

Исследование влияния климатических условий на прогрев внешней стенки резервуара СУГ

Александр Павлович Парфененко ✉, Артем Борисович Тимофеев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью статьи является теоретическое исследование влияния климатических условий регионов Российской Федерации на прогрев боковой стенки резервуара сжиженного углеводородного газа (СУГ) при непосредственном охвате пламени горения автомобиля на АЗС.

Задачи исследования:

- провести анализ нормативно-правовой базы в области пожарной безопасности по проектированию АЗС;
- провести анализ источников литературы отечественных и зарубежных авторов по проведенным экспериментальным исследованиям огневого воздействия пламени на резервуар СУГ;
- провести численное моделирование горения автомобиля в холодное и теплое время года с учетом наибольшей скорости ветра в РФ в холодный и теплый периоды времени года;
- провести численное моделирование в теплый период времени с целью определения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ и расчетной скорости ветра соответствующей температуры окружающей среды региона России.

Материалы и методы. Используется метод математической статистики для обработки максимальных значений температуры и скорости ветра окружающей среды для каждого региона России, а также получения эмпирических значений скорости ветра и температуры окружающей среды регионов России. Методом математического моделирования пожара проведены расчеты в теплый период времени года с целью определения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ и расчетной скорости ветра соответствующей температуры окружающей среды регионов России.

Результаты. Установлена зависимость между скоростью ветра и температурой окружающей среды регионов России, а также зависимость наступления критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от климатических условий регионов России.

Выводы. Полученные результаты исследований позволяют разработать мероприятия в части проектирования противопожарных расстояний между площадкой для автоцистерны топливозаправщика (парковки автомобиля перед его заправкой СУГ), резервуаром СУГ, газозаправочной колонки СУГ.

Ключевые слова: автомобильная заправочная станция; сжиженный углеводородный газ; противопожарные расстояния; скорость ветра; температура окружающей среды; безопасность людей

Для цитирования: Парфененко А.П., Тимофеев А.Б. Исследование влияния климатических условий на прогрев внешней стенки резервуара СУГ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 68–77. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.68-77

✉ Парфененко Александр Павлович, e-mail: parf01@inbox.ru

A study on the influence of climatic conditions on the heating of an outer wall of a liquified hydrocarbon gas tank

Aleksander P. Parfenenko ✉, Artem B. Timofeev

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

ABSTRACT

Introduction. The article contains a theoretical study on the influence of climatic conditions in various regions of the Russian Federation on the heating of a side wall of a liquified hydrocarbon gas (LHG) tank if the fire runs through the whole vehicle, located at a gas station.

Objectives of the study:

- analysis of the fire safety legislative framework applicable to gas station design;
- analysis of sources of domestic and foreign experimental studies on the fire impact of flames on an LHG tank;
- numerical simulation of the vehicle combustion in cold and warm seasons, taking into account the highest wind velocity in the Russian Federation;

- numerical simulations, conducted for a warm season to identify the critical surface temperature of a side wall of an LHG tank, and the design wind velocity corresponding to the air temperature in a Russian region.

Materials and methods. The method of mathematical statistics is used to process maximum values of the air temperature and wind velocity for each Russian region and obtain the empirical values of the wind velocity and air temperature in the Russian regions. Calculations were made using the method of mathematical modelling of fire in warm periods to identify the critical surface temperature of a side wall of an LHG tank and the design wind velocity corresponding to the air temperature in the regions of Russia.

Results. A dependence between the wind velocity and the air temperature in the Russian regions, as well as a dependence between the critical surface temperature of a side wall of an LHG tank and climatic conditions of the Russian regions was identified.

Conclusions. The results, obtained by the researches, can be used to design the fire separation distance between the site designated for a fuel tanker truck (the parking lot for a vehicle before its fueling), an LHG tank and a gas station.

Keywords: vehicle fueling station; liquefied hydrocarbon gas; fire separation distance; wind velocity; air temperature; human safety

For citation: 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).

✉ Aleksander Pavlovich Parfenenko, e-mail: parf01@inbox.ru

Введение

Нефтегазовая отрасль в Российской Федерации имеет ключевое значение для улучшения жизни человека. Потребление энергии с каждым годом увеличивается, и переход от традиционных видов топлив к альтернативным (сжиженный углеводородный и природный газ) имеет стратегическое значение [1], что способствует совершенствованию нормативно-правовой базы в области проектирования и эксплуатации автомобильных заправочных станций (АЗС), в том числе транспорта, работающего на газобаллонном оборудовании [2]. Современная нормативная база в области пожарной безопасности по проектированию АЗС в части противопожарных расстояний [3, 4] предъявляет высокие требования к размещению технологического оборудования, зданий и сооружений на противопожарных расстояниях как на самой территории АЗС, так и за ее пределами. Однако производители технологического оборудования для АЗС предлагают, в частности, автомобильную газозаправочную станцию (АГЗС) в модульном исполнении, а именно устройство на единой металлической раме газозаправочной колонки (ГЗК), насосного агрегата перекачки жидкой фазы СУГ, трубопроводной обвязки и модуля (резервуара) СУГ. При этом требование пожарной безопасности при проектировании модульной АГЗС отсутствует и проведение огневых исследований непосредственного воздействия пламени при горении автомобиля на стенки резервуара СУГ является актуальной темой.

Обеспечение пожарной безопасности АГЗС, анализ пожарной опасности опасных производственных объектов, транспорта с СУГ и оценка последствий при проектных аварийных ситуациях на объектах с СУГ рассмотрены авторами [5–7], что позволяет сделать вывод о существенном ущербе

как материальном, так и причинении вреда жизни и здоровью потребителей топлива, разработаны мероприятия по снижению рисков возникновения проектных аварий на АЗС.

Отечественными авторами [8–11] проведены исследования поведения в очаге пламени цистерн, баллонов и резервуаров СУГ, по результатам работ разработаны средства защиты указанных объектов и усовершенствованы способы противопожарной защиты с учетом комплекса технических мероприятий, обеспечивающих их пожарную безопасность (применение поверхностной и конструктивной огнезащиты, совершенствование устройства предохранительных клапанов на емкостном оборудовании СУГ).

Зарубежными авторами [12] получены результаты трех огневых испытаний (резервуар СУГ, охваченный пламенем горения дизеля) с незащищенными резервуарами для хранения СУГ объемом 4,85 м³ и двух огневых испытаний с резервуарами СУГ того же типа, которые были оснащены тепловой изоляцией. В испытании № 2 (незащищенный резервуар СУГ) избыточное давление разрыва было самым высоким (3,9 МПа), время до разрыва стенок емкости было самым низким 7 мин 20 с, в момент взрыва резервуара СУГ температура жидкой фазы СУГ составляла 84–87 °С, температура внешней стенки резервуара (300 °С в положении парового пространства 45 и 420 °С в верхней его части), тепловой поток приблизительно 47 кВт/м². Экспериментами установлено, что конструктивная огнезащита (теплоизоляция) способна предотвратить разрыв стенок СУГ при полном охвате огнем резервуара СУГ в течение 90 мин.

Авторами [13] по результатам экспериментальных исследований установлено, что система водяного пожаротушения резервуара СУГ, охваченного пламенем, с интенсивностью 400 л/(м²·ч), оснащен-

ного сбросным клапаном СУГ, предотвращает разрушение стенок резервуара СУГ в течение 90 мин огневого воздействия.

Экспериментальные исследования [14] показали, что применение поверхностной огнезащиты резервуара СУГ, покрытого тонким сублимационным вспучивающимся покрытием (CARTEK III) толщиной 8,8 мм, обеспечивает целостность стенок резервуара в течение 100 мин.

В работе [15] авторами проведены огневые испытания с резервуаром СУГ объемом 2300 л на расстояниях от 1,5 до 3,8 м от огневого воздействия пламени, представленного в виде факелов (огненной стены), состоящих из труб диаметрами 50 мм с отверстиями 2 мм, в качестве горючего использован природный газ. Результаты показали, что на поверхностях резервуара СУГ падающий тепловой поток составляет в диапазоне от 24 до 43 кВт/м², максимальная поверхностная температура боковой стенки резервуара варьировалась от 294 до 386 °С, вследствие чего предохранительный клапан вышел из строя и образовалось струйное горение факела СУГ. Разрушения стенок резервуара не произошло. Даны рекомендации по изготовлению предохранительных клапанов с высокой температурой плавления, для предотвращения образования струйного истечения СУГ.

На полигоне Спейд Адам были проведены испытания [16] огневого воздействия теплового потока, соответствующего лесному пожару размерами: длиной 100 м и высотой 40 м на стенки резервуара СУГ. Результаты показали, что безопасное расстояние составляет 30 м между лесным пожаром и резервуаром СУГ, при этом температура стенок резервуара СУГ не превысила 427 °С, тепловой поток составил не более 26 кВт/м², что обеспечивает безопасную эксплуатацию резервуара СУГ. По полученным исходным данным (критической температуры и давления резервуара) разработана 2D CFD-модель и подтверждена ее адекватность на соответствие имеющимся экспериментальным данным, что позволяет разрабатывать мероприятия по безопасной эксплуатации и проектированию резервуаров СУГ вблизи лесопарков [17]. Разработанная авторами [18] методология позволяет обеспечить подход к определению безопасных расстояний между лесными насаждениями и резервуарами СУГ при проектировании генеральных планов опасных производственных объектов.

Моделирование поведения резервуара СУГ, охваченного пламенем, рассмотрено в работах [19, 20], предложенные подходы позволяют оценить крупномасштабные аварии резервуаров СУГ (эффект «домино») с целью разработки мероприятий по безопасной эксплуатации и проектированию нефтегазовых объектов.

В работе [21] автором проведены огневые испытания поведения 5-тонного резервуара СУГ с заполнением от 22 до 72 % продолжительностью от 12 до 30 мин, охваченного пожаром пролива керосина. Максимальные поверхностные температуры стенок резервуара варьировались от 570 до 660 °С. С повышением давления в резервуаре через 5–7 мин после начала пожара срабатывал предохранительный клапан и воспламенялись пары СУГ с последующим струйным горением газа. Цель работы заключалась в получении данных тепловых потоков, поверхностных температур стенки резервуара, давления и температуры СУГ, а также рабочих характеристик предохранительных клапанов для разработки математических моделей.

Проведенный анализ экспериментальных исследований огневого воздействия пламени на резервуар СУГ отечественных и зарубежных авторов показал, что исследования в системе «горение автомобиля – расстояние – резервуар СУГ – климатические условия региона» не проводились. В результате чего необходимо провести численное моделирование воздействия пламени при горении автомобиля на боковую стенку резервуара СУГ с учетом климатических условий регионов России.

Материалы и методы

Определение критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ и расчетной скорости ветра соответствующей температуры окружающей среды регионов России проводится методом математического моделирования пожара. Полевой метод математического моделирования пожара выражается основными уравнениями закона сохранения массы, импульса и энергии [22].

Методами математической статистики [23]:

- определяется количество интервалов вариационных рядов значений скорости ветра от максимальной температуры окружающей среды в России;
- строится гистограмма распределения температуры окружающей среды и скорости ветра;
- устанавливается зависимость между скоростью ветра и температурой окружающей среды;
- устанавливается зависимость наступления критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от климатических условий регионов России.

Результаты исследования

Для установления зависимости наступления критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от климатических условий регионов России предварительно проведено численное моделирование для выявления, в какой период

времени года проводить теоретическое и экспериментальное исследование. Результаты численного эксперимента по оценке влияния горения автомобиля на температуру внешней стенки резервуара СУГ для Камчатского края проведены на рис. 1–4.

Проведенное численное моделирование показало, что наименьшее время достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ при горении автомобиля с учетом ветровой нагрузки наступает в теплый период времени года. Поэтому дальнейшие исследования необ-

ходимо проводить в теплый период времени года как наиболее опасный сценарий аварии на АЗС.

Разброс максимальных значений температуры и скорости ветра окружающей среды на территории РФ с привязкой к региону приведен на рис. 5 (данные берутся из СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология»).

Разброс данных, представленных на рис. 5, позволяет с использованием методов математической статистики провести ранжирование значений скорости ветра от максимальной температуры



Рис. 1. Зависимость температуры окружающей среды в холодный период года и скорости ветра для Камчатского края

Fig. 1. Dependence between the air temperature in a cold season and the wind velocity for the Kamchatka Region

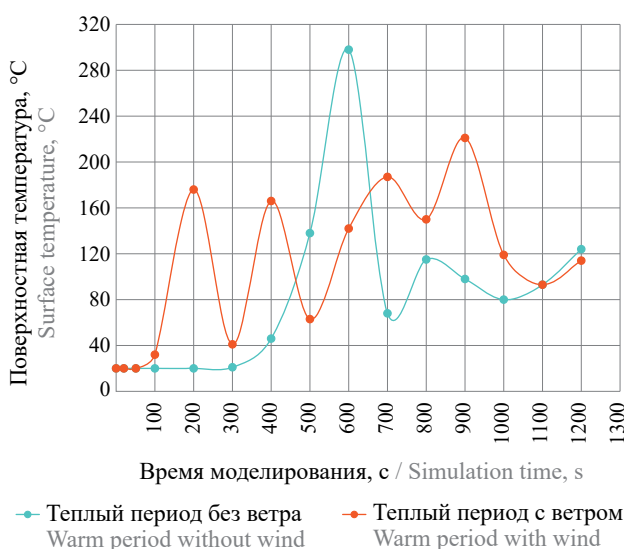


Рис. 2. Зависимость температуры окружающей среды в теплый период года и скорости ветра для Камчатского края

Fig. 2. Dependence between the air temperature in a warm season and the wind velocity for Kamchatka Region

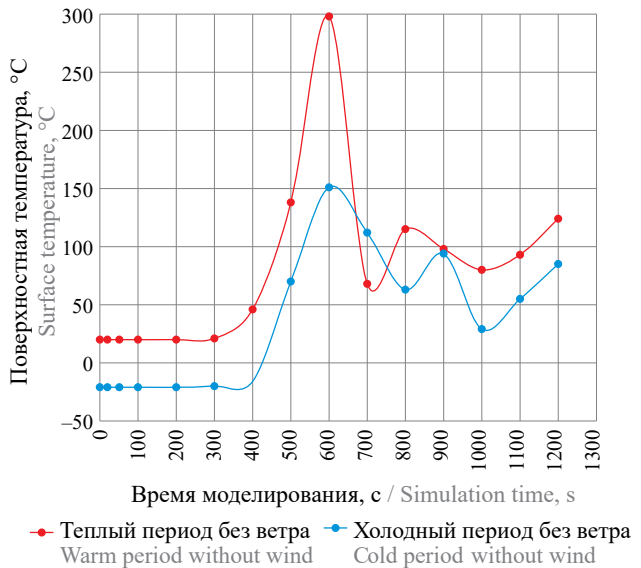


Рис. 3. Зависимость температуры окружающей среды в холодный период года и скорости ветра для Камчатского края

Fig. 3. Dependence between the air temperature in a cold season and the wind velocity for the Kamchatka Region

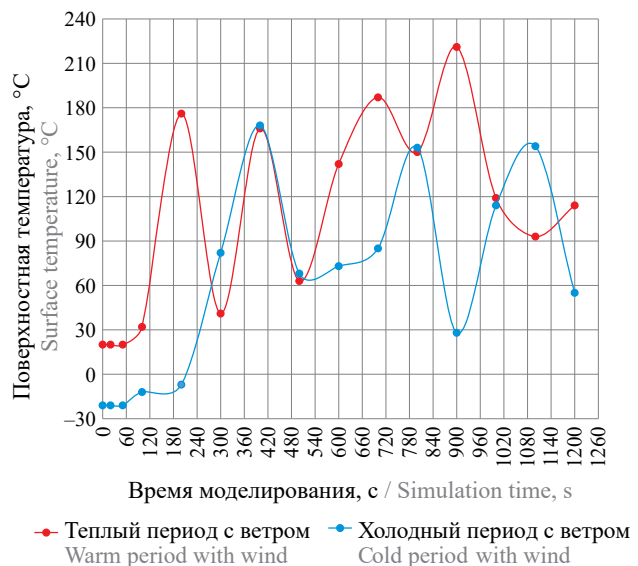


Рис. 4. Зависимость температуры окружающей среды в теплый период года и скорости ветра для Камчатского края

Fig. 4. Dependence between the air temperature in a warm season and the wind velocity for the Kamchatka Region

окружающей среды и определить число интервалов вариационного ряда при диапазоне минимальных и максимальных значений, объединив при этом однородные климатические показатели регионов в одну выборочную совокупность. Гистограмма распределения температуры окружающей среды и скорости ветра, построенная с помощью программного комплекса SPSS Statistics, приведена на рис. 6.

Для каждого интервала были определены средние эмпирические значения скорости ветра и температуры окружающей среды и построен график, представленный на рис. 7.

Полученные эмпирические данные были аппроксимированы логарифмической кривой для установления теоретической зависимости скорости ветра от температуры окружающей среды, рис. 8.

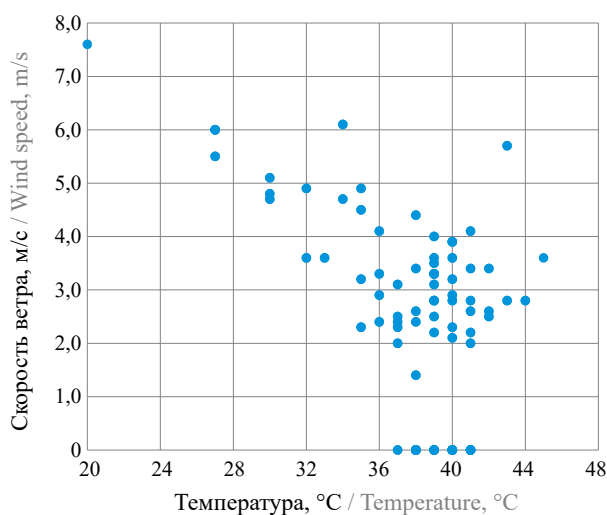


Рис. 5. Разброс значений скорости ветра от максимальной температуры окружающей среды в России

Fig. 5. The spread of wind velocity values depending on the maximum air temperature in Russia

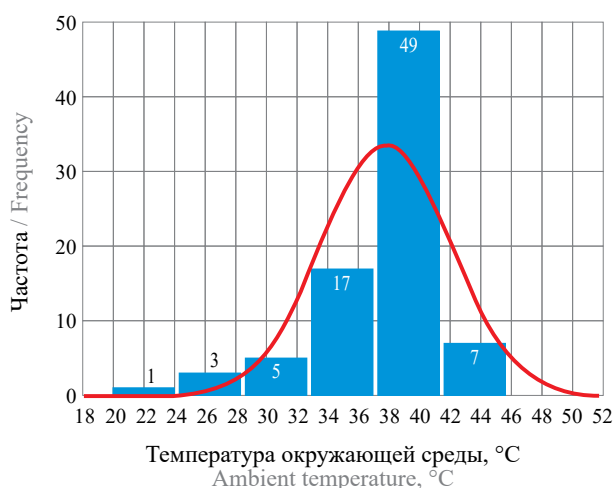


Рис. 6. Гистограмма распределения температуры окружающей среды при скорости ветра

Fig. 6. Histogram showing the dependence between the air temperature and the wind velocity

Полученная логарифмическая теоретическая зависимость с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,996$ позволила описать влияние двух климатических факторов (скорость ветра и температура окружающей среды в определенном регионе России) на расчетную скорость ветра. Зависимость представлена в виде формулы:

$$V_p = V_{\max}^{T, \Pi} \cdot \left(1 - 1,13 \ln \left(\frac{T_{o, \text{cp}}^{T, \Pi}}{T_{\min}^{T, \Pi} + 2} \right) \right), \quad (1)$$

где V_p — расчетная скорость ветра, м/с;

$V_{\max}^{T, \Pi}$ — максимальная скорость ветра в регионе, м/с;

$T_{o, \text{cp}}^{T, \Pi}$ — температура окружающей среды в регионе, °C;

$T_{\min}^{T, \Pi}$ — минимальная температура в регионе, °C.

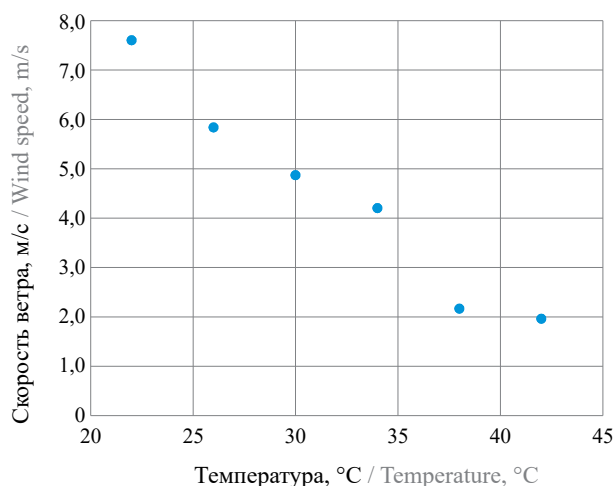


Рис. 7. График эмпирических значений скорости ветра от температуры окружающей среды

Fig. 7. The graph of empirical wind velocity values relative to the air temperature

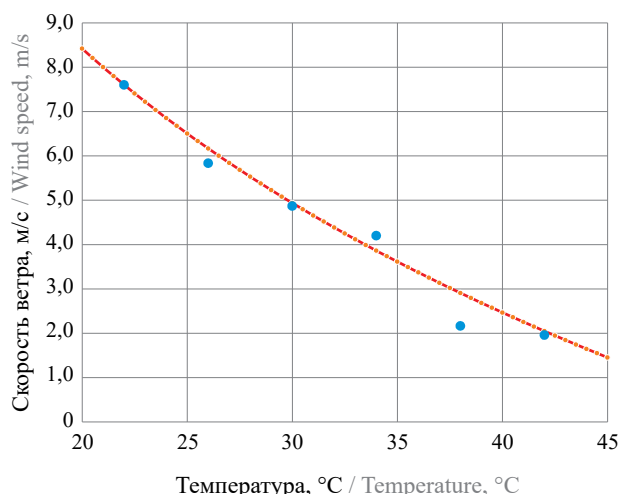


Рис. 8. Теоретическая зависимость скорости ветра от температуры окружающей среды

Fig. 8. Theoretical dependence between the wind velocity and the air temperature

Установленная зависимость была использована при проведении численного эксперимента горения автомобиля в теплый период года с целью определения времени достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ при температуре окружающей среды 20, 25, 30, 35, 40 и 45 °С. Результаты численного эксперимента представлены на рис. 9–14.

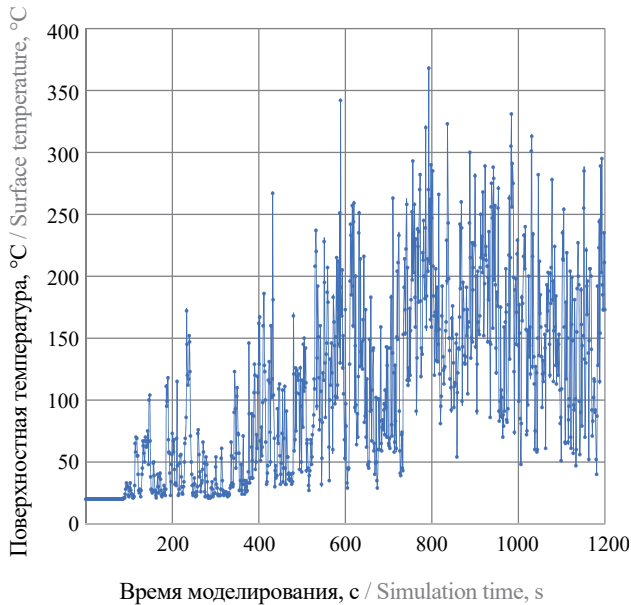


Рис. 9. Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 20 °С

Fig. 9. Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of 20 °С

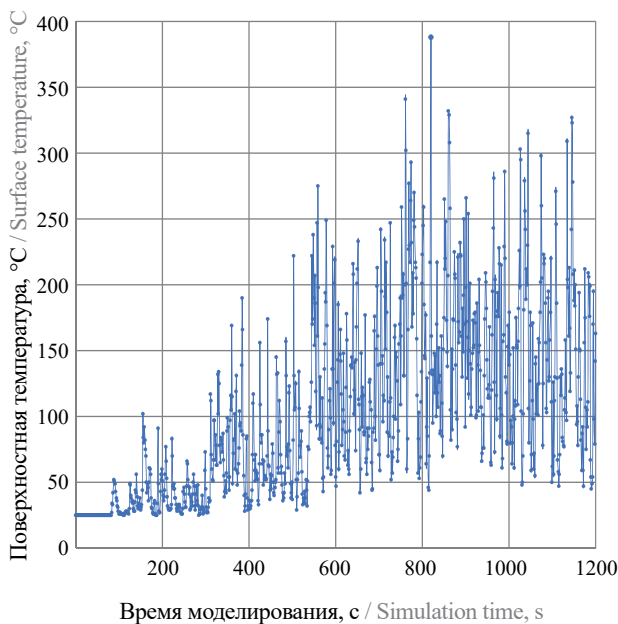


Рис. 10. Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 25 °С

Fig. 10. Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of 25 °С

Результаты численного моделирования позволили установить значения времени достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ в зависимости от расчетной температуры окружающей среды для установленных ранее температурных интервалов (рис. 6, 7). Полученные значения были аппроксимированы полиномом 3-й степени. Теоретическая зависимость представлена на рис. 15.

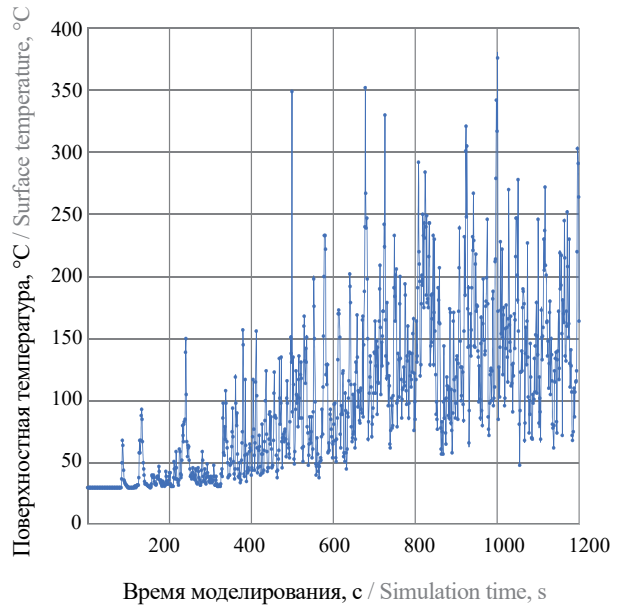


Рис. 11. Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 30 °С

Fig. 11. Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of temperature 30 °С

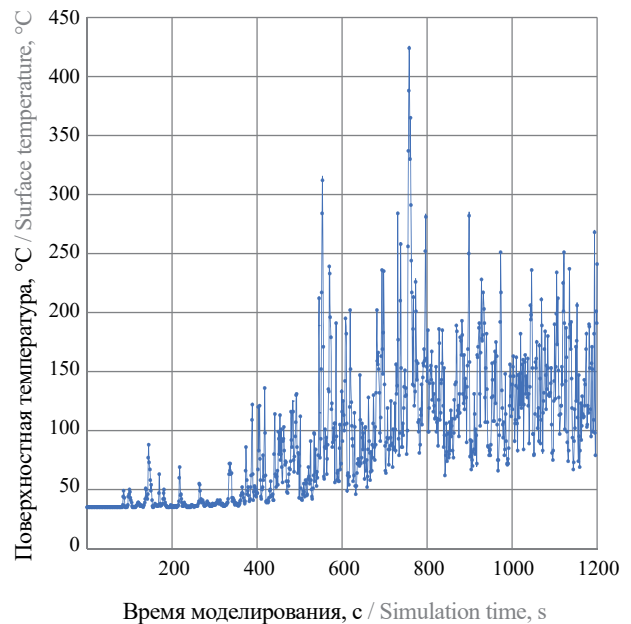


Рис. 12. Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 35 °С

Fig. 12. Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of 35 °С

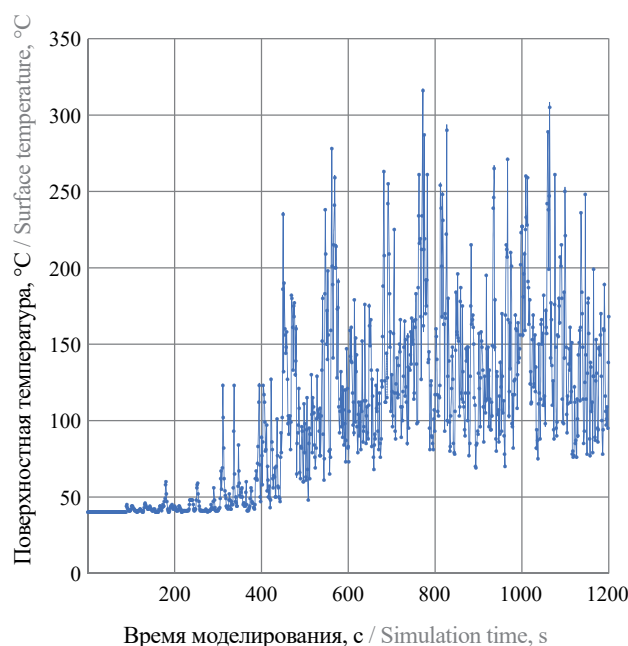


Рис. 13. Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 40 °С

Fig. 13. Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of 40 °C

Из графика рис. 15 видно, что при расчетной температуре окружающей среды 20 и 25 °С время достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ наступает примерно через 150 с, при температуре окружающей среды 30 °С — через 245 с, при температуре окружающей среды 35–45 °С время достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ наступает примерно в интервале от 300 до 400 с. Быстрое наступле-

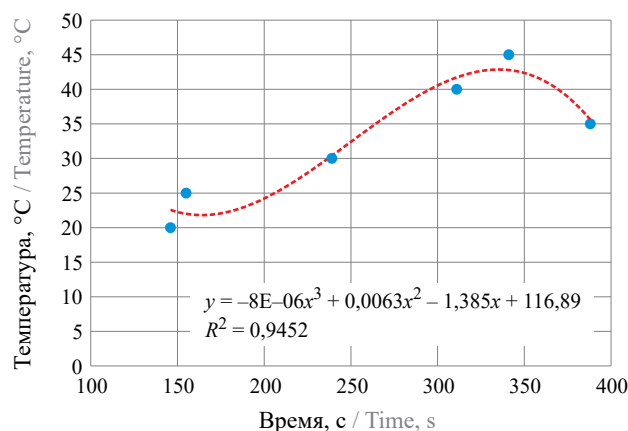


Рис. 15. Зависимость наступления критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от климатических условий регионов России

Fig. 15. Dependence between the onset of critical surface temperature of a side wall of an LPG tank and the climatic conditions of Russian regions

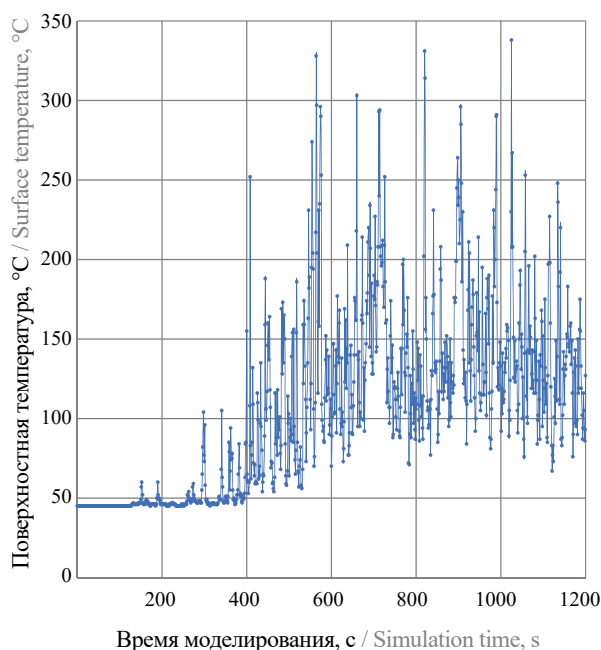


Рис. 14. Зависимость поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ от времени при температуре окружающей среды 45 °С

Fig. 14. Dependence between the surface temperature of a side wall of an LHG tank and time at the air temperature of 45 °C

ние времени достижения критической поверхностной температуры боковой стенки резервуара СУГ при температуре окружающей среды 20 и 25 °С объясняется высокими показателями ветровых нагрузок в рассматриваемом интервале температур.

Выводы

Проведенные теоретические исследования показали, что критическая поверхностная температура боковой стенки резервуара СУГ наступает быстрее в теплый период времени года с учетом боковой ветровой нагрузки.

Установленная зависимость (1), описывающая два фактора (скорость ветра и температуру окружающей среды в определенном регионе России), позволит учитывать расчетную скорость ветра, влияющую на прогрев боковой стенки резервуара СУГ до наступления критической поверхностной температуры.

Установленная зависимость (рис. 15) наступления критической поверхностной температуры от температуры окружающей среды показывает, что при определении противопожарных расстояний при проектировании АЗС необходимо учитывать климатические условия региона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Николайчук Л.А., Дьяконова В.Д. Современное состояние и перспективы развития рынка газомоторного топлива в России // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 2 (33). С. 65. DOI: 10.15862/106EVN216
2. Певнев Н.Г., Раенбагина Э.Р. Совершенствование нормативной базы по производству и безопасной эксплуатации газобаллонных автомобилей // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2016. Т. 1 (47). С. 47–53. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25582769>
3. Парфененко А.П., Тимофеев А.Б. Проблемы нормирования противопожарных расстояний на территории многотопливных автозаправочных станций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 2 (36). С. 99–103. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-36-2-99-103
4. Parfyonenko A.P., Timofeev A.B. Assessment of designing multi-fuel filling stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1001. Issue 1. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012068
5. Шавалиев Р.Р., Ягудин Р.И., Валеев Д.О., Елизарьева Е.Н., Марванов Р.В. Обеспечение пожарной безопасности автогазозаправочных станций в городе // Бюллетень результатов научных исследований. 2017. № 1–2. С. 49–59.
6. Хамидуллина Е.А., Ольгина Е.А. Автогазозаправочные станции как источник техногенной опасности // XXI век. Техносферная безопасность. 2016. Т. 1. № 2 (2). С. 21–35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26168218>
7. Гудин С.В., Хабибуллин Р.Ш., Рубцов Д.И., Рубцов В.В. Оценка расчетных величин пожарного риска на территории газораспределительной станции // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 1. С. 32–42. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.32-42
8. Швырков С.А., Воробьев В.В., Петров А.П., Шайхулов С.Ф. Снижение пожарной опасности зданий, проектируемых вблизи автомобильных газозаправочных станций // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 1. С. 13–19. DOI: 10.25257/FE.2018.1.13-19
9. Филиппов В.Н., Шебеко Ю.Н., Пономарев В.М., Навценя В.Ю., Беспалько В.В., Плицына О.В. Моделирование поведения железнодорожной цистерны с СУГ в очаге пламени // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 11. С. 41–51. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.41-51
10. Филиппов В.Н., Попов В.Г., Беспалько С.В., Шебеко Ю.Н., Навценя В.Ю. Результаты комплексных исследований пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 10. С. 43–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49
11. Костюхин А.Н. Исследование и усовершенствование способов противопожарной защиты баллонов со сжиженными углеводородными газами : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 161 с.
12. 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
13. Droste B., Schoen W., Probst U. Experimental investigations of fire protection measures of LPG storage tanks // Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries : 6th International Loss Prevention Symposium [Proceeding of Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)]. 1989. Vol. IV. Pp. 51–17.
14. 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
15. 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. Issue 6. Pp. 1484–1491. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.015
16. 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.fire-saf.2013.08.003
17. 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
18. 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
19. Rum A., Landucci G., Galletti C. Coupling of integral methods and CFD for modeling complex industrial accidents // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. Vol. 53. Pp. 115–128. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.09.006
20. Ming-shu Bi, Jing-jie Ren, Bo Zhao, Wei Che. Effect of fire engulfment on thermal response of LPG tanks // Journal of Hazardous Materials. 2011.

Vol. 192. Issue 2. Pp. 874–879. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.05.107

21. 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

22. Александренко М.В., Акулова М.В., Ибрагимов А.М. Математическое моделирование пожаров // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. № 4–1 (35). С. 28–29.

23. Хусаинов Ф.И. Использование программы SPSS для поиска зависимостей между переменными // *Вестник транспорта*. 2015. № 4. С. 33–37.

REFERENCES

1. Nikolaychuk L.A., Dyakonova V.D. Current state and prospects of development of the market of gas motor fuel in Russia. *Online Journal of Science Studies*. 2016; 8(2):1-9. DOI: 10.15862/106EVN216 (rus).
2. Pevnev N.G., Rayenbagina E.R. Improving the regulations for the production and safe operation of the gas automobile. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; 1(47):47-53. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25582769> (rus).
3. Parfyonenko 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. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-36-2-99-103 (rus).
4. Parfyonenko 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
5. Shavaliyev R.R., Yagudin R.I., Valeev D.O., Elizareva E.N., Marvanov R.V. Ensuring fire safety for autogas filling stations in town. *Bulletin of Scientific Research Result*. 2017; 1-2:49-59. (rus).
6. Khamidullina E.A., Olgina E.A. Gas filling stations as a source of technogenic hazards. *Technosphere Safety. XXI Century*. 2016; 1(2):21-35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26168218> (rus).
7. Gudin S.V., Khabibulin R.Sh., Rubtsov D.I., Rubtsov V.V. Evaluation of fire risk values in the territory of a gas distribution station. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(1):32-42. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.01.32-42 (rus).
8. Shvyrkov S.A., Vorobyev V.V., Petrov A.P., Shaikhulov S.F. Substantiating the geometric parameters of the fire wall in order to ensure fire safety of buildings designed close to automobile gas stations. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2018; 1:13-19. DOI: 10.25257/FE.2018.1.13-19 (rus).
9. 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. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(11):41-51. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.11.41-51 (rus).
10. Filippov V.N., Popov V.G., Bepalko 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. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):43-49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.43-49 (rus).
11. Kostyukhin A.N. *Research and improvement of methods of fire protection of cylinders with liquefied petroleum gases : Cand. Tech. Sci. Diss.* Moscow, 2010; 161. (rus).
12. 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
13. Droste B., Schoen W., Probst U. Experimental investigations of fire protection measures of LPG storage tanks. *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries : 6th International Loss Prevention Symposium [Proceeding of Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)]*. 1989; IV:51-1-17.
14. Droste B. Fire protection of LPG tanks with thin sublimation and intumescent coatings. *Fire Technology*. 1992; 28:257-269. DOI: 10.1007/BF01857695
15. 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
16. 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
17. 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
18. 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
19. Rum A., Landucci G., Galletti C. Coupling of integral methods and CFD for modeling complex industrial accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; 53:115-128. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.09.006
20. Ming-shu Bi, Jing-jie Ren, Bo Zhao, Wei Che. Effect of fire engulfment on thermal response of LPG tanks.

- Journal of Hazardous Materials*. 2011; 192(2): 874-879. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.05.107
21. 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
 22. Aleksandrenko M.V., Akulova M.V., Ibragimov A.M. Mathematical modelling of the fire. *International Research Journal*. 2015; 4-1(35):28-29. (rus).
 23. Khusainov F.I. Using the SPSS program to find dependencies between variables. *Transport Massanger*. 2015; 4:33-37. (rus).

Поступила 24.10.2022, после доработки 15.11.2022;
принята к публикации 28.11.2022

Received October 24, 2022; Received in revised form November 15, 2022;

Accepted November 28, 2022

Информация об авторах

ПАРФЕНЕНКО Александр Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru

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

Вклад авторов:

Парфененко А.П. — научное руководство; развитие методологии; сбор материала; обработка материала; написание статьи; научное редактирование текста.

Тимофеев А.Б. — сбор материала; обработка материала; написание статьи; научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Aleksander P. PARFENENKO, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 800496; Scopus Author ID: 57214086032; ResearcherID: AAP-2933-2020; ORCID: 0000-0001-7490-8773; e-mail: parf01@inbox.ru

Artem B. TIMOFEEV, Postgraduate Student of of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6645-4302; Author ID: 1073991; e-mail: timofeev-ab@list.ru

Authors' contribution:

Aleksander P. Parfenenko — scientific guidance; methodology development; material collection; material processing; article writing; scientific text editing.

Artem B. Timofeev — material collection; material processing; writing an article; scientific text editing.

The authors declare that there is no conflict of interest.