

УДК: 614.838

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ МОДУЛЬНЫХ ГАЗОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

Тимофеев Артем Борисович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье описана методика проведения натурных наблюдений по расположению автомобилей перед их заправкой на расстояниях от резервуара хранения сжиженного углеводородного газа на модульной автомобильной газозаправочной станции. Целью теоретического исследования является установление минимального среднего расстояния расположения автомобиля от резервуара хранения сжиженного углеводородного газа, как наиболее опасного сценария развития пожара, влияющего на прогрев боковой стенки резервуара сжиженного углеводородного газа до наступления критической поверхностной температуры. Методом математической статистики обработки данных определены вариационные ряды с разрядными частотами распределения количества автомобилей на расстоянии от резервуара сжиженного углеводородного газа, определена достаточность количества наблюдений. Построена гистограмма и полигон распределения количества автомобилей на расстоянии от резервуара хранения сжиженного углеводородного газа. Построена компьютерная модель в программном комплексе Fire Dynamic Simulator и проведено численное моделирование горения автомобиля на основе полевого математического моделирования пожара. Результаты численного моделирования с учетом расположения автомобиля относительно резервуара показали необходимость дальнейших исследований влияния климатических условий на прогрев боковой стенки резервуара сжиженного углеводородного газа для определения безопасных расстояний между резервуаром и газозаправочной колонкой.

Ключевые слова: модульная газозаправочная станция, безопасные расстояния, резервуар, автомобиль, пожарная безопасность

FIRE HAZARD STUDY OF MODULAR GAS FILLING STATIONS

Artem B. Timofeev

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The article describes the methodology for conducting field observations on the location of vehicles before refueling at distances from the storage tank for liquefied petroleum gas at a modular automobile gas filling station. The purpose of the theoretical study

is to establish the minimum average distance of the vehicle from the storage tank of liquefied petroleum gas, as the most dangerous scenario for the development of a fire that affects the heating of the side wall of the tank of liquefied hydrocarbon gas to the critical surface temperature. Using the method of mathematical statistics of data processing, variation series with bit frequencies of the distribution of the number of cars at a distance from the liquefied petroleum gas reservoir were determined, and the sufficiency of the number of observations was determined. A histogram and a polygon for the distribution of the number of cars at a distance from the storage tank for liquefied petroleum gas have been constructed. A computer model was built in the Fire Dynamic Simulator software package and a numerical simulation of a car burning was carried out on the basis of a field mathematical simulation of a fire. The results of numerical modeling, taking into account the location of the car relative to the tank, showed the need for further research into the influence of climatic conditions on the heating of the side wall of the liquefied hydrocarbon gas tank in order to determine the safe distances between the tank and the gas dispenser.

Keywords: modular gas filling station, safe distances, tank, car, fire safety

Введение

Проведенный анализ нормативных документов в области пожарной безопасности показал, что проектирование в части противопожарных расстояний между технологическим оборудованием модульной автомобильной газозаправочной станции, зданиями, сооружениями и технологическим оборудованием как на территории автомобильной заправочной станции (далее – АЗС), так и за ее пределами отсутствует [1, 2].

Исследования огневого воздействия на прогрев стенок резервуара сжиженного углеводородного газа (далее – СУГ) при горении автомобиля, в том числе с учетом климатических условий регионов России отсутствуют [3–13]. В результате чего необходимо проведение натурных наблюдений по расположению автомобилей перед его заправкой на расстояниях от резервуара хранения СУГ с целью установления минимального среднего расстояния и дальнейшего проведения экспериментальных исследований влияния воздействия температурного поля на прогрев

боковой стенки резервуара СУГ. Результаты моделирования показали, что огневое воздействие на боковую стенку резервуара СУГ на расстоянии 1 м при горении автомобиля приведет к его перегреву и взрыву.

Материалы и методы

Натурные наблюдения проводились на девяти модульных автомобильных газозаправочных станциях (далее – АГЗС) методом видеонаблюдения [14].

Для фиксации расположения автомобилей относительно резервуара СУГ использовались две экшен-камеры Xiaomi модель YDXJ01FM, установленные на штатив с фронтальной и боковой стороны (рис. 1). На асфальте наносилась линейная разметка строительной рулеткой (рис. 2). Для калибровки изображения на мониторе персонального компьютера была построена сетка из прозрачной пленки, соответствующая размерностям нанесенной на асфальт линейной разметки.

Полученные видеоматериалы обрабатывались покадровым изображением с помощью программы QuickTime.

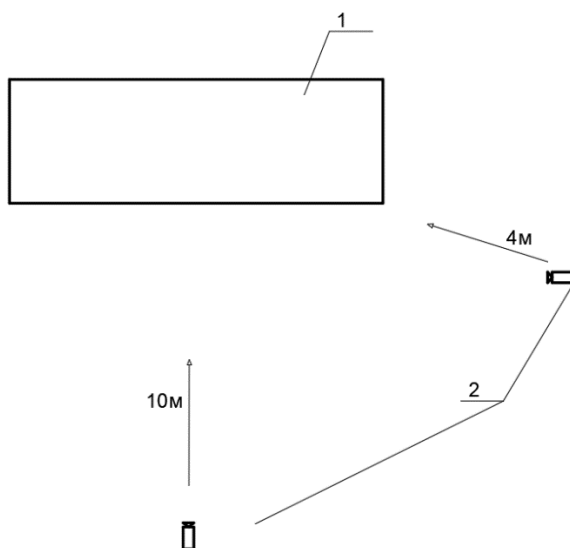


Рис.1. Схема расположения камер относительно резервуара СУГ

Fig. 1. The layout of the chambers relative to the LPG tank



Рис. 2. Линейная разметка для фотофиксации

Fig. 2. Linear markings for photo fixation

Результаты исследования

Всего было зафиксировано и обработано 450 наблюдений, объем выборочной совокупности данных для установления среднего минимального расстояния

между резервуаром СУГ и автомобилем сводится в табл. 1.

Методом математической статистики обработки данных с помощью программы Excel проведена их систематизация, результаты сводятся в табл. 2.

Таблица 1. Объем выборочной совокупности данных наблюдений

Table 1. Sample size of observational data

АЗС №1 Gas station №1	АЗС №2 Gas station №2	АЗС №3 Gas station №3	АЗС №4 Gas station №4	АЗС №5 Gas station №5	АЗС №6 Gas station №6	АЗС №7 Gas station №7	АЗС №8 Gas station №8	АЗС №9 Gas station №9
0,9	0,9	1,0	1,1	1,4	1,8	2,0	2,5	3,0
1,5	2,6	2,4	0,9	1,2	1,7	1,1	1,6	2,5
1,3	2,4	2,2	1,1	1,0	1,5	0,9	1,4	2,3
1,1	2,2	2,0	1,3	0,9	1,3	1,1	1,7	2,1
0,9	2,0	1,8	1,5	1,2	1,7	1,3	1,5	1,9
1,1	1,8	1,6	1,7	1,5	2,1	1,5	1,3	1,7
1,3	1,6	1,4	1,9	1,8	2,5	1,7	1,1	1,5
1,5	1,4	1,2	2,1	2,1	2,9	1,9	0,9	1,3
1,7	1,2	1,0	2,3	2,4	2,8	2,1	1,3	1,8
1,9	1,0	1,3	2,4	2,5	2,6	2,3	1,1	1,6
2,1	1,3	1,6	2,5	2,3	2,5	2,5	0,9	1,4
2,3	1,5	1,9	2,6	2,4	2,3	2,7	1,1	1,2
2,5	1,8	2,2	2,7	2,5	2,2	2,6	1,3	1,0
2,7	2,0	2,5	2,8	2,6	2,0	2,4	1,4	1,3
2,9	2,3	2,8	2,9	2,7	1,9	2,3	1,6	1,6
2,8	2,5	3,1	3,0	2,8	1,7	2,2	1,8	1,9
2,7	2,8	2,9	3,1	2,9	1,6	2,1	2,0	2,2
2,6	2,5	2,7	2,9	3,0	1,4	1,9	2,2	2,5
2,5	2,2	2,5	2,7	3,1	1,3	1,8	2,3	2,8
2,4	1,9	2,3	2,5	2,9	1,1	1,7	2,5	2,7
2,3	1,6	2,1	2,3	2,7	1,0	1,5	2,7	2,6
2,2	1,3	1,9	2,1	2,5	1,2	1,4	2,9	2,5
2,1	1,0	1,7	1,9	2,3	1,4	1,3	3,1	2,4
2,0	1,2	1,5	1,7	2,1	1,6	1,1	2,9	2,3
1,5	1,4	1,3	1,5	1,9	1,8	1,0	2,7	2,2
1,7	1,6	1,5	1,7	2,1	2,0	1,2	2,9	2,4
1,9	1,8	1,7	1,9	2,3	2,2	1,4	3,1	2,6
2,1	2,0	1,9	2,1	2,5	2,4	1,6	2,8	2,8
2,3	2,2	2,1	2,3	2,7	2,6	1,8	2,5	3,0
2,5	2,4	2,3	2,5	2,9	2,8	2,0	2,2	2,9
2,4	2,3	2,2	2,4	2,8	2,7	1,9	2,1	2,8
2,3	2,2	2,1	2,3	2,7	2,6	1,8	2,0	2,7
2,2	2,1	2,0	2,2	2,6	2,5	1,7	1,9	2,6
2,1	2,0	1,9	2,1	2,5	2,4	1,6	1,8	2,5
2,0	1,9	1,8	2,0	2,4	2,3	1,5	1,7	2,4
1,9	1,8	1,7	1,9	2,3	2,2	1,4	1,6	2,3
1,8	1,7	1,6	1,8	2,2	2,1	1,3	1,5	2,2
1,7	1,6	1,5	1,7	2,1	2,0	1,2	1,4	2,1
1,6	1,5	1,4	1,6	2,0	1,9	1,1	1,3	2,0
1,5	1,4	1,3	1,5	1,9	1,8	1,0	1,2	1,9

АЗС №1 Gas station №1	АЗС №2 Gas station №2	АЗС №3 Gas station №3	АЗС №4 Gas station №4	АЗС №5 Gas station №5	АЗС №6 Gas station №6	АЗС №7 Gas station №7	АЗС №8 Gas station №8	АЗС №9 Gas station №9
1,4	1,3	1,2	1,4	1,8	1,7	1,3	1,1	1,8
1,3	1,2	1,1	1,3	1,7	1,6	0,9	1,0	1,7
1,9	1,8	1,7	1,9	2,3	2,2	1,4	1,6	2,3
1,8	1,7	1,6	1,8	2,2	2,1	1,3	1,5	2,2
1,7	1,6	1,5	1,7	2,1	2,0	1,2	1,4	2,1
1,6	1,5	1,4	1,6	2,0	1,9	1,5	1,3	2,0
1,5	1,4	1,3	1,5	1,9	1,8	1,1	1,2	1,9
2,1	2,0	1,9	2,1	2,5	2,4	1,6	1,8	2,5
2,0	1,9	1,8	2,0	2,4	2,3	1,5	1,7	2,4
1,9	1,8	1,7	1,9	2,3	2,2	1,4	1,6	2,3

Таблица 2. Описательная статистика обработки данных
Table 2. Descriptive statistics of data processing

Показатель Indicator	Значение Value
Среднее Average	1,900
Медиана Median	1,900
Мода Mode	2,100
Стандартное отклонение Standard deviation	0,534
Дисперсия выборки Sample variance	0,286
Экцесс Excess	- 0,801
Асимметричность Asymmetry	0,108
Интервал Interval	2,200
Минимум Minimum	0,900
Максимум Maximum	3,100

Достаточность количества наблюдений со степенью уверенности величиной 0,95 и допустимой ошибкой 0,05 определяется по формуле (1) [15]:

$$n = \frac{(x \cdot \vartheta)^2}{\varepsilon^2} = \frac{(1,96 \cdot 28,1)^2}{5^2} \approx 122, \quad (1)$$

где x – коэффициент доверительной вероятности $P(x)$, для $P(0,95) = 1,96$; ϑ – значение меры изменчивости

$$\vartheta = (\sigma/X) \cdot 100\% = (0,534/1,9) \cdot 100\% = 28,1,$$

представляющее собой выраженное в процентах отношение среднеквадратического отклонения (σ) выборки к среднему арифметическому значению (\bar{X}); ε – показатель точности наблюдений, равный допустимой ошибке, не превышающей 5 %.

Результаты первичной обработки данных показали, что количество проведенных натурных наблюдений позволяет получить достоверный результат с вероятностью 0,95.

Для построения распределения количества автомобилей на расстояниях

от резервуара СУГ определяется количество вариационных рядов по формуле Стерджесса (2);

$$k = 1 + 3,322 \cdot \lg 450 = 10 \quad (2)$$

При этом длина интервалов вариационных рядов определяется как отношение размаха вариации, равное 2,2, на количество интервалов вариации, равное 10, что составит 0,22 (округляется до 0,25).

Для визуализации распределения значений выборки наблюдений по интервалам вариационных рядов подсчитывается количество значений, попавших в тот или иной интервал и ставится черточка, результаты сводятся в табл. 3.

Таблица 3. Распределение наблюдаемых значений по расстояниям

Table 3. Distribution of observed values by distances

№ No	Интервалы, м Intervals, m	Среднее значение, м Average value, m	Подсчет отдельных значений Counting individual values	Частота Frequency
1	0,85 – 1,10	0,98		28
2	1,10 – 1,35	1,23		49
3	1,35 – 1,60	1,48		65
4	1,60 – 1,85	1,73		65
5	1,85 – 2,10	1,98		82
6	2,10 – 2,35	2,23		55
7	2,35 – 2,60	2,48		56
8	2,60 – 2,85	2,73		29
9	2,85 – 3,10	2,98		18
10	3,10 – 3,35	3,23		3
				$\Sigma = 450$

По подсчитанным частотам распределения наблюдательных значений строится гистограмма и полигон распределения количества автомобилей на расстоянии от резервуара СУГ (рис. 3).

Статистическая обработка данных наблюдений показала, что минимальное

среднее значение расстояния между автомобилем и резервуаром СУГ составляет 0,98 м, в дальнейших теоретических исследованиях принимается расстояние 1 м.

По полученным исходным данным по расположению автомобиля на расстоя-

нии 1 м от резервуара СУГ создается компьютерная модель в программном комплексе FDS с использованием вычислительной гидрогазодинамики на основе полевого математического моделирования пожара, основой которой являются закон сохранения массы, энергии и импульса (рис. 4).

Результаты моделирования показали (рис. 5), что огневое воздействие на боковую стенку резервуара СУГ на расстоянии 1 м при горении автомобиля приведет к его перегреву и взрыву через 167 секунд, что определяет дальнейшее направление исследования по повышению безопасности людей на модульной АГЗС [16].

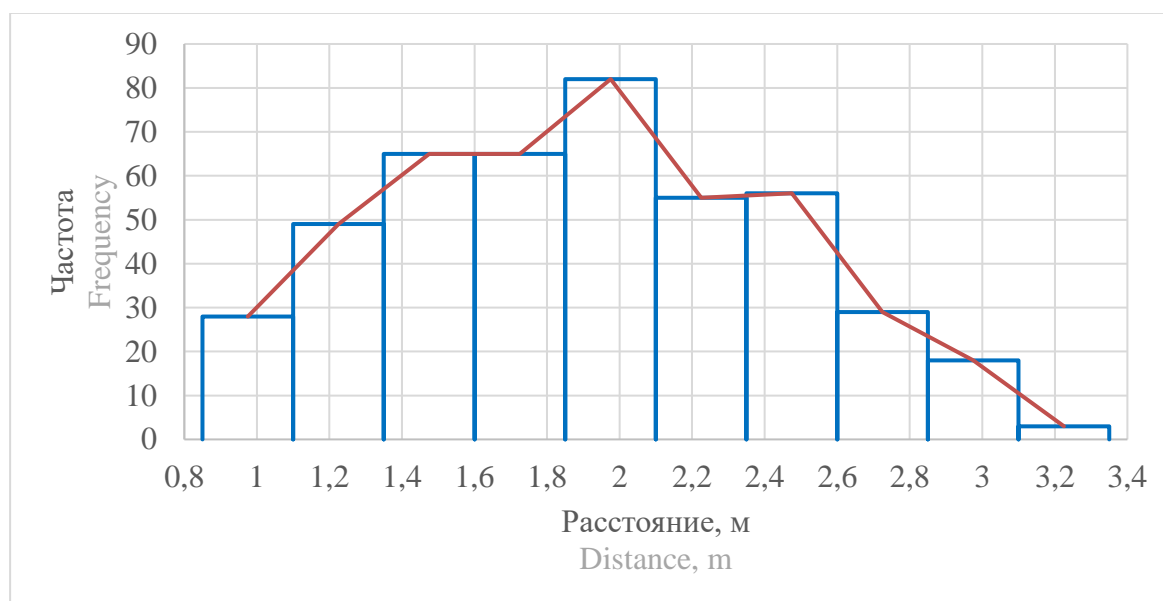


Рис. 3. Гистограмма распределения количества автомобилей на расстоянии от резервуара СУГ

Fig. 3. Histogram of the distribution of the number of cars at a distance from the LPG tank

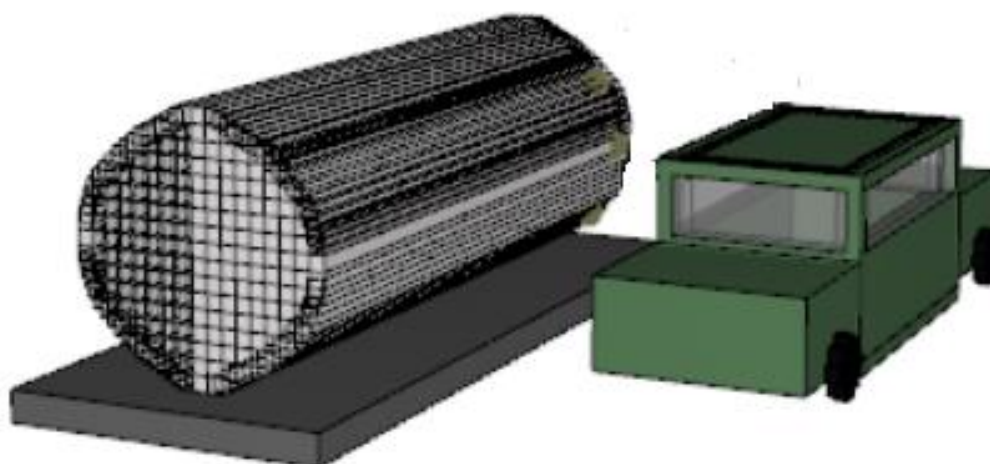
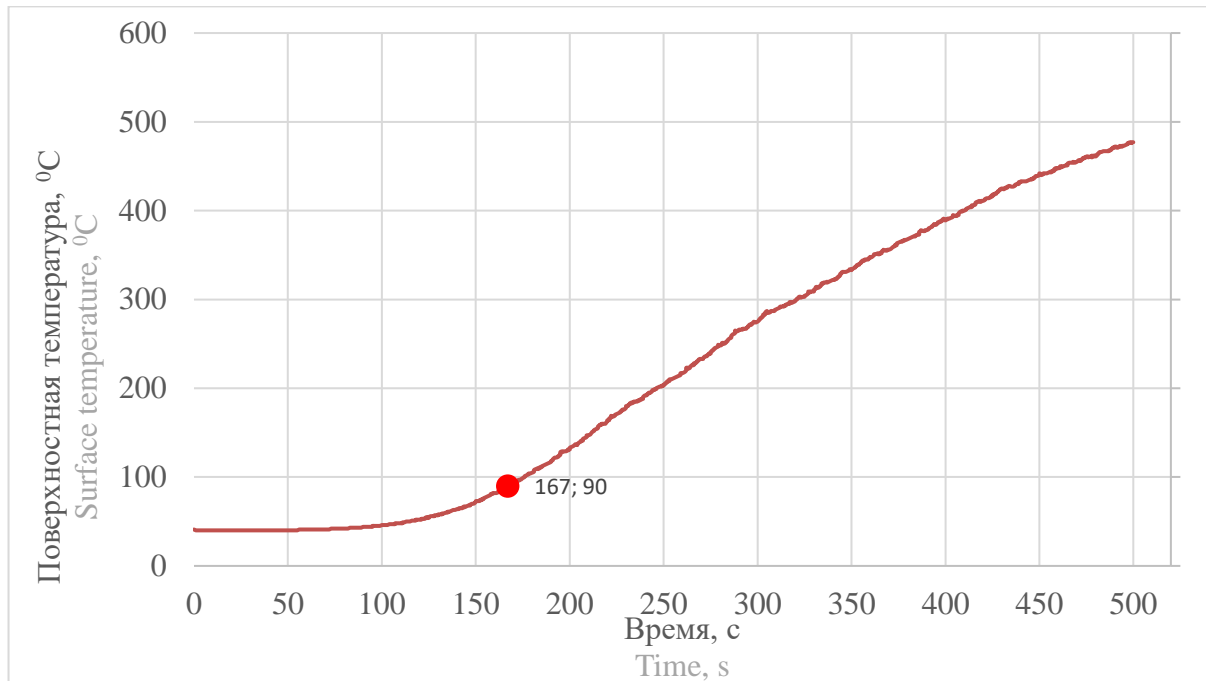


Рис. 4. Компьютерная модель модульной АГЗС**Fig. 4.** Computer model of a modular gas filling station**Рис. 5.** График прогрева боковой стенки резервуара СУГ**Fig. 5.** Schedule of heating the side wall of the LPG tank

Заключение

На основании проведенных теоретических исследований сделаны следующие выводы.

1. Анализ литературных источников показал, что нормы проектирования модульных АГЗС в части противопожарных расстояний отсутствуют, и исследования огневого воздействия на резервуар СУГ при горении автомобиля не проводились.

2. Полученные методом видеонаблюдения 450 значений по расположению автомобилей относительно резервуара СУГ структурированы и обработаны статистическим методом с подтверждением достаточности количества наблюдений со степенью уверенности в 95 %.

3. Построенная гистограмма и полигон распределения количества автомобилей на расстоянии от резервуара СУГ

показывает, что выборка данных подчиняется нормальному закону распределения Гаусса, при этом минимальное среднее значение расстояния между автомобилем и резервуаром СУГ составляет 1 м, которое будет использовано в дальнейших экспериментальных и теоретических исследованиях как сценарий развития пожара при горении автомобиля.

4. Результаты моделирования с учетом полученных данных по расположению автомобиля на расстоянии 1 м от резервуара СУГ показали, что критическая поверхностная температура наступает через 167 секунд, после чего произойдет взрыв. Поэтому необходимо проведение дальнейших исследований по определению безопасных расстояний между резервуаром СУГ и газозаправочной колонкой (размещения автомобиля), в том числе с учетом климатических условий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Парфененко А. П., Тимофеев А. Б. Проблемы нормирования противопожарных расстояний на территории многопливных автозаправочных станций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 2 (36). С. 99–103.
2. Parfyonenko A.P., Timofeev A.B. Assessment of designing multi-fuel filling stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 1001(1), Pp. 1-6. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012068.
3. Moodie K., Cowley L.T., Denny R.B., Small L.M., Williams I. Fire engulfment tests on a 5 tonne LPG tank // Journal of Hazardous Materials, 1988, Vol. 20, Pp. 55–71. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87006-7.
4. Droste B., Schoen W. Full-Scale Fire Tests with Unprotected and Thermal Insulated LPG Storage Tanks // Journal of Hazardous Materials, 1988, Vol. 20. Pp. 41-53. DOI: 10.1016/0304-3894(88)80043-8.
5. Droste B., Schoen W., Probst U. Experimental investigations of fire protection measures of LPG storage tanks // In: 6th International Loss Prevention Symposium “Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries” [Proceeding of Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)], 1989, Vol. IV, Pp. 51-1-17.
6. Droste B. Fire protection of LPG tanks with thin sublimation and intumescent coatings // Fire Technology. 1992. Vol. 28. Pp. 257-269. DOI: 10.1007/BF01857695.
7. Heymes F., Aprin L., Dusserre G., Birk A., Slangen P., Baptiste J., Henri F. An experimental study of an LPG tank at low filling level heated by a remote wall // Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, Vol. 26(6). Pp. 1484-1491. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.015.
8. Heymes F., Aprin L., Forestier S., Slangen P., Jarry J., François H., Dusserre G. Impact of a distant wildland fire on an LPG tank // Fire Safety Journal, 2013, Vol.61. Pp. 100-107. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.08.003.
9. Scarponi G., Landucci G., Heymes F., Cozzani V. Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires // Process Safety and Environmental Protection, 2017, Vol. 114. Pp. 251-270. DOI: 10.1016/j.psep.2017.12.013.
10. Ricci F., Scarponi G., Pastor E., Planas E., Cozzani V. Safety distances for storage tanks to prevent fire damage in Wildland-Industrial Interface // Process Safety and Environmental Protection, 2021, Vol.147. Pp. 693-702. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.002.
11. Моделирование поведения железнодорожной цистерны с СУГ в очаге пламени / В. Н. Филиппов, Ю. Н. Шебеко, В. М. Пономарев и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 11. С. 41–51.
12. Результаты комплексных исследований пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов / В. Н. Филиппов, В. Г. Попов, С. В. Беспалько и др // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 10. С. 43–49.
13. Костюхин А. Н. Исследование и усовершенствование способов противопожарной защиты баллонов со сжиженными углеводородными газами: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 161 с.
14. Шубникова И. С., Палагута К. А. Анализ способов и алгоритмов определения параметров объекта и расстояния до него по изображению // Надежность и качество : труды междунар. симпозиума. Пенза : Издательство ПГУ, 2013. Т. 1. С. 352–355.
15. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М., 1971. 576 с.
16. Парфененко А. П., Тимофеев А. Б. Исследование влияния климатических условий на прогрев внешней стенки резервуара СУГ // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31. № 6. С. 68–77.

REFERENCES

1. Parfyonenko A.P., Timofeev A.B. Problems of fire-fighting distance on the territory of multi-fuel filling stations. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2021; 2(36):99-103. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46288950> (rus).
2. Parfyonenko A.P., Timofeev A.B. Assessment of designing multi-fuel filling stations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020; 1001(1):1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012068.
3. Moodie K., Cowley L.T., Denny R.B., Small L.M., Williams I. Fire engulfment tests on a 5 tonne LPG tank. Journal of Hazardous Materials. 1988; 20:55–71. DOI: 10.1016/0304-3894(88)87006-7.
4. Droste B., Schoen W. Full-Scale Fire Tests with Unprotected and Thermal Insulated LPG Storage Tanks. Journal of Hazardous Materials. 1988; 20:41-53. DOI: 10.1016/0304-3894(88)80043-8.
5. Droste B., Schoen W., Probst U. Experimental investigations of fire protection measures of LPG storage tanks. In: 6th International Loss Prevention Symposium “Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries” [Proceeding of Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)]. 1989; IV:51-1-17.
6. Droste B. Fire protection of LPG tanks with thin sublimation and intumescent coatings. Fire Technology. 1992; 28:257–269. DOI: 10.1007/BF01857695.

7. Heymes F., Aprin L., Dusserre G., Birk A., Slangen P., Baptiste J., Henri F. An experimental study of an LPG tank at low filling level heated by a remote wall. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013; 26(6):1484–1491. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.015.
8. Heymes F., Aprin L., Forestier S., Slangen P., Jarry J., François H., Dusserre G. Impact of a distant wildland fire on an LPG tank. *Fire Safety Journal*. 2013; 61:100–107. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.08.003.
9. Scarponi G., Landucci G., Heymes F., Cozzani V. Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 114:251–270. DOI: 10.1016/j.psep.2017.12.013.
10. Ricci F., Scarponi G., Pastor E., Planas E., Cozzani V. Safety distances for storage tanks to prevent fire damage in Wildland-Industrial Interface. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021; 147:693–702. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.002.
11. Filippov V.N., Shebeko Yu.N., Ponomarev V.M., Navtsenya V.Yu., Bepalco S.V., Plitsina O.V. Modeling of the behavior of the railway LPG tank in the hearth flame. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(11):41–51 (rus).
12. Filippov V.N., Popov V.G., Bepalco S.V., Shebeko Yu.N., Navtsenya V.Yu. Results of complex researches of fire and explosion safety of railway tanks for transportation of liquefied petroleum gases. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):43–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49 (rus).
13. Kostyukhin A.N. Research and improvement of methods of fire protection of cylinders with liquefied petroleum gases. *Cand. techn. sci. Diss. Moscow, 2010; 161. (rus)*.
14. Shubnikova I.S., Palaguta K.A. Analysis of methods and algorithms for determining the parameters of an object and the distance to it from the image. *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*. 2013; 1:352–355 (rus).
15. Mitropolsky A.K. *Technique of statistical calculations*. Science, 1971; 576. (rus)
16. Parfenenko A.P., Timofeev A.B. A study on the influence of climatic conditions on the heating of an outer wall of a liquified hydrocarbon gas tank. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):68–77. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.68-77 (rus).

Информация об авторе

Тимофеев Артем Борисович, аспирант кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID 0000-0001-6645-4302; AUTHOR ID 1073991; e-mail: timofeev-ab@list.ru

Information about the authors

Artem B. Timofeev, Graduate Student of the Department of Integrated Safety in Construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, 129337, Moscow, Yaroslavl highway, 26; ORCID: 0000-0001-6645-4302; AUTHOR ID: 1073991; e-mail: timofeev-ab@list.ru