А. Ю. Основы теории горения: учеб. СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2014. 352 с.
5. ANSYS FLUENT: Solver Theory Guide, Release 14.0: ANSYS, Inc., 2011.
6. ANSYS FLUENT: Solver Modeling Guide, Release 14.0: ANSYS, Inc., 2011.
7. ANSYS FLUENT: Tutorials, Release 14.0: ANSYS, Inc., 2011.
8. Ибатулин Р. К., Веселов Е. Д., Панов С. А., Воробьев В. В., Швырков С. А. Результаты огневых испытаний водоуплённого защитного экрана // Технологии техносферной безопасности. Вып. 2 (84). 2019. С. 14-26. <http://academygps.ru/ttb>. DOI: 10.25257/TTS.2019.2.84.14-26.
9. Копылов Н.П., Хасанов И.Р. Эффективность применения теплозащитных экранов для защиты от тепловых потоков при пожарах // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 11. С. 38-43.
10. Воробьев В. В., Ибатулин Р. К., Петров А. П., Веселов Е. Д., Панов С. А. Численное моделирование пожара пролива бензина на сливноналивной железнодорожной эстакаде при ветровом воздействии // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 1. С. 47-55. DOI: 10.25257/FE.2019.1.47-55.
11. Воробьев В. В., Ибатулин Р. К., Игнатцев А. С. Валидация моделей программного пакета ANSYS Fluent для определения параметров пожара пролива нефтепродуктов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 3. С. 15-20. DOI: 10.25257/FE.2018.3.15-20.
12. Lee K. B., Thring M. W., Beér J. M. On the rate of combustion of soot in a laminar soot flame // Combustion and Flame. Vol. 6. No. 8. 1962. Pp. 437-443.
13. Астапенко В. М., Кошмаров Ю. А., Молчадский И. С., Шевляков А. Н. Термогазодинамика пожаров в помещениях. М.: Стройиздат, 1988. 448 с.
14. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е. Оценка пульсаций пламени при горении нефтепродуктов // Радиоэлектроника и информатика. 2006. № 1. С. 40-42. <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-pulsatsiy-plameni-pri-gorenii-nefteproduktov>.
15. Старков Н. Н. Тушение пожаров нефтепродуктов и полярных жидкостей в резервуаре диоксидом углерода твердым гранулированным: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. 174 с.

Материал поступил в редакцию 4 мая 2019 г.

Для цитирования: Ибатулин Р. К. Водоуплённый защитный экран от теплового излучения пожара пролива нефтепродуктов на железнодорожной сливноналивной эстакаде // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 3 (85). – 2019. – С. 24-36. DOI: 10.25257/TTS.2019.3.85.24-36.

R. K. Ibatulin

WATER-FILM PROTECTIVE SHIELD AGAINST THERMAL RADIATION FROM A FIRE AS A RESULT OF OIL PRODUCTS SPILL ON A RAILWAY LOADING DOCK

The article provides information on the results of fire tests of a water-film protective shield (WFPS).

Methods. The data on heat fluxes are obtained on the basis of an experimental study in a vertical fire furnace. The parameters of heat fluxes at the place of location of the nozzleman on the fire tower are determined using computational fluid dynamics methods.

Results. Models of the ANSYS Fluent software package for determining the parameters of the fire of a spill of oil products were selected. The values of the density of the heat flux incident on the heated side of the WFPS installed on the fire tower, on the tank car loading on the wind exposure are obtained. The screen provides a decrease in heat flux of not less than 22 times.

Scope of the results. The obtained data can be used to justify the density of the incident radiant heat flux during field fire tests of WFPS. The results of fire tests can be used to justify the requirements for the design of WFPS.

Findings. It is proposed to use the turbulence model, the combustion model, the radiation model, and the model of soot formation for numerical simulation of a fire of a spill of oil products in the ANSYS Fluent software package. The developed WFPS meets the requirements of regulatory documents and provides a reduction in heat flux density to acceptable values – no more than 5 kW/m^2 for a nozzleman, located behind the screen, in special protective clothing of a firefighter and can be used at oil supply facilities, where the amount of heat flux incident on the screen, does not exceed 100 kW/m^2 .

Key words: pool fire, railway loading dock, railway tank, water-film protective shield, numerical simulation, fire tests.

References

1. *Rossijskij statisticheskij ezhegodnik* [Russian Statistical Yearbook]. 2018, Moscow, Rosstat Publ., 2018, 694 p.
2. Shimko V. Yu. Application of water-film heat-reflecting shields for protection against thermal radiation arising from burning spills of liquefied natural gas. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 63-67 (in Russian).
3. Shimko V. Yu. *Novyj tip protivopozharnyh pregrad dlya obektov neftegazovogo kompleksa* [New type of fire barriers for oil and gas facilities]. *Materialy XXIX mezhdunarodnoj nauchn.-prakt. konf., "Gorenie i problemy tusheniya pozharov"* [Proceed. of XXIX International Scientific-Practical Conference "Combustion and the problem of extinguishing fires"], Moscow, Higher engineering fire-technical school of Emercom of Russia Publ., 2017, part 2, pp. 175-177.
4. Snegirev A. Yu. *Osnovy teorii goreniya: ucheb.* [The basics of combustion theory: a textbook]. Saint Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2014, 352 p.
5. ANSYS FLUENT: Solver Theory Guide, Release 14.0: ANSYS, Inc., 2011.
6. ANSYS FLUENT: Solver Modeling Guide, Release 14.0: ANSYS, Inc., 2011.
7. ANSYS FLUENT: Tutorials, Release 14.0: ANSYS, Inc., 2011.
8. Ibatulin R. K., Veselov E. D., Panov S. A., Vorobyev V. V., Shvyrkov S. A. Results of fire tests of water-film protective screen. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 2 (84), 2019, pp. 14-26. Available at: <http://academygps.ru/ttb> (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.14-26.
9. Kopylov N. P., Khasanov I. R. Efficiency of thermal shields application for protection against thermalflows in case of fires. *Bezopasnost truda v promyshlennosti / Occupational safety in industry*. 2016, no. 11, pp. 38-43 (in Russian).

10. Vorobyev V. V., Ibatulin R. K., Petrov A. P., Veselov E. D., Panov S. A. Numerical modeling of a gasoline spill fire on the loading / unloading railway overpass in windy weather. *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiia / Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2019, no. 1, pp. 47-55 (in Russian). DOI: 10.25257/FE.2019.1.47-55.
11. Vorobyev V. V., Ibatulin R. K., Ignattsev A. S. Validation of ANSYS Fluent software package models to determine the parameters of petroleum products spill fires. *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiia / Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2018, no. 3, pp. 15-20 (in Russian). DOI: 10.25257/FE.2018.3.15-20.
12. Lee K. B., Thring M. W., Beér J. M. On the rate of combustion of soot in a laminar soot flame. *Combustion and Flame*. Vol. 6, no. 8, 1962, pp. 437-443.
13. Astapenko V. M., Koshmarov Yu. A., Molchadskij I. S., Shevlyakov A. N. Termogazodinamika pozharov v pomeshcheniyah [Thermogasdynamics of indoor fires]. Moscow, Strojizdat Publ., 1988, 448 p.
14. Abramov Yu. A., Basmanov A. E. *Ocenka pul'sacij plameni pri gorenii nefteproduktov* [Evaluation of flame pulsations during the combustion of oil products]. *Radioelektronika i informatika / Radioelectronics and informatics*. 2006, no. 1, pp. 40-42. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-pulsatsiy-plameni-pri-gorenii-nefteproduktov>.
15. Starkov N. N. *Tushenie pozharov nefteproduktov i polyarnyh zhidkostej v rezervuare dioksidom ugleroda tverdym granulirovannym* [Fire extinguishing of petroleum products and polar liquids in a tank with carbon dioxide solid granular]. PhD in Tech. Sci. diss., 05.26.03. Moscow, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia Publ., 2006, 174 p.

For citation: Ibatulin R. K. Water-film protective shield against thermal radiation from a fire as a result of oil products spill on a railway loading dock. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 3 (85), 2019, pp. 24-36 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2019.3.85.24-36.