
ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 331.45

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗВИТИЯ ПОЖАРООПАСНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ХРАНЕНИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ В СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ

✉ Бруслиновский Александр Юрьевич;

Самигуллин Гафур Халафович;

Нефедьев Сергей Аркадьевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ alexander.bruslinovsky@mail.ru

Аннотация. Выполнение требований по безопасной эксплуатации взрывопожароопасных объектов обуславливает необходимость всесторонней оценки возможности прогрессирующего (каскадного) развития пожароопасной ситуации на объекте защиты. В особенности эта проблема является актуальной для нефтехранилищ и нефтебаз, где хранится и обращается значительный объем нефти и нефтепродуктов. В дополнение к существующим вероятностным методам оценки возможности развития аварийных ситуаций по принципу «домино» был предложен расчетный метод оценки возможности аварийной разгерметизации емкости для хранения бензина в условиях пожара. В данной статье приведен один из способов моделирования пожароопасной ситуации, произведены расчеты для определения прочности резервуаров хранения нефтепродуктов. А также построена модель, показывающая при каких обстоятельствах и характеристиках произойдет возгорание резервуара.

Ключевые слова: пожароопасная ситуация, каскадное развитие, вертикальный стальной резервуар, хранение бензина, конечно-элементная модель

Для цитирования: Бруслиновский А.Ю., Самигуллин Г.Х., Нефедьев С.А. Моделирование прогрессирующего развития пожароопасной ситуации при хранении нефтепродуктов в стальных резервуарах // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 2. С. 1–9.

Scientific article

MODELING OF THE PROGRESSIVE DEVELOPMENT OF A FIRE-HAZARDOUS SITUATION DURING THE STORAGE OF PETROLEUM PRODUCTS IN STEEL TANKS

✉ Bruslinovsky Alexander Yu.;

Samigullin Gafur Kh.;

Nefediev Sergey A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ alexander.bruslinovsky@mail.ru

Abstract. Compliance with the requirements for the safe operation of explosion- and fire-hazardous facilities necessitates a comprehensive assessment of the possibility of progressive

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023

(cascade) development of a fire-hazardous situation at the protection facility. In particular, this problem is relevant for oil storage facilities and oil depots, where a significant amount of oil and petroleum products is stored and handled. In addition to the existing probabilistic methods for assessing the possibility of developing emergency situations on the domino principle, a computational method for assessing the possibility of emergency depressurization of a gasoline storage tank in fire conditions was proposed. This article presents one of the ways to simulate a fire-hazardous situation, calculations are made to determine the strength of oil product storage tanks. And also a model was built showing under what circumstances and characteristics the tank will ignite.

Keywords: fire hazard situation, cascade development, vertical steel tank, gasoline storage, finite element model

For citation: Bruslinovsky A.Yu., Samigullin G.Kh., Nefediev S.A. Modeling of the progressive development of a fire-hazardous situation during the storage of petroleum products in steel tanks // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2023. № 2. P. 1–9.

Введение

В современных условиях с ужесточением требований в области безопасности взрывопожароопасных объектов, зачастую возникает необходимость всесторонней оценки мероприятий, реализованных на объекте защиты для исключения каскадного развития пожароопасной ситуации. Актуальность изучения данного вопроса с разных сторон обусловлена тем, что развитие аварии на нефтебазах с последующим возгоранием часто приводит к эскалации пожаров по известному «эффекту домино», и влечет значительный экономический ущерб и негативные экологические последствия.

Цель настоящего исследования состоит в определении динамики температуры стенки резервуара при пожаре, для этого требуется оценить количество теплоты и построить модели прочности резервуара.

В работе [1] приведен обширный анализ более 150 случаев аварийных разрушений вертикальных стальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Результаты анализа свидетельствуют о том, что свыше 50 % рассмотренных аварийных случаев были классифицированы как крупномасштабные с возникновением пожаров, в ходе которых погибло 126 чел., причем третья часть от общего числа разрушений резервуаров вертикальных стальных (РВС) имеет эскалационный характер развития аварийной ситуации.

В отраслевых методических указаниях по повышению устойчивости технологического оборудования к воздействию пожаров и взрывов и предотвращению каскадных эффектов [2] приводятся обобщенные статистические сведения о пожарах в резервуарных парках. Развитие пожароопасных ситуаций с последующим распространением пожара с одного резервуара на резервуарную группу составляет 15 %, а варианты событий с возможным повреждением соседних зданий (сооружений) промышленного предприятия и поражением персонала и населения прилегающих районов составляет около 6 %.

Методы исследования

Понимание важности превентивных мероприятий по предупреждению каскадного характера аварийных и пожароопасных ситуаций привело к созданию Методики оценки пожаробезопасных расстояний при проектировании промышленных предприятий [3]. В методике приводятся упрощенные аналитические выражения, позволяющие определять пожаробезопасные расстояния, исключая прогрессирующее распространение пожара:

$$R_{\text{БЕЗ}} = f(D),$$

где, $R_{\text{БЕЗ}}$ – безопасное расстояние от очага пламени до защищаемого аппарата; $f(D)$ – прогрессирующее распространение пожара.

Поскольку детальные исследования аварийных ситуаций, приводящих к пожарам и могущим в последствии перерасти в крупномасштабные, требуют выполнения значительного количества аналитической и вычислительной работы, основным инструментом является применение специализированных вычислительных комплексов [4]. Предложенный графоаналитический метод моделирования позволяет прогнозировать риски каскадных аварий малогабаритных емкостей, аппаратов колонного типа, вертикальных и горизонтальных цилиндрических резервуаров на основе применения известных пробит-функций.

На сегодняшний день при рассмотрении вопроса обеспечения безопасности эксплуатации оборудования, в котором обращаются различные виды углеводородного сырья и продукты их переработки, используется широкий спектр авторских методик, основанных на научных изысканиях [5], а также методик, включенных в состав действующих нормативных документах [6].

Однако многообразие условий эксплуатации технологического оборудования, содержащего взрывопожароопасные углеводороды, значительное число факторов, влияющих на техническое состояние аппаратов, труднопредсказуемый характер возникновения аварийных ситуаций, требуют совершенствования и дальнейшего развития методов обеспечения пожарной безопасности объектов защиты. Так, в работе [7] на основании экспериментальных и аналитических исследований в области пожарной безопасности резервуарных парков для хранения нефти и нефтепродуктов авторами были разработаны рекомендации для расчетного обоснования геометрических параметров защитной стенки для двухстеночных резервуаров («стакан в стакане»). Кроме того, для предупреждения возможного развития аварийной ситуации в группе резервуаров по принципу «домино» показана необходимость возведения дополнительного ограждения.

Как правило, физическая модель распространения пожара на объектах хранения нефти и нефтепродуктов основывается на известных законах теплопередачи [8], которые описывают процесс переноса теплоты при пожаре на соседние объекты – емкости, которые также могут воспламениться. С целью комплексной оценки возможных вариантов развития аварийных ситуаций на пожароопасных объектах наиболее целесообразно дополнительно учитывать напряженно-деформированное состояние резервуаров и аппаратов, находящихся в зоне воздействия опасных факторов пожара [9]. Известно, что при воздействии высоких температур стальные конструкции теряют свои прочностные свойства, что приводит к деформациям и разрушениям. При нагреве стальных конструкций выше 300 °С прочность материала, начинает снижаться, так как возникает явление, называемое ползучестью металла. Для углеродистых сталей, из которых изготавливаются стальные резервуары, при их нагреве до 500 °С предел текучести и временное сопротивление разрыву снижаются примерно в два раза и более.

С учетом приведенных выше положений, для изучения процесса нагрева стенки резервуара РВС-1000 была разработана модель в программном комплексе Ansys, позволяющая оценить температуру стенки, а также время, за которое она разогреется до такой степени, что бензин, находящийся внутри резервуара, нагреется до температуры самовозгорания, а металл резервуара потеряет прочность, что неизбежно приведет к разрушению резервуара и возникновению каскадного варианта развития аварии. Данная модель решает нестационарную задачу теплопередачи от источника теплового излучения – горящего резервуара до соседнего резервуара с бензином. Для проведения расчета были приняты следующие исходные данные (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные для расчета резервуара РВС-1000

Наименование	Ед. измерения	Значение
Высота, h	м	12
Диаметр, D	м	10,43
Объем, V	м ³	1000

Наименование	Ед. измерения	Значение
Толщина стенки, $h_{ст}$	мм	5
Температура воздуха, t_b	°C	22
Расстояние от стенки РВС-1000 до геометрического центра пролива, r	м	15

При моделировании возгорания пролива бензина принята температура горения $t_6 = 1026$ °C [10], высота пламени $h_0 = 30,2$ м [11] и площадь пролива 300 м². Количество пролитой жидкости 300 л. Модель представляет собой два абсолютно идентичных резервуара, расположенных в группе. Поскольку площадь пролива составила примерно 300 м², было принято, что резервуар, из которого образовался пролив с последующим возгоранием, будет находиться внутри площади горения. Цель моделирования такой ситуации – оценить воздействие теплового потока на соседний резервуар с бензином, целостность которого не нарушена.

Теплообмен в системе «пламя – воздух – стенка» будет, в основном, излучением, тогда количество теплоты по закону Стефана-Больцмана:

$$Q = \sigma \varepsilon_{пр} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \varphi_{21} F_1,$$

где $\sigma = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ – постоянная Стефана-Больцмана; F_1 – площадь поверхности пламени (в данном случае – половина боковой площади «горящего» цилиндра, половина – так как только «половина» излучает тепло в сторону резервуара с бензином); $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} (\frac{1}{\varepsilon_2} - 1)};$$

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{0,85} + \frac{927,134}{282,04} (\frac{1}{0,8} - 1)} = 0,5,$$

где $\varepsilon_1 = 0,85$ – степень черноты пламени [12]; ε_2 – степень черноты стенки (РВС-1000 используется сталь, принимаем $\varepsilon_2 = 0,80$) [13]; F_2 – половина площади боковой поверхности цилиндра плюс площадь крышки резервуара (половина, потому что только одна часть «видит» пламя, вторая находится с другой стороны); φ_{21} – степень взаимной облученности, поскольку цилиндр – выпуклое тело, то $\varphi_{21} = 1$.

Считаем F_2 и F_1 :

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot 2\pi r h + \pi r^2;$$

$$F_2 = 3,14 \cdot 5,215 \cdot 12 + 3,14 \cdot 5,215^2 = 282,04 \text{ м}^2;$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot 2\pi r_{прол} h_0;$$

$$F_1 = 3,14 \cdot 9,77 \cdot 30,2 = 927,134 \text{ м}^2.$$

Количество теплоты:

$$Q = 5,67 \cdot 0,5 \cdot \left[\left(\frac{1026+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{22+273}{100} \right)^4 \right] \cdot 1 \cdot 927,134 = 74704,9 \text{ кВт}.$$

Количество теплоты, полученное резервуаром с нефтепродуктом, будет соответственно в $1/l^2$ раз меньше, где $l = 15 - 9,77 = 5,23$ (под расстоянием здесь имеем в виду расстояние от края резервуара до края пролива):

$$Q_{\Pi} = \frac{Q}{l^2};$$

$$Q_{\Pi} = \frac{74704,9}{5,23^2} = 2733,293 \text{ кВт.}$$

Первым этапом при разработке модели является подготовка геометрии. Расчет проводился с применением модуля Transient Thermal. Вначале, во вкладке Engineering Data, должны быть заданы свойства материала емкости (резервуара). В данный этап входит создание двух тел (источника теплоты – горячий резервуар и резервуар РВС-1000, который выступает в роли теплоприемника) и внесение следующих параметров: расстояние от стенки резервуара до центра пролива, площадь пролива, объем резервуара, свойства жидкости и температура воздуха.

Второй этап включает в себя создание сетки и внесение граничных условий. При выборе параметра «подстраивающийся» – процесс создания сетки происходит автоматически по заданной геометрии. К граничным условиям относим: температуру поверхности источника тепла, плотность теплового потока и коэффициенты теплопередачи (рис. 1).

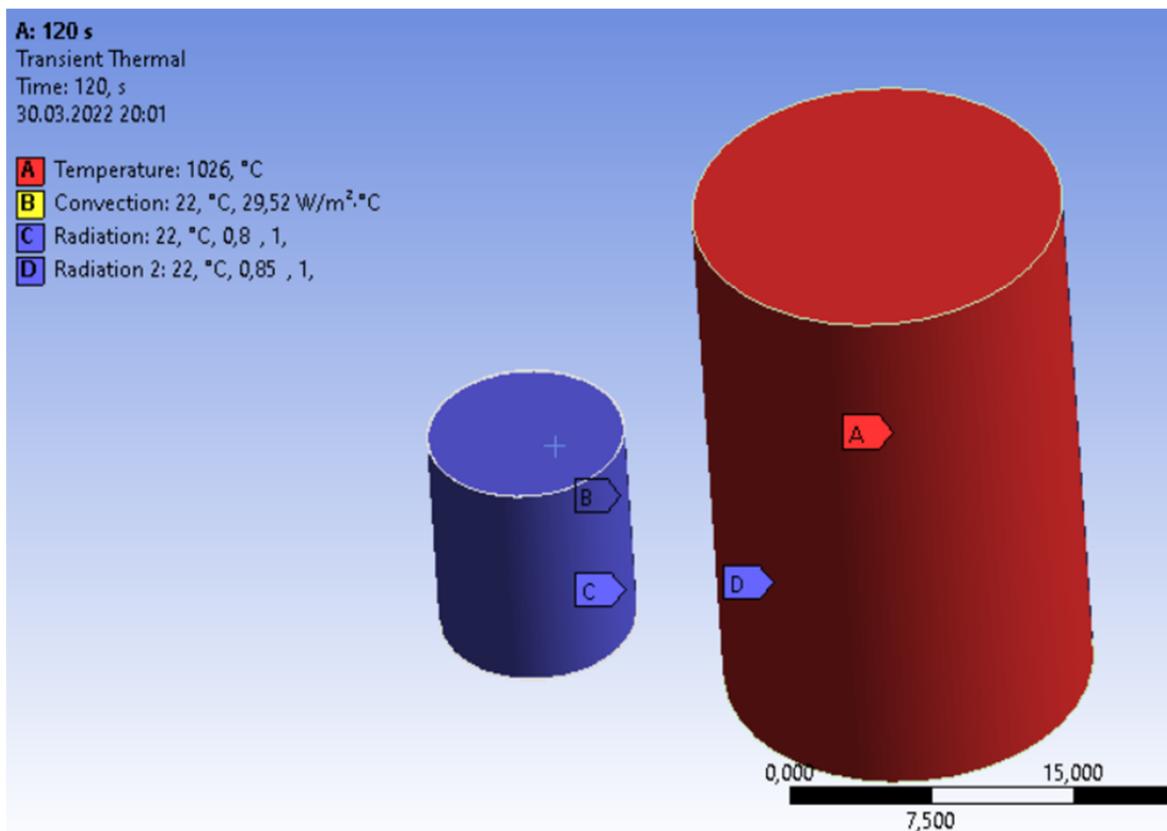


Рис. 1. Граничные условия

Запускаем расчет и получаем максимальную температуру, равную 138,55 °С, что не представляет никакой опасности как для резервуара, так и для жидкости, находящейся внутри него. Проведем аналогичный расчет для 4, 6, 8 и 10 мин (рис. 2).

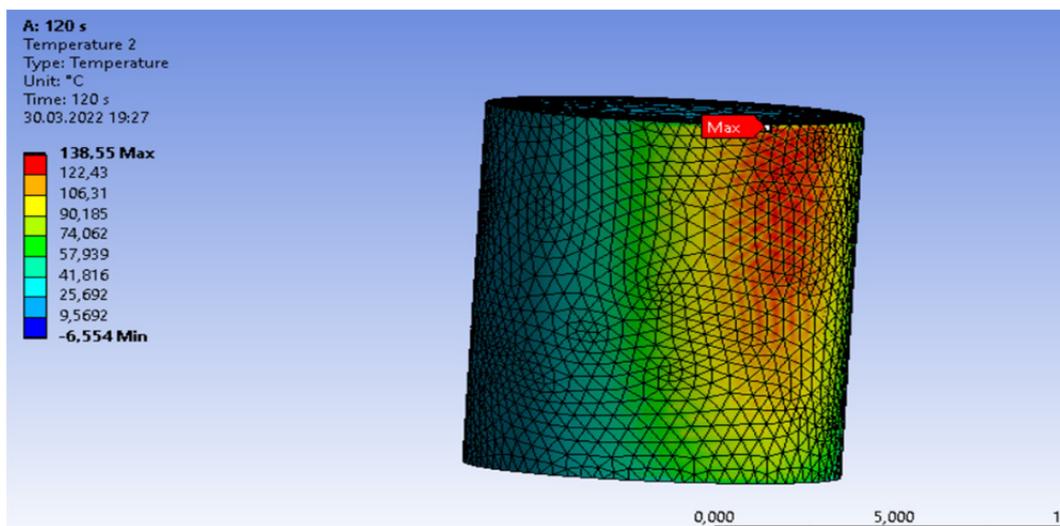


Рис. 2. Распределение температур на поверхности РВС-1000 после 120 с

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты через 10 мин после начала воздействия уже являются опасными как для прочности резервуара, так и для бензина внутри него (рис. 3). Вероятнее всего, воздействие до 10 мин не дойдет, в связи с тем, что температура воспламенения бензина 257 °С, а значение, превышающее этот показатель, будет достигнуто уже ближе к 8 мин, что неизбежно приведет к воспламенению бензина внутри резервуара и потери несущей способности стальных стенок резервуара РВС-1000. Промежуточные результаты расчета представлены в табл. 2.

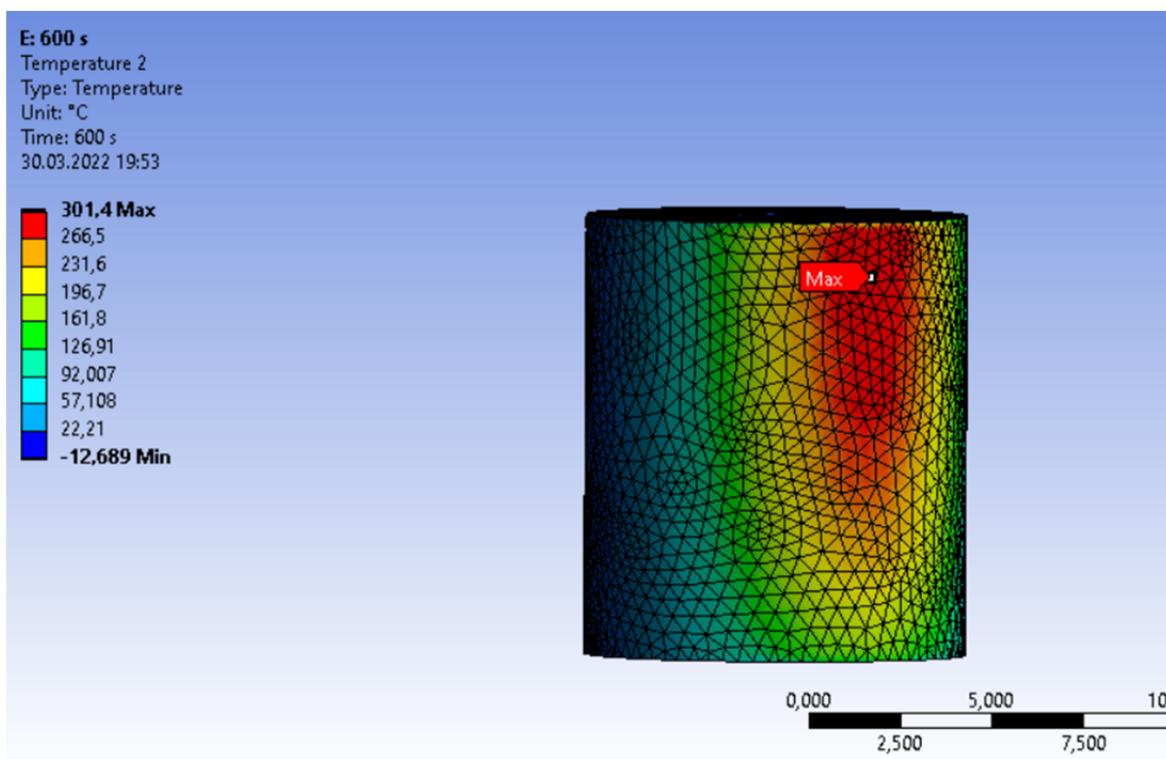


Рис. 3. Распределение температур после 600 с

Результаты моделирования

Время, с	Максимальная температура, °С
120	138,55
240	181,57
360	223,63
480	263,73
600	301,4

С учетом результатов моделирования, типа жидкости и того факта, что бензин самовоспламеняется при температуре 257 °С, можно сделать вывод, что при горении бензина с высотой пламени 30,2 м и площадью пролива 300 м² на расстоянии 15 м от сосуда типа РВС-1000 с бензином, за 6 минут разрушения конструкции не произойдет (так как температуры для тепловых деформаций и напряжений малы), однако при продолжении нагрева до 8 мин – температура стенки становится больше 257 °С и соответственно возникнет угроза самовоспламенения бензина в резервуаре, что приведет к резкому повышению давления и температуры в нем, перегреву стенок и неизбежному разрушению конструкции.

Заключение

Опираясь на вышеприведенные расчеты, можно сделать вывод, что при оценке рисков, в соответствии с Приказом Ростехнадзора [6], комплексный учет воздействия температуры в совокупности с анализом напряженно-деформированного состояния стальных стенок оборудования может значительно повысить достоверность получаемых результатов. Разработку превентивных мероприятий по предотвращению эскалации аварийной ситуации с последующим развитием пожара целесообразно проводить на основе теплотехнического расчета методом конечных элементов и оценки прочности металлов в условиях пожароопасной ситуации.

Список источников

1. Швырков С.А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара: монография. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2015. 289 с.
2. СТО Газпром 2-1.1-356–2009. Методические указания по повышению устойчивости технологического оборудования производственных объектов предприятий ОАО «Газпром» к воздействию пожаров и взрывов и предотвращению каскадных эффектов. М., 2009.
3. Методика оценки пожаробезопасных расстояний при проектировании промышленных предприятий. М.: Изд-во «Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве», 2016. 225 с.
4. Белов Л.Г. Автоматизированное прогнозирование риска каскадных техногенных происшествий // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2013. Т. 3. № 1 (4). С. 13–23.
5. Федорян А.В., Пода Д.В., Бидак Э.В. Расчетное обоснование расстояния между вертикальными стальными резервуарами хранения ЛВЖ с учетом параметра нагрева стенки от пожара // Техносферная безопасность. Современные реалии. 2018. С. 25–34.
6. Об утверждении руководства по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»: приказ Ростехнадзора от 11 апр. 2016 г. № 144. Доступ из справ.-правового портала «Гарант».

7. Швырков А.С. Нормирование требований пожарной безопасности к геометрическим параметрам ограждений резервуаров типа «стакан в стакане»: дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 222 с.
8. Физическое и имитационное моделирование воздействия пожара пролива на трубопроводную обвязку колонного аппарата / Р.Р. Тляшева [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4-6. С. 1080–1090.
9. Исследование прочности элементов металлоконструкций, подвергшихся воздействию повышенных температур при пожаре / И.А. Калинин [и др.] // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2017. Т. 1. № 1 (6). С. 104–106.
10. Christopher W. Schmidt, Steve A. Symes. The analysis of burned human remains. Academic Press. 2018. P. 2.
11. Sudheer S., Prabhu S.V. Measurement of flame emissivity of gasoline pool fires. 2016.
12. Зигель Р., Хауэл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 935 с.
13. Engineering ToolBox, (2003). Liquids – Kinematic Viscosities. [online] Available at. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/kinematic-viscosity-d_397.html (дата обращения: 05.03.2022).

References

1. Shvyrkov S.A. Pozharnyj risk pri kvazimgnovennom razrushenii neftyanogo rezervuara: monografiya. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2015. 289 s.
2. STO Gazprom 2-1.1-356–2009. Metodicheskie ukazaniya po povysheniyu ustojchivosti tekhnologicheskogo oborudovaniya proizvodstvennyh ob"ektov predpriyatij OAO «Gazprom» k vozdejstviyu pozharov i vzryvov i predotvrashcheniyu kaskadnyh effektov. M., 2009.
3. Metodika ocenki pozharobezopasnyh rasstoyanij pri proektirovanii promyshlennyh predpriyatij. M.: Izd-vo «Federal'noe avtonomnoe uchrezhdenie «Federal'nyj centr normirovaniya, standartizacii i ocenki sootvetstviya v stroitel'stve», 2016. 225 s.
4. Belov L.G. Avtomatizirovannoe prognozirovanie riska kaskadnyh tekhnogennyh proisshestvij // Strategiya grazhdanskoj zashchity: problemy i issledovaniya. 2013. Т. 3. № 1 (4). S. 13–23.
5. Fedoryan A.V., Poda D.V., Bidak E.V. Raschetnoe obosnovanie rasstoyaniya mezhdru vertikal'nymi stal'nymi rezervuarami hraneniya LVZH s uchetom parametra nagreva stenki ot pozhara // Tekhnosfernaya bezopasnost'. Sovremennye realii. 2018. S. 25–34.
6. Ob utverzhdenii rukovodstva po bezopasnosti «Metodicheskie osnovy po provedeniyu analiza opasnostej i ocenki riska avarij na opasnyh proizvodstvennyh ob"ektah»: prikaz Rostekhnadzora ot 11 apr. 2016 g. № 144. Dostup iz sprav.-pravovogo portala «Garant».
7. Shvyrkov A.S. Normirovanie trebovanij pozharnoj bezopasnosti k geometricheskim parametram ograzhdenij rezervuarov tipa «stakan v stakane»: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2021. 222 s.
8. Fizicheskoe i imitacionnoe modelirovanie vozdejstviya pozhara proliva na truboprovodnuyu obvyazku kolonnoego apparata / R.R. Tlyasheva [i dr.] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2016. Т. 18. № 4-6. S. 1080–1090.
9. Issledovanie prochnosti elementov metallokonstrukcij, podvergshihsyia vozdejstviyu povyshennyh temperatur pri pozhare / I.A. Kalinin [i dr.] // Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij. 2017. Т. 1. № 1 (6). S. 104–106.
10. Christopher W. Schmidt, Steve A. Symes. The analysis of burned human remains. Academic Press. 2018. P. 2.
11. Sudheer S., Prabhu S.V. Measurement of flame emissivity of gasoline pool fires. 2016.
12. Zigel' R., Hauel Dzh. Teploobmen izlucheniem. M.: Mir, 1975. 935 s.
13. Engineering ToolBox, (2003). Liquids – Kinematic Viscosities. [online] Available at. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/kinematic-viscosity-d_397.html (data obrashcheniya: 05.03.2022).

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 03.04.2023; одобрена после рецензирования: 17.05.2023;
принята к публикации: 20.05.2023

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 03.04.2023; approved after review: 17.05.2023;
accepted for publication: 20.05.2023

Сведения об авторах:

Бруслиновский Александр Юрьевич, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: alexander.bruslinovsky@mail.ru

Самигуллин Гафур Халафович, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: samigullin.g@igps.ru

Нефедьев Сергей Аркадьевич, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор военных наук, профессор, e-mail: doktorsan@mail.ru

Information about authors:

Bruslinovsky Alexander Yu., associate professor of the faculty of training of highly qualified personnel of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: alexander.bruslinovsky@mail.ru

Samigullin Gafur Kh., professor of the department of fire safety of technological processes and productions of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: samigullin.g@igps.ru

Nefediev Sergey A., professor of the department of fire safety of technological processes and production of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of military sciences, professor, e-mail: doktorsan@mail.ru