
ПОЖАРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 614.84; DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-1-12

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЭСКАЛАЦИИ ПОЖАРА ПРИ ХРАНЕНИИ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ В ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛАСТИЧНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ

Самигуллин Гафур Халафович;

✉ Захаров Александр Евгеньевич.

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

✉ frzakhsach@mail.ru

Аннотация. В связи с ростом объемов добычи нефти и производства нефтепродуктов, а также их транспортировки и хранения увеличиваются ассортимент и размеры резервуаров. Для этой цели на российских предприятиях топливно-энергетического комплекса широко используются полимерные резервуары, включая мобильные резервуарные парки и нефтебазы для оперативного хранения нефти и нефтепродуктов. Однако полимерные материалы, из которых изготавливают резервуары, являются горючими, что повышает уровень их пожарной опасности. Проведена оценка возможности эскалации пожара на примере модели нефтебазы при хранении моторных топлив в полимерных эластичных резервуарах. Представлены в табличной форме результаты расчета опасных факторов пожара пролива при разгерметизации полимерных эластичных резервуаров с бензином и дизельным топливом, а также график зависимости интенсивности теплового излучения при возгорании данных резервуаров, построено дерево событий. Определены параметры, характеризующие возможную эскалацию пожара на площадке хранения моторных топлив в квазистационарных условиях.

Предложена методика, позволяющая проводить оценку возможности реализации эскалационного характера пожара на объектах хранения и обращения моторных топлив в полимерных эластичных резервуарах, а также даны рекомендации для предотвращения прогрессирующего характера развития негативных событий и снижения ущерба при пожаре.

Ключевые слова: полимерные эластичные резервуары, нефть и нефтепродукты, эскалация пожарной опасности, принцип «домино», опасные факторы пожара, модельная авария, математическая модель резервуарного парка, огненный шар, пожар пролива

Для цитирования: Самигуллин Г.Х., Захаров А.Е. Оценка возможности эскалации пожара при хранении моторных топлив в полимерных эластичных резервуарах // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2024. № 1. С. 1–12. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-1-12.

Scientific article

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF FIRE ESCALATION DURING STORAGE OF MOTOR FUELS IN POLYMERIC ELASTIC TANKS

Samigullin Gafur Kh.;

✉ Zakharov Alexandr E.

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

✉ frzaksach@mail.ru

Abstract. Due to the increase in oil production and production of petroleum products, as well as their transportation and storage, the range and sizes of reservoirs are increasing. For this purpose, polymer tanks are widely used at Russian enterprises of the fuel and energy complex, including mobile tank farms and oil depots for the operational storage of oil and petroleum products. However, the polymer materials from which the tanks are made are flammable, which increases their fire hazard level. An assessment of the possibility of fire escalation has been carried out using the example of an oil depot model for storing motor fuels in polymer elastic tanks. The results of calculating the dangerous factors of a spill fire during depressurization of polymer elastic tanks with gasoline and diesel fuel, as well as a graph of the dependence of the intensity of thermal radiation during the ignition of these tanks, are presented in tabular form, and an event tree is constructed. The parameters characterizing the possible escalation of a fire at a motor fuel storage site under quasi-stationary conditions have been determined.

A methodology is proposed that allows assessing the possibility of realizing the escalating nature of a fire at facilities for storing and handling motor fuels in polymer elastic tanks, and recommendations are also given to prevent the progressive nature of the development of negative events and reduce damage in case of fire.

Keywords: polymeric elastic tanks, oil and oil products, escalation of fire danger, domino principle, fire hazard factors, model accident, mathematical model of tank farm, fireball, spill fire

For citation: Samigullin G.Kh., Zakharov A.E. Assessment of the possibility of fire escalation during storage of motor fuels in polymeric elastic tanks // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2024. № 1. P. 1–12. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-1-1-12.

Введение

Увеличение объемов добычи, транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов требует расширения номенклатуры и типоразмеров резервуаров, позволяющих расширять перечень технологических операций для оперативного и надежного снабжения потребителей различными топливами и энергоносителями. Для этих целей на российских предприятиях топливно-энергетического комплекса началось широкое применение полимерных резервуаров, в частности, для обустройства мобильных резервуарных парков и нефтебаз оперативного хранения нефти и нефтепродуктов [1, 2].

Полимерные эластичные резервуары (ПЭР) для хранения нефти и нефтепродуктов в сравнении со стальными и железобетонными резервуарами имеют ряд существенных преимуществ: позволяют осуществлять легкую транспортировку, имеют низкую себестоимость при изготовлении, установке и монтаже, а также обладают хорошей устойчивостью к химическим воздействиям и коррозионно-активным средам [3, 4].

С другой стороны, эксплуатационные характеристики ПЭР, такие как прочность стенок резервуаров, их устойчивость, стойкость к воздействию высоких температур, значительно уступают параметрам стальных цилиндрических резервуаров [5]. Кроме того, полимерные материалы, из которых изготавливают резервуары, являются горючими веществами, что, в свою очередь, обуславливает высокий уровень пожарной опасности технологических процессов хранения и отпуска нефти и нефтепродуктов в резервуарных

парках, оснащенных полимерными резервуарами [6, 7]. Наиболее неблагоприятными последствиями в такой ситуации будут являться возможные процессы прогрессирующего распространения пожара с кратным увеличением его площади и количества горючих веществ – то есть в полной мере осуществляется эскалация пожароопасной ситуации по принципу «домино». Важность и актуальность изучения подобных ситуаций подтверждается многочисленными публикациями отечественных [8–11] и зарубежных специалистов [12–17] в рассматриваемой предметной области.

Нормативно-техническая документация в области пожарной и промышленной безопасности для объектов, на которых осуществляется хранение нефти и нефтепродуктов в ПЭР, не содержит единых условий и ограничений, обеспечивающих выполнение требований российского законодательства при эксплуатации взрывопожароопасных производственных объектов [3].

Соответственно, существует настоятельная необходимость дальнейшего совершенствования средств и методов оценки пожарной опасности нефтебаз и хранилищ нефтепродуктов, а также нормативного и методического обеспечения пожарной безопасности объектов нефтегазовой отрасли, на которых применяются ПЭР. Оценку возможности эскалации пожара при хранении моторных топлив в ПЭР наиболее целесообразно проводить посредством разработки математической модели резервуарного парка, далее определить уровень пожарной опасности на территории нефтебазы и предложить методику расчета вероятности эскалации пожара по принципу «домино» на территории нефтебаз.

Материалы и методы исследования

Оценка уровня пожарной опасности применения ПЭР проводилась на примере модели нефтебазы для хранения моторных топлив: бензина АИ-95 и зимнего дизельного топлива. Размеры площадки хранения 120,2x64,4 м, резервуары объемом 250 м³ расположены по четыре позиции в пределах обвалования с размерами в плане 34,4x30,2 м, в трех группах хранится дизельное топливо и в трех – бензин. Общая схема расположения резервуаров приведена на рис. 1.

Уровень пожарной опасности оценивался путем рассмотрения модельной аварии с разгерметизацией резервуара с моторным топливом и последующим развитием событий по сценариям «пожар пролива» и «огненный шар». Последовательность событий при рассмотрении пожара пролива: разрушение одного резервуара → разлив топлива в пределах защитной бермы → возникновение источника зажигания → возгорание пролива топлива → воспламенение и разрушение соседних резервуаров → разлив дизельного топлива из соседних резервуаров с образованием пожаром пролива в пределах обвалования.

Пожар по сценарию «огненный шар»: разрушение одного резервуара → разлив топлива в пределах защитной бермы → прогрев жидкости → образование газопаровоздушной среды → возникновение источника зажигания → мгновенное либо отложенное воспламенение газопаровоздушной среды → пожар по типу «огненный шар» → воспламенение и разрушение соседних резервуаров → разлив топлива в пределах обвалования с дальнейшим пожаром пролива, либо по типу «огненный шар».

Соответствующее дерево событий приведено на рис. 2, исходные данные для оценки опасных факторов пожара приведены в табл. 1.

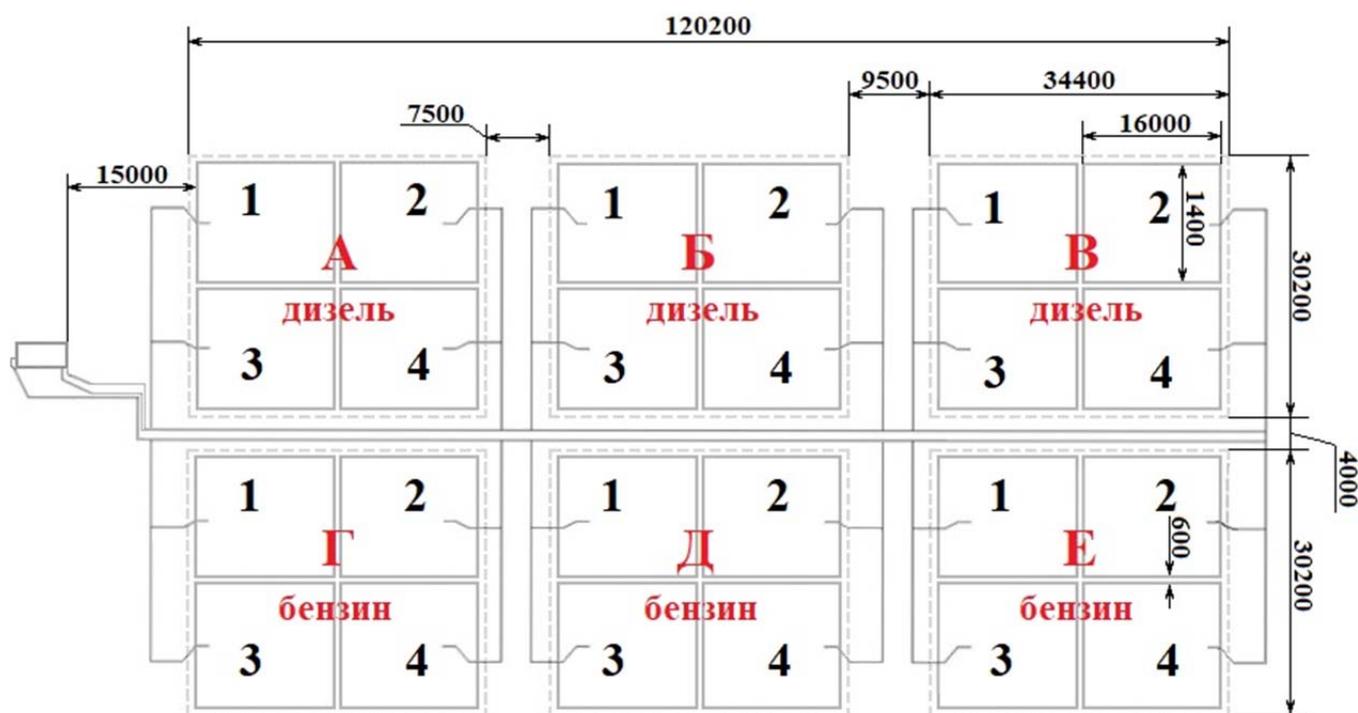


Рис. 1. Схема хранилища моторных топлив в ПЭР
(1, 2, 3, 4 – нумерация резервуаров в группе; А, Б, В – группы резервуаров для хранения дизельного топлива; Г, Д, Е – группы резервуаров для хранения бензина)

Таблица 1

Исходные данные для моделирования теплового потока

Параметры	Значения
Масса горючих веществ в проливе моторных топлив, m (кг)	210000,0
Объем горючих веществ, V (m^3)	250,0
Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, E_f (kW/m^2):	
– дизельное топливо;	24,0
– бензин	33,0
Площадь пролива, F (m^2)	1004,1
Количество испарившегося топлива (кг):	
– дизельное топливо;	12,4
– бензин	24,1

При возникновении пожара пролива (либо «огненный шар») на моделируемой нефтебазе в качестве наиболее опасного фактора принималось тепловое излучение с построением полей опасных факторов пожара. Предельные значения тепловой радиации для различных полимерных материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Предельные значения допустимых тепловых нагрузок для полимерных материалов

Вещество, материал	$q_{кр}$, кВт/м ²
Полипропилен	6,5
Пенопласты типа ПСП, ППУ, ФПП	7,4
Резина	7,0
Экструдированный полиметилметакрилат	9,0
Полиэтилен	12,5
Экструдированный поливинилхлорид	15,0

Результаты определения опасных факторов пожара приведены в табл. 2 и на рис. 3.

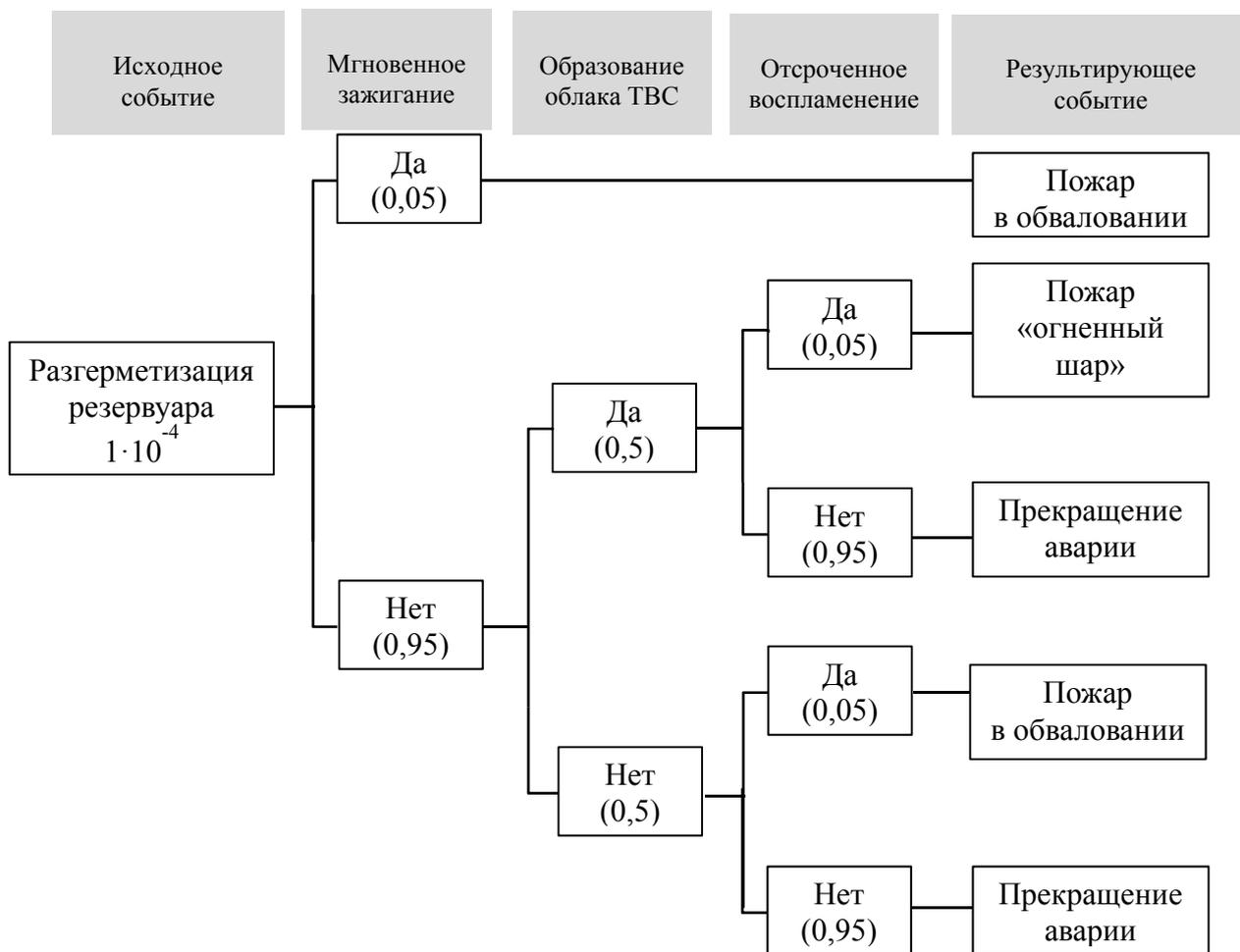


Рис. 2. Дерево событий при разгерметизации полимерных эластичных резервуаров на нефтебазе хранения моторных топлив (ТВС – топливовоздушная смесь)

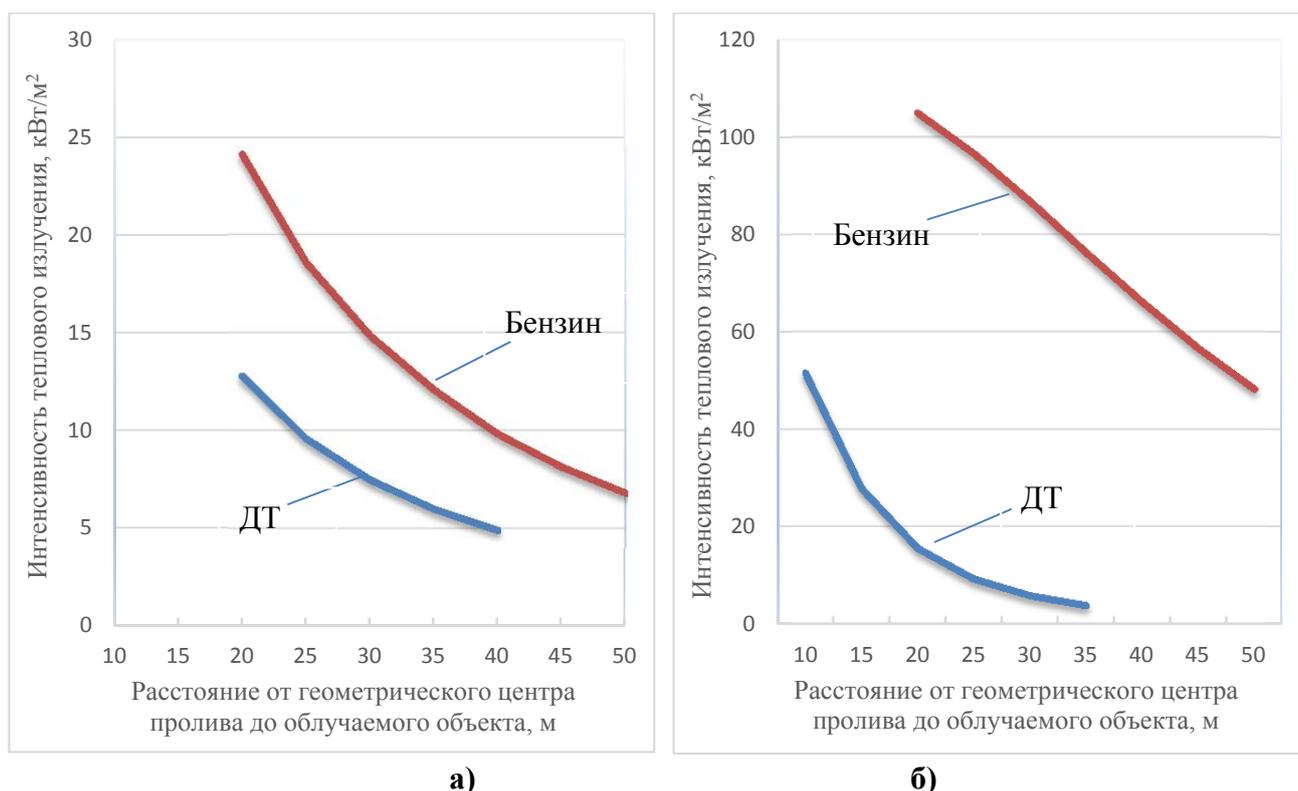


Рис. 3. График зависимости интенсивности теплового излучения при возгорании резервуаров с дизельным топливом и бензином: а) пожар пролива; б) пожар «огненный шар»

Результаты исследования и их обсуждение

На основании полей опасных факторов пожара были определены безопасные расстояния между группами резервуаров, при которых интенсивность теплового потока будет менее критических значений, принимаемых по табл. 2 (для полиуретана $q_{кр}=7,4$ кВт/м²), приводящих к воспламенению имеющихся полимерных эластичных резервуаров. Сводные результаты расчета опасных факторов пожара пролива при разгерметизации резервуаров с бензином и дизельным топливом приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сводные результаты расчета опасных факторов пожара пролива при разгерметизации резервуаров с бензином и дизельным топливом

Расстояние от «центра пролива» до облучаемого объекта, м	Интенсивность теплового излучения, q кВт/м ²			
	пожар пролива		пожар «огненный шар»	
	диз. топливо	бензин	диз. топливо	бензин
10	–	–	51,59	–
15	–	–	27,89	–
20	12,80	24,12	15,59	105,0
25	9,61	18,60	9,27	96,7
30	7,50	14,86	5,85	86,9
35	6,01	12,10	3,83	76,4
40	4,92	9,84	–	66,2
45	–	8,15	–	56,7
50	–	6,82	–	48,3
Эффективный диаметр пролива или «огненного шара» (м)	35,76	47,19	9,15	17,52
Безопасное расстояние (м)	36,0	48,0	27,5	свыше 200

Принимая во внимание габаритные размеры резервуаров, а также расстояние между группами, можно видеть, что смежные группы резервуаров находятся в зоне поражения опасными факторами пожара. Анализ сведений по величине интенсивности теплового излучения для пожара пролива бензина и дизельного топлива, приведенных на рис. 4, и сравнение с критической величиной теплового потока позволяют сделать выводы о том, что при любом варианте событий развитие пожара будет иметь эскалационный характер – то есть активное распространение пожара по всей территории нефтебазы.

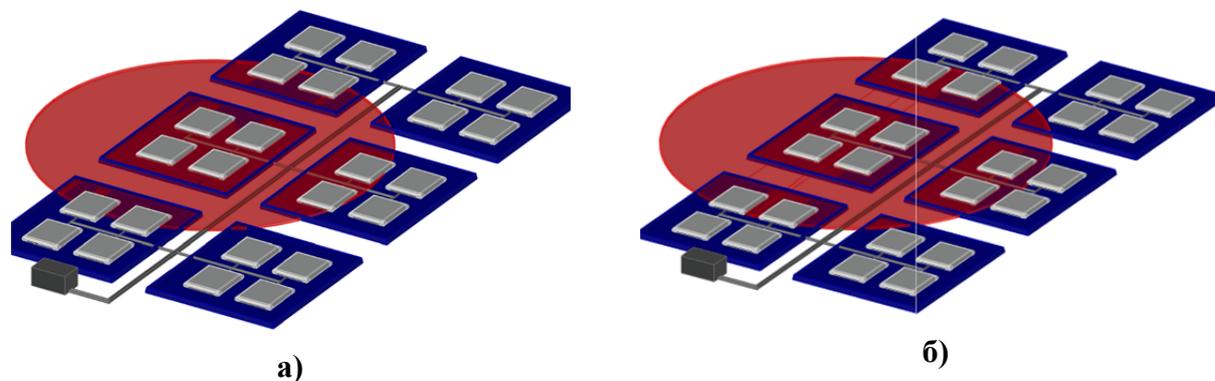


Рис. 4. Схема опасной зоны теплового излучения при пожаре на площадке хранения моторных топлив: а) пожар пролива ДТ; б) пожар пролива бензина

Для предотвращения прогрессирующего характера развития негативных событий и снижения ущерба при пожаре [18, 19] необходимо повысить прочность стенок и термостабильность полимерных материалов, а также обосновать величину противопожарных разрывов при хранении легковоспламеняющихся жидкостей и горючих жидкостей в ПЭР.

С учетом полученных результатов была разработана методика оценки вероятности эскалации распространения пожара вследствие разгерметизации и последующего возгорания смежных групп резервуаров. При этом были приняты следующие допущения:

- прочность резервуара линейно зависит от толщины стенки;
- температуры внешней и внутренней поверхностей стенки резервуара принимаются равными;
- давление паров моторных топлив внутри резервуара при температурах выше температуры кипения определяется по уравнениям состояния идеального газа;
- вероятность воспламенения стенки резервуара пропорциональна площади, на которой тепловой поток равен либо превышает $q_{\text{крит}}$;
- при разгерметизации резервуара вероятность воспламенения хранимого топлива принимается равной единице.

Определение параметров, характеризующих возможную эскалацию пожара на площадке хранения моторных топлив в квазистационарных условиях, выполняется в следующей последовательности:

1) определяются значения теплового потока в соответствии с действующей нормативной литературой в условиях пожара в пределах обвалования одной группы резервуара по формуле:

$$q = E_f * F_q * \tau,$$

где E_f – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м²; F_q – угловой коэффициент облученности; τ – коэффициент пропускания атмосферы;

2) для резервуаров в зоне поражения принимается температура дна (стенки) резервуаров, равная температуре воспламенения полимерного материала (например, для полиуретана $t=350$ °С);

3) для каждого из резервуаров, находящихся в зоне поражения тепловым излучением свыше критического значения $q_{кр}$, рассчитывается вероятность воспламенения резервуара как отношение на площади поражения к полной площади верхнего днища и стенок резервуара по формуле:

$$R_i = \frac{S_i}{S_{рез}},$$

где S_i – площадь верхнего днища (стенки) резервуара, подвергающаяся тепловому излучению, превышающему критическое значение, при котором воспламеняется материал днища (стенки); $S_{рез}$ – полная площадь верхнего днища (стенки) резервуара;

4) проводится ранжирование резервуаров по убыванию вероятности воспламенения и оценивается остаточная толщина стенки при возгорании для каждого из резервуаров пропорционально исходной и остаточной массе, определяемой по результатам термогравиметрического анализа [18]:

$$C_{ост} = C_{исх} \frac{M_{ост}}{M_{исх}},$$

где $C_{ост}$, $C_{исх}$ – соответственно остаточная и исходная толщина днища (стенки) резервуара; $M_{ост}$, $M_{исх}$ – соответственно остаточная и исходная масса материала (стенки) резервуара;

5) определяется избыточное внутреннее давление в резервуаре для изохорных условий:

$$P_{вн} = P_n \frac{T_n}{T_{рез}},$$

где $P_{вн}$ – внутреннее избыточное давление при температуре воспламенения материала резервуара $T_{рез}$; P_n – давление насыщенного пара хранимого моторного топлива при температуре T_n ;

6) вычисляется значение допустимого внутреннего давления при остаточной толщине верхнего днища (стенки):

$$[P] = P_{пр} \frac{C_{ост}}{C_{исх}};$$

7) если внутреннее избыточное давление превышает допустимое значение, то есть $P_{вн} > [P]$, то происходит разгерметизация резервуара с истечением топлива, его разогрев до разлив в пределах обвалования с последующим воспламенением и увеличением площади пожара, что будет свидетельствовать об эскалации пожара.

При необходимости вычисления п. 1–7 выполняются для всех групп резервуаров, в которых хранится моторное топливо, с учетом их взаимного расположения до итоговой оценки возможности реализации эскалации пожара по формуле:

$$R_{эск} = \prod_1^n R_i,$$

где $R_{эск}$ – вероятность эскалации пожара; R_i – вероятность воспламенения резервуара.

Приведенная методика может быть использована как альтернативная, наряду с известными способами оценки пожарной опасности нефтебаз и хранилищ, поскольку ранее разработанные методы [20–22] были предназначены для оборудования и резервуаров, изготовленных из стали и других металлов.

Заключение

Полученные результаты оценки опасных факторов пожара на примере модельной нефтебазы для хранения бензина и дизельного топлива в ПЭР при произвольных расстояниях между резервуарами и группами резервуаров свидетельствуют о возможности прогрессирующего распространения пожара. Построение полей теплового излучения при

пожаре позволило определить безопасные расстояния между группами резервуаров, соблюдение которых позволит предотвратить развитие пожара по принципу «домино». Предложена методика, позволяющая проводить оценку возможности реализации эскалационного характера пожара на объектах, где осуществляется хранение и обращение моторных топлив в ПЭР при обосновании противопожарных мероприятий для безопасной эксплуатации нефтебаз.

Список источников

1. Барышев И.Г. Эластичные резервуары для нефти и нефтепродуктов // Газовая промышленность. 2015. № 6 (723). С. 88–89.
2. Технология обезжелезивания буровых отходов с использованием декантера из текстильных материалов / Е.А. Мазлова [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2020. № 5. С. 101–104.
3. Самигуллин Г.Х., Захаров А.Е. Оценка пожарного риска при использовании полимерных эластичных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. № 4 (60). С. 6–13.
4. Шириева Н.С., Шириев А.К., Тляшева Р.Р. Оценка применения полевого склада горючего на базе эластичных резервуаров на Восточно-Таймырском лицензионном участке с учетом анализа риска // Нефтегазовое дело. 2017. № 3. С. 169–188.
5. Самигуллин Г.Х., Захаров А.Е. Снижение пожарной опасности при использовании полимерных эластичных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 1 (65). С. 8–16.
6. Прогнозирование дальности действия поражающих факторов и ресурса безопасной эксплуатации резервуаров, изготовленных из полимерного композитного материала, в условиях отрицательных температур / Н.С. Шириева [и др.] // Нефтегазовое дело. 2020. № 1. С. 53–72.
7. Study of mechanical properties and analysis of low temperatures influence on flexible tank engineering structural material behavior / N.S. Shirieva [et al.] // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference 2020. RPTC 2020. P. 202.
8. Шебеко Ю.Н., Гордиенко Д.М. Оценка риска эскалации пожара в производственных зданиях и сооружениях // Пожарная безопасность. 2010. № 4. С. 64–69.
9. Shevtsov S.A., Kargashilov D.V., Zenin A.Y. Control system for the process of storing liquefied petroleum gas in an isothermal tank within the range of fireproof and explosionproof operating parameters // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. Vol. 56. № 1-2. P. 105–108.
10. Петрова Н.В., Чешко И.Д., Галишев М.А. Анализ практики экспертного исследования пожаров на объектах хранения нефти и нефтепродуктов // Науч.-аналит. журн. «Вестник С-Петербур. ун-та ГПС МЧС России». 2016. № 7. С. 40–41.
11. Анализ пожароопасных ситуаций в резервуарах для хранения светлых нефтепродуктов / С.А. Шевцов [и др.] // Пожарная безопасность. 2018. № 2. С. 31–37.
12. Zhou Jianfeng, Reniers Genserik, Khakzad Nima. Application of event sequence diagram to evaluate emergency response actions during fire-induced domino effects // Reliability Engineering & System Safety. 2016. 150: 202–209. DOI: 10.1016/j.ress.2016.02.005.
13. Chen Chao, Reniers Genserik, Zhang Laobing. An innovative methodology for quickly modeling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. 54: 312–324. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.012.
14. Khakzad Nima, Landucci Gabriele, Reniers Genserik. Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of fire protection systems during domino effects // Reliability Engineering & System Safety. 2017. 167: 232–247. DOI: 10.1016/j.ress.2017.06.004.
15. An innovative quantitative analysis methodology for Natech events triggered by earthquakes in chemical tank farms / Huang Kongxing [et al.]. Safety Science. 2020. 128: 104744. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104744.

16. Khakzad N. A goal programming approach to multi-objective optimization of firefighting strategies in the event of domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*. 2023. Vol. 239. 109523. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109523.
17. Khakzad Rostami N., Landucci G., Reniers G. Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of fire protection systems during domino effects // *Reliability Engineering and System Safety*. 2017. 167. 232–247. DOI: 10.1016/j.ress.2017.06.004.
18. Техносферная безопасность. Пожарная тактика: Справочник руководителя пожарно-спасательного подразделения / А.А. Баранов [и др.]. СПб.: С-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2020. С. 96.
19. Крымский В.В., Ищенко А.Д., Таранцев А.А. О построении функции ущерба // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2020. № 4 (56). С. 54–59.
20. Самигуллин Г.Х., Захаров А.Е. Снижение пожарной опасности при хранении нефтепродуктов в полимерных эластичных резервуарах, модифицированных нанокремнеземными компонентами // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2023. № 2 (66). С. 148–158.
21. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire / G. Landucci [et al.]. *Accid Anal Prev*, 2009. 41:1206–1215.
22. Landucci G., Cozzani V., Birk M. Heat Radiation Effects. Domino Eff. Process Ind. Model. Prev. Manag., Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. 2013. P. 70–115.

References

1. Baryshev I.G. Elastichnye rezervuary dlya nefi i nefteproduktov // *Gazovaya promyshlennost'*. 2015. № 6 (723). S. 88–89.
2. Tekhnologiya obezvozhivaniya burovnyh othodov s ispol'zovaniem dekantera iz tekstil'nyh materialov / E.A. Mazlova [i dr.] // *Neftyanoe hozyajstvo*. 2020. № 5. S. 101–104.
3. Samigullin G.H., Zaharov A.E. Ocenka pozharnogo riska pri ispol'zovanii polimernykh elastichnykh rezervuarov dlya hraneniya nefi i nefteproduktov // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2021. № 4 (60). S. 6–13.
4. Shirieva N.S., Shiriev A.K., Tlyasheva P.P. Ocenka primeneniya polevogo sklada goryuchego na baze elastichnykh rezervuarov na Vostochno-Tajmyrskom licenzionnom uchastke s uchetom analiza riska // *Neftegazovoe delo*. 2017. № 3. S. 169–188.
5. Samigullin G.H., Zaharov A.E. Snizhenie pozharnoj opasnosti pri ispol'zovanii polimernykh elastichnykh rezervuarov dlya hraneniya nefi i nefteproduktov // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2023. № 1 (65). S. 8–16.
6. Prognozirovanie dal'nosti dejstviya porazhayushchih faktorov i resursa bezopasnoj ekspluatatsii rezervuarov, izgotovlennykh iz polimernogo kompozitnogo materiala, v usloviyah otricatel'nykh temperatur / N.S. Shirieva [i dr.] // *Neftegazovoe delo*. 2020. № 1. S. 53–72.
7. Study of mechanical properties and analysis of low temperatures influence on flexible tank engineering structural material behavior / N.S. Shirieva [et al.] // *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference 2020. RPTC 2020*. P. 202.
8. Shebeko Yu.N., Gordienko D.M. Ocenka riska eskalatsii pozhara v proizvodstvennykh zdaniyah i sooruzheniyah // *Pozharnaya bezopasnost'*. 2010. № 4. S. 64–69.
9. Shevtsov S.A., Kargashilov D.V., Zenin A.Y. Control system for the process of storing liquefied petroleum gas in an isothermal tank within the range of fireproof and explosionproof operating parameters // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 56. № 1-2. P. 105–108.
10. Petrova N.V., Cheshko I.D., Galishev M.A. Analiz praktiki ekspertnogo issledovaniya pozharov na ob"ektah hraneniya nefi i nefteproduktov // *Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii»*. 2016. № 7. С. 40–41.
11. Analiz pozharoopasnykh situatsii v rezervuarah dlya hraneniya svetlykh nefteproduktov / S.A. Shevcov [i dr.] // *Pozharnaya bezopasnost'*. 2018. № 2. S. 31–37.

12. Zhou Jianfeng, Reniers Genserik, Khakzad Nima. Application of event sequence diagram to evaluate emergency response actions during fire-induced domino effects // *Reliability Engineering & System Safety*. 2016. 150: 202–209. DOI: 10.1016/j.res.2016.02.005.
13. Chen Chao, Reniers Genserik, Zhang Laobing. An innovative methodology for quickly modeling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018. 54: 312–324. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.04.012.
14. Khakzad Nima, Landucci Gabriele, Reniers Genserik. Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of fire protection systems during domino effects // *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. 167: 232–247. DOI: 10.1016/j.res.2017.06.004.
15. An innovative quantitative analysis methodology for Natech events triggered by earthquakes in chemical tank farms / Huang Kongxing [et al.]. *Safety Science*. 2020. 128: 104744. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104744.
16. Khakzad N. A goal programming approach to multi-objective optimization of firefighting strategies in the event of domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*. 2023. November. Vol. 239. 109523. DOI: 10.1016/j.res.2023.109523.
17. Khakzad Rostami N., Landucci G., Reniers G. Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of fire protection systems during domino effects // *Reliability Engineering and System Safety*. 2017. 167. 232–247. DOI: 10.1016/j.res.2017.06.004.
18. Tekhnosfernaya bezopasnost'. Pozharnaya taktika: Spravochnik rukovoditelya pozharnospasatel'nogo podrazdeleniya / A.A. Baranov [i dr.]. SPb.: S-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2020. S. 96.
19. Krymskij V.V., Ishchenko A.D., Tarancev A.A. O postroenii funkcii ushcherba // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2020. № 4 (56). S. 54–59.
20. Samigullin G.H., Zaharov A.E. Snizhenie pozharnoj opasnosti pri hranenii nefteproduktov v polimernyh elastichnyh rezervuarah, modifitsirovannyh nanouglerodnymi komponentami // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2023. № 2 (66). S. 148–158.
21. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire / G. Landucci [et al.]. *Accid Anal Prev*, 2009. 41:1206–1215.
22. Landucci G., Cozzani V., Birk M. Heat Radiation Effects. *Domino Eff. Process Ind. Model. Prev. Manag.*, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. 2013. P. 70–115.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 15.01.2024; одобрена после рецензирования: 29.01.2024;
принята к публикации: 05.02.2024

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 15.01.2024; approved after review: 29.01.2024;
accepted for publication: 05.02.2024

Сведения об авторах:

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, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>, SPIN-код: 8830-4253

Захаров Александр Евгеньевич, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: frzakhsach@mail.ru, SPIN-код: 5064-0132

Information about authors:

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, <https://orcid.org/0000-0002-5688-8921>, SPIN-код: 8830-4253

Zakharov Alexandr E., senior lecturer 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), e-mail: frzakhsach@mail.ru, SPIN: 5064-0132