

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 2. С. 41–51
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(2):41-51

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ/REVIEW ARTICLE

УДК 614.841.12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.02.41-51>

Пожарная безопасность объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе

Денис Михайлович Гордиенко, Юрий Николаевич Шебеко✉

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны
 Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
 и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья содержит аналитический обзор отечественных и зарубежных публикаций, посвященных вопросам пожарной безопасности водородных автозаправочных станций (АЗС) и стоянок автомобилей на водородном топливе.

Общая характеристика пожарной опасности объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе. Дана общая характеристика специфики пожарной опасности объектов, использующих газообразный и сжиженный водород.

Водородные заправочные станции. Рассмотрены автозаправочные станции с использованием как газообразного, так и жидкого водорода. Показано, что для водородных АЗС наибольшую опасность представляет компрессорное оборудование, для которого значение потенциального риска на территории станции вблизи него превышает 10^{-4} год⁻¹. Отмечено, что минимальное расстояние от указанного оборудования до окружающих объектов, не относящихся к станции, должно составлять 50 м.

Стоянки автомобилей на водородном топливе. Проанализирована специфика пожарной опасности стоянок для водородных автомобилей. Установлено, что при возникновении факельного горения при истечении водорода из сбросных клапанов топливных баков давление в гараже небольшого объема (индивидуальные гаражи) может достигать значения 55 кПа. Для струи водорода без образования факела указанное давление может достигать значения 10 кПа. Столь значительные давления при образовании факела вызваны высокой нормальной скоростью горения водорода, обуславливающей скорость тепловыделения во фронте пламени, существенно превышающую соответствующую величину для факелов углеводородных газов. Вследствие этого распространение требований, предъявляемых к помещениям для хранения автомобилей на углеводородном топливе, к гаражам для водородных автомобилей (как это регламентировано нормативным документом NFPA 2), может быть ошибочным.

Выводы. Результаты проведенного анализа могут быть использованы при разработке нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе.

Ключевые слова: автозаправочные станции; помещения для хранения автомобилей; газообразный водород; жидкий водород; специфика пожарной опасности; опасные факторы пожара

Для цитирования: Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 2. С. 41–51. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.41-51

✉ Шебеко Юрий Николаевич, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

The fire safety of infrastructure facilities for hydrogen-powered vehicles

Denis M. Gordienko, Yury N. Shebeko✉

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense,
 Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article offers an analytical review of domestic and foreign publications on the fire safety of hydrogen refueling stations and garages for hydrogen-powered vehicles.

General characteristics of the fire hazard of infrastructure facilities for hydrogen-powered vehicles. The authors offer the general characteristic of a specific fire hazard from facilities using compressed and liquid hydrogen.

Hydrogen refueling stations. Refueling stations using compressed and liquid hydrogen were considered in the article. It was found that compressors are the most hazardous items installed at refueling stations; therefore, the value of potential risks, arising in the area of a refueling station, exceeds 10^{-4} year $^{-1}$. Experiments, simulating accidents at hydrogen refueling stations, are described. According to the authors, the minimal distance between the compressor and facilities located outside the station area should exceed 50 m.

Garages for hydrogen-powered vehicles. Features of the fire safety of garages for hydrogen-powered vehicles were analyzed. The authors have found that the overpressure inside a small garage (an individual garage) can reach 55 kPa in case of a jet flame caused by the release of hydrogen through the safety valves of fuel tanks. The overpressure of a hydrogen jet can reach 10 kPa in case of the unignited release of hydrogen. High pressure values that accompany the jet formation are triggered by the high normal burning velocity of hydrogen that boosts the velocity of heat release in the flame front, exceeding the same value for flares of hydrocarbon gases. Therefore, requirements, applicable to storage premises designated for vehicles powered by hydrocarbon fuel, may be erroneously extended to garages for hydrogen-powered vehicles (pursuant to NFPA 2).

Conclusions. The results of this analysis can be contributed to regulatory documents to be developed in the area of fire safety of infrastructure facilities for hydrogen-powered vehicles.

Keywords: refueling stations; garages; gaseous hydrogen; liquid hydrogen; fire safety features; hazardous fire factors

For citation: Gordienko D.M., Shebeko Yu.N. The fire safety of infrastructure facilities for hydrogen-powered vehicles. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):41-51. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.41-51 (rus).

✉ Yury Nikolaevich Shebeko, e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Введение

В настоящее время в мире наблюдается повышенное внимание к развитию водородной энергетики. Многие страны мира приняли специализированные государственные стратегии и дорожные карты в указанной области. В Российской Федерации распоряжением Правительства от 5 августа 2021 г. № 2162-р утверждена концепция развития водородной энергетики. Одной из важнейших задач, предусмотренных данной концепцией, является создание нормативной правовой базы в области безопасности объектов водородной энергетики, в частности для объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе. Основными объектами указанной инфраструктуры являются заправочные станции и объекты хранения автомобилей на водородном топливе. В то же время имеющиеся в Российской Федерации нормативные правовые и нормативные документы в области пожарной безопасности не содержат всех необходимых требований для упомянутых выше объектов, что показал анализ, проведенный в работе [1]. В связи с этим представляется необходимым изучение передового международного опыта в указанной области. В работах [2, 3] проанализированы публикации в области оценки безопасности автомобилей и автозаправочных станций с использованием водородного топлива. Настоящая работа посвящена рассмотрению вопросов пожарной безопасности таких объектов инфраструктуры водородного транспорта, как автозаправочные станции (в развитие работы [2]), и объектов хранения водородных автомобилей. При этом в силу того, что в российской научной литературе этим вопросам уделяется недостаточно внимания,

проводится анализ работ, опубликованных в ведущих международных научных журналах.

Общая характеристика пожарной опасности объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе

В работе [4] дан обзор публикаций, посвященных безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики. Отмечены основные различия в специфике пожарной опасности водорода H_2 и природного газа (далее по тексту — CH_4 — основной компонент природного газа), обусловленные значительно более высокой пожаровзрывоопасностью водорода:

- взрывы смесей H_2 -воздух несравненно опаснее по сравнению с взрывами смесей CH_4 -воздух;
- взрывозащищенность электрооборудования для водорода обеспечить гораздо сложнее по сравнению с природным газом;
- смеси H_2 -воздух зафлегматизировать значительно сложнее, чем смеси CH_4 -воздух;
- для смесей H_2 -воздух достаточно вероятен при определенных условиях переход горения в детонацию, чего нельзя сказать про смеси CH_4 -воздух.

При проливах сжиженного водорода (LH_2) образующиеся холодные смеси тяжелее окружающего воздуха, т.е. паровое облако ведет себя как облако тяжелого газа, образуя взрывоопасные смеси у поверхности земли.

Проанализирован подход стандарта NFPA 2: 2020 «Hydrogen Technologies Code» к определению безопасных расстояний. Согласно этому стандарту, безопасные расстояния определяются по концентра-

ции, равной нижнему концентрационному пределу распространения пламени (НКПР), на основе максимальной проектной аварии для утечки из отверстия с площадью, составляющей 1 % от площади поперечного сечения трубопровода высокого давления. Возможен другой подход к определению безопасных расстояний — с помощью контуров потенциального риска 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} год⁻¹ (в зависимости от видов соседних объектов, до которых определяются расстояния).

Водородные АЗС обычно имеют резервуары хранения сжатого GH_2 (давление 20–35 МПа) или жидкого LN_2 водорода, компрессоры, топливораздаточные колонки на давление 35 или 70 МПа, заправочные рукава, сбросные трубы. Возможен вариант получения H_2 непосредственно на станции методом электролиза или химическим путем. Кратко рассмотрена авария на водородной АЗС в Норвегии, имевшая место 10.06.2019 г. Авария началась с утечки из фланцевого соединения из резервуара объемом 50 л с давлением 95 МПа, содержавшего 2,5 кг H_2 . Расход газа при утечке, которая не была замечена в течение двух часов, составлял, согласно проведенным оценкам, 0,04 г/с. Затем масштаб утечки значительно увеличился, и за 2–3 с было выброшено 2 кг H_2 . Произошел сильный взрыв, за которым последовало 2–3 более слабых. Была разрушена стена, окружавшая АЗС, выбиты стекла в домах на расстоянии 65 м, сработали подушки безопасности в автомобилях на расстоянии 50 м.

Водород в качестве моторного топлива находит применение не только для автомобильного транспорта. В Норвегии планируют перевести на водородное топливо пассажирские паромы, широко используемые в этой стране. Рассматривается также возможность создания тепловозов, использующих в качестве топлива жидкий водород (в Германии с 2018 г. ходят поезда с тепловозами на водородном топливе). Работы в этом направлении проводятся в России, Нидерландах и Великобритании.

Вопросы применения LN_2 в качестве моторного топлива рассмотрены в работах [5, 6]. В работе [5] кратко описаны эксперименты по изучению проливов жидкого водорода. В 1980 г. под эгидой NASA проведены эксперименты по проливу $5,7 \text{ м}^3$ (около 400 кг) LN_2 из резервуара под давлением 0,69 МПа. Истечение продукта происходило в течение 24–40 с с расходом 0,8–15 кг/с. Концентрация GH_2 в облаке превышала 8 % (об.). Облако паров распространялось вблизи поверхности земли на расстояние 50–100 м, после чего приобретало положительную плавучесть и рассеивалось в атмосфере. Чем выше была относительная влажность воздуха, тем раньше облако приобретало положительную

плавучесть. Описаны эксперименты, выполненные в Великобритании лабораторией здоровья и безопасности (Health and Safety Laboratory) в 2010–2011 гг. с истечением жидкого водорода с расходом около 70 г/с. При скорости ветра 2,7 м/с на расстоянии 7,5 м у поверхности земли регистрировали концентрацию водорода 13–14 % (об.). С помощью программы FLACS проведено сравнение размеров опасных зон при истечении жидкого водорода и жидкого метана. Найдено, что горизонтальные размеры опасных зон по уровню НКПР при истечении LN_2 в разы превышают аналогичные размеры для жидкого метана. Сделан вывод, что паровое облако, образующееся при испарении жидкого водорода, ведет себя как облако тяжелого газа.

В работе [6] описаны эксперименты по изучению струевых истечений жидкого водорода в камере с размерами $8 \times 5,5 \times 3,4 \text{ м}$ с расходом 10 г/с через сопло диаметром 0,5 и 1,0 мм под давлением 0,7–3,0 МПа (температура жидкой фазы 34–44 К). Исследованы случаи с зажиганием и без зажигания струи. Получены зависимости размеров зон по уровню НКПР и интенсивности теплового излучения факела от расхода LN_2 .

В работах [7, 8] изучена специфика пожарной опасности проливов жидкого водорода. Найдено, что при квазимгновенном проливе небольших количеств (несколько десятков литров) LN_2 на неограниченную поверхность за счет быстрого испарения образуются паровые облака с формой, близкой к сферической. Пролив больших количеств жидкого водорода приводит к образованию паровых облаков полусферической формы, обладающих вначале отрицательной плавучестью вследствие низкой температуры газа, с последующей трансформацией в грибовидные облака. Получены данные по массовой скорости испарения LN_2 при проливах на различные поверхности. Предложены формулы для оценки объема взрывоопасной смеси, скорости подъема парового облака, концентрации водорода на его видимой границе. Изучены экспериментально параметры дефлаграции и детонации водородовоздушных смесей. Получены полуэмпирические формулы для прогнозирования параметров этих процессов.

В работе [9] выполнен обзор публикаций в области водородной безопасности объектов различного назначения, включая исследования имевших место аварий, распространения аварийных утечек водорода и взрывов водородовоздушных смесей. Проанализировано 120 аварий с участием водорода с 1999 по 2019 годы. Найдено, что 38,3 % аварий произошло в лабораториях, 10,6 % на водородных АЗС и 9,0 % на других объектах. Для лабораторий основная причина аварий — ошибка человека и отказ оборудования. Для прочих объектов основны-

ми причинами являются разрушение трубопроводов, запорной арматуры и нарушение герметичности фланцевых соединений (35,78 %). На ошибки при эксплуатации и проектировании приходится 14,22 и 12,07 % всех аварий соответственно. По представленным данным 41,83 % аварий привели только к материальным потерям, 10,27 % связаны с поражением людей, 5,32 % — к человеческим жертвам. Для сравнения указано, что аварии на объектах с наличием сжиженного природного газа, связанные с гибелью людей, составляют только 2,65 % всех аварий.

Обзор исследований в области хранения, транспортировки и применения водорода представлен в работе [10]. Указаны следующие основные методы производства водорода, используемые в промышленности:

- электролиз воды — 3,9 %;
- газификация угля — 16 %;
- реформинг нефти — 30 %;
- реформинг природного газа — 50 %;
- прочие способы — 0,1 %.

Проанализированы способы хранения водорода. Для хранения сжатого газа основным недостатком является низкая массовая плотность хранящегося продукта. Для хранения сжиженного водорода основным недостатком является низкая температура хранения (ниже 20 К), при этом за счет испарения из-за теплопритока от окружающей среды ежедневные потери составляют 0,2 % для крупномасштабных хранилищ и 2–3 % для небольших хранилищ. Одним из возможных методов хранения и транспортировки водорода является использование гидридов металлов, однако этот способ может быть эффективным только для небольших хранилищ.

Водородные заправочные станции

Ряд вопросов пожарной безопасности водородных автозаправочных станций был проанализирован в работе [2]. В данном разделе рассмотрены более поздние опубликованные работы в этой области.

В работе [11] выполнен сравнительный анализ нормативных требований к водородным автозаправочным станциям таких стран, как США (штат Калифорния), Великобритания, Италия, Германия, Канада, Швеция, Норвегия, Дания и Испания. Дана характеристика европейской директивы для объектов инфраструктуры с использованием альтернативных видов топлива, в том числе и водорода (Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure). Рассмотрены требуемые барьеры безопасности для различных частей АЗС. Дается обзор различных подходов к определению безопасных расстояний для размещения заправочных станций.

В работе [12] проведен анализ риска для водородной АЗС с хранением топлива в компримированном виде. Рассмотрены три основных сценария аварии: утечка водорода при разгерметизации заправочного рукава; утечка водорода из фланцевых соединений хранилища компримированного газа; утечка водорода из компрессора. Деревья событий рассматривались с учетом барьеров безопасности. Оценка поражения ударной волной взрыва и тепловым излучением пожара проводилась с помощью пробит-функций. Найдено, что величина потенциального риска от аварий с утечкой водорода (кроме утечек из компрессора) в радиусе более 6 м от ТРК не превышает 10^{-6} год⁻¹. Для аварий с утечкой из компрессора потенциальный риск на расстоянии 10 м превышает 10^{-4} год⁻¹. При использовании стены высотой 3 м, отделяющей компрессор от окружающих объектов, потенциальный риск для персонала и посетителей станции снижается до приемлемого уровня.

В работе [13] проведено экспериментальное исследование влияния загроможденности территории АЗС технологическим оборудованием и наличия защитных стен на опасность взрыва водородовоздушных смесей, образующихся при аварийных утечках водорода. Моделировалось хранилище компримированного водорода в виде двух рядов резервуаров (по 5 в каждом ряду, один ряд над другим). Длина каждого резервуара 2,64 м, диаметр 0,8 м. Хранилище ограничивалось одной или двумя стенами длиной 5,4 и высотой 4,8 м, размещенными на расстоянии 1 м от резервуаров. Модель хранилища ограничивалась прозрачной пластиковой пленкой толщиной 23 мкм, размеры ограждения $5,4 \times 6 \times 2,5$ м (объем 67,59 м³). В объеме ограждения создавали исследуемые водородовоздушные смеси. Выполнено два вида экспериментов:

1. С зажиганием предварительно перемешанной смеси H₂-воздух для изучения влияния положения источника зажигания, состава смеси и степени загроможденности пространства;

2. С зажиганием струи водорода, истекающего под давлением 40 МПа вблизи резервуаров хранения из отверстий диаметром 8 и 5,5 мм для изучения влияния положения струи, диаметра отверстия истечения и времени задержки зажигания.

В экспериментах по п. 1 найдено, что скорость пламени достигала значения 120 м/с. В зависимости от места зажигания максимальное значение давления взрыва $\Delta P_{\max}$ достигало 62,8 кПа при наличии одной стены и 111,1 кПа при наличии двух стен. На расстоянии 24 м от модели хранилища величина $\Delta P_{\max}$ снижалась до 20 кПа.

В экспериментах по п. 2 происходило истечение H₂ в загроможденное пространство и рядом

с ним с задержкой зажигания от 0,1 до 5 с. Найдено, что при снижении давления в резервуаре, из которого происходило истечение, с 40 до 10 МПа величина $\Delta P_{\max}$ быстро падает из-за уменьшения степени турбулентности водородовоздушной смеси. Вблизи загроможденного пространства давление взрыва составило до 1451 кПа, на расстоянии 19,5 м величина $\Delta P_{\max}$ падала до значения не более 13,2 кПа.

Сделан вывод, что в ближней зоне опаснее авария со струевым истечением, а в дальней — авария со сгоранием предварительно перемешанной смеси.

Кратко проанализированы выполненные в работе [14] аналогичные эксперименты, в которых изучали горение водородовоздушных смесей в помещении размерами $6 \times 5 \times 4$ м в присутствии загромождения в виде 35 баллонов емкостью 250 л каждый. Стены помещения имели высоту 3 м с дальнейшим промежутком до крыши шириной 1 м, заполненным металлической сеткой с проницаемостью 50 %. Гомогенную смесь H_2 (26 % (об.)) — воздух объемом 120 м^3 зажигали в геометрическом центре помещения. Максимальное давление взрыва в помещении составляло до 100 кПа. Также исследовали зажигание струи водорода из модели ТРК с отверстием диаметром 8 мм. Максимальное значение давления $\Delta P_{\max}$ наблюдали при времени задержки зажигания t , равном 1,2 с. Найдено, что $\lg(P_{\max})$ линейно уменьшается с ростом $\lg(t)$ задержки зажигания более 1,2 с.

В работе [15] рассмотрена гибридная водородная АЗС, в которой водород получают непосредственно на станции за счет электролиза воды с использованием электроэнергии от возобновляемых источников (солнечная и/или ветровая энергия). АЗС предназначена для заправки топливных резервуаров автомобилей при давлениях 35 и 70 МПа. Станция включает в себя ветровой и/или солнечный электрогенератор, электролизную систему производства водорода, автомобиль для транспортировки компримированного GH_2 , системы компримирования и хранения газа, ТРК. Наиболее опасным компонентом станции является система компримирования газа до давлений 20, 43,8 и 87,5 МПа с дальнейшей закачкой в резервуары хранения. Найдено, что частоты опасных событий с выходом водорода в атмосферу не превышают 10^{-5} год^{-1} . Согласно европейской директиве¹, если риск смертельного поражения людей менее $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$, то нормирование расстояний внутри водородной станции не требуется. Это условие не выполняется только для компрессоров, вокруг которых предлагается создание защитных стен. Минимальное расстояние, при ко-

тором не наблюдается смертельного поражения от факела, составляет 20–23 м. Для предотвращения теплового воздействия факела на технологическое оборудование предлагается использовать его водяное орошение с интенсивностью $0,17 \text{ л/(м}^2 \text{ с)}$. Минимальное расстояние от компрессоров до других объектов станции должно составлять 6 м, а до объектов, не относящихся к АЗС, — 50 м.

Одной из основных опасностей водородных заправочных станций является образование факелов с их воздействием на соседние объекты как внутри, так и вне станции. Метод оценки геометрических характеристик водородных факелов в зависимости от давления и диаметра истечения представлен в работах [16, 17]. В работе [16] теоретически и экспериментально изучены пределы устойчивого горения, размеры и конфигурации турбулентных факелов различных газов, в том числе и водорода. Показано, что в зависимости от скорости и диаметра отверстия истечения могут иметь место как присопловые (стабилизированные на срезе горелки), так и оторванные (стабилизированные на некотором расстоянии от среза горелки) от факела. Получены полуэмпирические соотношения, описывающие условия стабилизации и геометрические параметры факелов.

В работе [17] описан метод определения безопасных расстояний для реагирующей (факел) и нереагирующей (струйный выброс) струй водорода. Для струйного выброса получена формула, позволяющая рассчитать концентрацию водорода по оси выброса в зависимости от диаметра сопла и расстояния от места выброса. Формула верифицирована на основе результатов 53 экспериментов, опубликованных в литературе, для выбросов водорода при давлениях до 40 МПа, диаметрах сопла d_{noz} от 0,25 до 25 мм и расстояниях x от места выброса в диапазоне x/d_{noz} от 4 до 28 580. На основе обработки результатов 123 экспериментов получены полуэмпирическая формула для определения длины водородного факела в зависимости от массового расхода газа и диаметра сопла. Показано, что регламентированный стандартом NFPA 55:2010 «Compressed gases and cryogenic fluids code» метод оценки длины факела в случае водорода существенно завышает эту длину по сравнению с экспериментом. Метод расчета безопасных расстояний при струевом истечении газообразного водорода (с горением и без горения) представлен также в работе [18] для диаметров истечения от 0,25 до 6,35 мм и давлении истечения до 103,5 МПа. Получены формулы, позволяющие оценить расстояния, на которых реализуется та или иная плотность теплового потока, с относительной погрешностью до 18 %. Найдено, что на расстоянии до 11 м от факела плотность тепло-

¹ IGC Doc 75/07/E. Determination of safety distances. European Industrial Gases Association AISBL. 2007.

вого потока может составлять до 25 кВт/м². Концентрация H₂ более 8 % (об.) по оси струи водорода может наблюдаться на расстояниях до 26 м.

Стоянки автомобилей на водородном топливе

Повышенная пожаровзрывоопасность водорода по сравнению с углеводородными топливами накладывает отпечаток не только на требования пожарной безопасности к водородным АЗС, но и к стоянкам автомобилей на водородном топливе. Стандарт NFPA 2: 2020 «Hydrogen Technologies Code» (глава 17) регламентирует для стоянок автомобилей на водородном топливе те же требования, что и для соответствующих объектов с автомобилями на газовом углеводородном топливе. Однако краткий анализ ряда оригинальных научных публикаций по данному вопросу, который представлен ниже, говорит о возможной неприемлемости такого подхода.

В работе [19] рассмотрены вопросы безопасности индивидуальных гаражей для автомобилей на водородном топливе. Выполнены эксперименты по моделированию утечек водорода различного масштаба. Модель гаража имела размеры 6,1 × 6,1 × 3,05 м с наличием трех вентиляционных отверстий размерами 0,2 × 0,2 и 0,3 × 0,3 м. Массовая скорость истечения водорода составляла 99,4 л/мин. Измеряли концентрацию H₂ в различных точках помещения. В экспериментах с зажиганием водорода геометрические характеристики пламени определяли с помощью термопар и видеокамеры. Было выполнено 16 опытов без присутствия автомобилей в модели гаража и 6 опытов с наличием автомобилей, у которых окошки и дверцы были закрыты, а водород подавался под днища автомобилей. В случае отсутствия автомобилей водородовоздушные смеси зажигали у потолка при достижении концентрацией H₂ величин 8, 12, 16 и 29 % (об.).

В случае отсутствия автомобилей заметный градиент концентраций водорода наблюдали в нижней части помещения, в верхней же его части указанный градиент был мал. Данный результат качественно совпадает с полученным ранее в работе [20]. При наличии автомобилей градиент концентраций водорода по высоте модели гаража был мал, однако концентрация H₂ в моторном отсеке быстро увеличивалась до 20 % (об.). Видимая скорость пламени при зажигании водородовоздушных смесей составляла от 0,6 до 35 м/с в зависимости от содержания в них водорода. При средней концентрации водорода 15,2 % (об.) одна из стен, выполненная из гипсокартона, была отнесена взрывом на несколько метров. При концентрации водорода 29,3 % (об.) упомянутая стена, а также крыша были снесены, а в кирпичных стенах образовались трещины. Сделан вывод, что

залповый выброс H₂ из топливной системы автомобиля хотя и маловероятен, но представляет высокую опасность с точки зрения последствий, в связи с чем следует обратить внимание на предотвращение и своевременное обнаружение таких выбросов.

В работе [21] проведено численное моделирование аварии с истечением струи водорода из топливного бака автомобиля в объем гаража как с зажиганием, так и без зажигания струи с оценкой развиваемого при этом давления. Водород истекал под давлением 70 МПа из отверстия диаметром 3,34 мм, что соответствует срабатыванию теплового сбросного клапана. Гараж имел размеры 4,5 × 2,6 × 2,6 м с наличием отверстия в ограждающих конструкциях размерами 0,35 × 0,55 м, моделирующего окно. При истечении водорода без зажигания максимальное избыточное давление $\Delta P_{\max}$ составило 0,55 кПа, что является безопасным для строительных конструкций. При зажигании струи через 1 с после начала истечения избыточное давление в помещении достигало 55 кПа, и при этом давлении возможны серьезные разрушения строительных конструкций. Столь значительное давление при наличии реагирующей струи, существенно превышающее давление в случае зажигания струи газового углеводородного топлива, обусловлено значительно более высокой нормальной скоростью горения водорода по сравнению с углеводородами. Это показано также в работе [22], где были выполнены эксперименты по горению струй водорода и углеводородов, истекающих в объем помещения. Если гараж имеет достаточно высокую степень герметичности, то при истечении водорода из топливного бака при давлении до 70 МПа даже без зажигания давление в помещении может составлять 10–20 кПа [23].

Для правильной оценки пожарной безопасности объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе представляет интерес проанализировать опасность указанных автомобилей. С этой целью в работе [24] проведена сравнительная оценка пожарной опасности автомобилей на сжатом водороде и компримированном природном газе (КПГ). Для анализа выбран сценарий с образованием струевого пламени при разгерметизации топливного бака. Проведено моделирование с использованием метода CFD факела газа, истекающего при срабатывании теплового сбросного клапана, из отверстия диаметром 4,2 мм в резервуаре с водородом (содержит 4 кг газа при давлении 35 МПа) и в резервуаре с КПГ (содержит 20 кг газа при давлении 25 МПа). Найдено, что при указанных выше параметрах, типичных для автомобильных топливных резервуаров, длительность истечения КПГ в 2 раза больше, чем для водорода. Наибольший горизонталь-

ный размер зоны воздействия факела наблюдается через несколько секунд после начала истечения. Безопасные расстояния для пожарных в защитной одежде составляют 6 и 14 м для автомобилей на H_2 и КПП, а для прочих людей 12 и 29 м (с учетом коэффициента безопасности) соответственно. Из приведенных результатов следует, что тепловое излучение водородного факела более безопасно, чем для факела природного газа. Это обусловлено более низкой излучательной способностью пламени водорода в силу отсутствия в нем сажистых частиц.

В работе [25] выполнена расчетная оценка последствий аварийного выброса водорода в помещении большого объема (более 15 000 м³), моделирующем крупную стоянку автомобилей. Проведено параметрическое исследование влияния скорости истечения H_2 и размеров помещения на распределение концентраций водорода в нем. Полученные данные по распределению концентраций использованы для прогнозирования взрывных нагрузок при дефлаграции водородовоздушных смесей.

В работе [26] проведено экспериментальное исследование аварийных выбросов водорода в помещение, моделирующее гараж, при отсутствии источника зажигания. Изучали рост давления в помещении при возникновении указанных выбросов, которые могут происходить на практике при срабатывании предохранительных клапанов топливных баков. Эксперименты проведены в камере с размерами 2980 × 2000 × 2500 мм (объем 14,9 м³), имеющей вентиляционное отверстие. Измеряли концентрации водорода с помощью двух датчиков (один в средней по высоте части, второй у потолка). Площадь вентиляционного отверстия варьировали в диапазоне от 0,0012 до 0,0020 м². Массовая скорость истечения водорода составляла от 1,9 до 10,10 г/с при времени истечения от 90 до 200 с. Указанные параметры истечения отвечают срабатыванию предохранительных клапанов топливных баков с диаметрами 4,2 и 5,08 мм. Измеренные давления находились в диапазоне от 0,42 до 8,05 кПа, что, как правило, безопасно для основных строительных конструкций.

Возникает вопрос, чем обусловлены значительные величины давления, развиваемого в помещении гаража, при наличии реагирующей (зажигание струи с образованием факела) и не реагирующей (отсутствие зажигания) струи при аварийном истечении водорода из топливных баков транспортных средств. В случае образования факела повышение давления в помещении вызвано главным образом тепловыделением при сгорании водорода. Согласно [27, 28], скорость тепловыделения W во фронте газовой смеси пла-

мени пропорциональна S^2 , где S — нормальная скорость горения газа. Поскольку нормальная скорость горения водорода существенно превышает соответствующую величину для углеводородных газов [29], скорость тепловыделения в водородном факеле и развиваемое давление при его образовании в помещении значительно выше, чем в случае факелов углеводородных газов. Заметные давления при реагирующей струе обусловлены высокими значениями давления в водородных топливных баках (до 70 МПа) и диаметрах сбросного отверстия сбросных клапанов (до 5 мм).

Выводы

В настоящей работе проведен обзор публикаций, посвященных вопросам пожарной безопасности некоторых объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе (автозаправочные станции и стоянки автомобилей). Дана общая характеристика специфики пожарной опасности таких объектов. Рассмотрены автозаправочные станции с использованием как газообразного, так и жидкого водорода. Показано, что для водородных АЗС наибольшую опасность представляет компрессорное оборудование, для которого значение потенциального риска на территории станции и вблизи превышает 10^{-4} год⁻¹. Отмечено, что минимальное расстояние от указанного оборудования до окружающих объектов, не относящихся к станции, должно составлять 50 м.

Проанализирована специфика пожарной опасности стоянок для водородных автомобилей. Найдено, что при возникновении факельного горения при истечении водорода из сбросных клапанов топливных баков давление в гараже небольшого объема (индивидуальные гаражи) может достигать значения 55 кПа. Для струи водорода без образования факела указанное давление может достигать значения 10 кПа. Столь значительные давления при образовании факела вызваны высокой нормальной скоростью горения водорода, обуславливающей скорость тепловыделения во фронте пламени, существенно превышающую соответствующую величину для факелов углеводородных газов. Вследствие этого распространение требований, предъявляемых к помещениям для хранения автомобилей на углеводородном топливе, к гаражам для водородных автомобилей (как это регламентировано нормативным документом NFPA 2) может быть ошибочным. Зарегистрированное в ряде работ достаточно большое значение давления в помещении при истечении в него реагирующей струи H_2 (отсутствие зажигания) обусловлено высокой объемной скоростью истечения водорода в силу значительных величин давления хранения газа и диаметра отверстия сбросного клапана.

Полученные результаты анализа могут быть использованы при разработке отечественных нормативных документов для водородных АЗС и стоянок автомобилей на водородном топливе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шебеко Ю.Н. Нормативные документы, регламентирующие вопросы пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // Пожарная безопасность. 2020. № 4. С. 36–42. DOI: 10.37657/vniipr.pb.2020.101.4.003
2. Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность водородных автозаправочных станций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 4. С. 42–50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50
3. Поваляев А.Е., Колбасов А.Ф., Козлов В.Н. Безопасность водородного транспорта // Транспорт на альтернативном топливе. Спецвыпуск. 2021. С. 25–30.
4. Hansen O.R. Hydrogen infrastructure — Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions // Process Safety and Environment Protection. 2020. Vol. 143. Pp. 164–176. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.028
5. Hansen O.R. Liquid hydrogen releases show dense gas behavior // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. Pp. 1343–1358. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.060
6. Fridrich A., Breitung W., Stern G., Vesper A., Kuznetsov M. Ignition and heat radiation of cryogenic hydrogen jets // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. Pp. 17589–17598. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.070
7. Макеев В.И. Безопасность объектов с использованием криогенных продуктов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1992. Т. 1. № 3. С. 34–45.
8. Болодьян И.А., Кестенбойм Х.С., Махвиладзе Г.М., Макеев В.И., Федотов А.П., Чугуев А.П. Взрывопожароопасность низкотемпературных облаков водорода в атмосфере // Горение гетерогенных и газовых систем : мат. 9-го Всесоюз. симп. по горению и взрыву. Черно-голова : Институт химической физики АН СССР, 1989. С. 15–17.
9. Yang F., Wang T., Deng X., Dang J., Huang Z., Hu S. *et al.* Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46. Pp. 31467–31488. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.005
10. Abohamzeh E., Salehi F., Sheikholeslami M., Abbassi R. Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 72. Pp. 104569. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104569
11. Pique S., Wienberger B., De-Dianous V., Debray B. Comparative study of regulations, codes and standards and practices on hydrogen fuelling stations // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. Issue 11. Pp. 7429–7439. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.158
12. Tsunemi K., Kihara T., Kato E., Kawamoto A., Saburi T. Quantitative risk assessment of the interior of a hydrogen refueling station considering safety barrier systems // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. Pp. 23522–23531. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.027
13. Shirvill E.C., Roberts T.A., Royle M., Willoughby D.B., Sathiah P. Effects of congestion and confining walls on turbulent deflagrations in a hydrogen storage facility — Part 1: Experimental study // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43. Pp. 7618–7642. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.135
14. Tanaka T., Azuma T., Evans J.A., Cronin P.M., Jonson D.M., Cleaver R.P. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. Vol. 32. Pp. 2162–2170. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.019
15. Pan X., Li Z., Zhang C., Lv H., Liu S., Ma J. Safety study of wind-solar hybrid renewable hydrogen refueling station in China // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. Pp. 13315–13321.
16. Карпов В.Л. Пожаробезопасность регламентных и аварийных выбросов горючих газов. Часть 1. Предельные условия устойчивого горения и тушения диффузионных факелов в неподвижной атмосфере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1998. Т. 7. № 3. С. 36–43.
17. Saffers J.-B., Molkov V.V. Towards hydrogen safety engineering for reacting and non-reacting hydrogen releases // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013. Vol. 26. Pp. 344–350. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.05.002

18. *La Chance J., Houf W., Middleton B., Fluer L.* Analysis support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards. SAND2009-0874. Albuquerque : Sandia National Laboratory, 2009. 121 p.
19. *Pitts W.M., Yang J.C., Blais M., Joyce A.* Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. Pp. 17457–17469. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2012.03.074
20. *Шебеко Ю.Н., Келлер В.Д., Еременко О.Я., Смолин И.М.* Закономерности образования и горения локальных водородовоздушных смесей в большом объеме // *Химическая промышленность*. 1988. № 12. С. 728–731.
21. *Brennan S., Hussein H.G., Makarov D., Shentsov V., Molkov V.V.* Pressure effects of an ignited release from onboard storage in a garage with a single vent // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Pp. 8927–8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.130
22. *Makarov D., Shentsov V., Kuznetsov M., Molkov V.V.* Pressure peaking phenomenon: model validation against unignited release and jet fire experiments // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. Pp. 9454–9469. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.162
23. *Brennan S., Molkov V.* Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. Pp. 8159–8166. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2012.08.036
24. *Zhiyong Li, Yiyang Luo.* Comparison of hazard distances and accident duration between hydrogen vehicles and CNG vehicles // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Pp. 8954–8959.
25. *Bauwens C.R., Dorofeev S.B.* CFD modeling and consequence analysis of an accidental hydrogen release in a large scale facility // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. Pp. 20447–20454.
26. *Lack A.W., Gaathaug A.V., Vaagsaether K.* Pressure peaking phenomena: Unignited hydrogen release in confined spaces — Large scale experiments // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Pp. 32702–32712.
27. *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М.* Математическая теория горения и взрыва. М. : Наука, 1980. 478 с.
28. *Зельдович Я.Б., Воеводский В.В.* Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. Алма-Ата : Казахский государственный университет. 2004. 210 с.
29. *Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник / под ред. А.Н. Баратова и А.Я. Корольченко. Т. 1, 2. М. : Химия, 1990.*

REFERENCES

1. *Shebeko Yu.N.* Normative documents on fire safety of infrastructure objects of hydrogen energetic. *Pozarnaya Bezopasnost/Fire Safety*. 2020; 4:36-42. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.003 (rus).
2. *Shebeko Yu.N.* Fire safety of hydrogen filling stations. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):42-50. (rus).
3. *Povalyaev A.E., Kolbasov A.F., Kozlov V.N.* Safety of transport on hydrogen fuel. *Alternative Fuel Transport. Special issue*. 2021; 25-30.(rus).
4. *Hansen O.R.* Hydrogen infrastructure — Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions. *Process Safety and Environment Protection*. 2020; 143:164-176. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.028
5. *Hansen O.R.* Liquid hydrogen releases show dense gas behavior. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:1343-1358. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.060
6. *Fridrich A., Breitung W., Stern G., Veser A., Kuznetsov M.* Ignition and heat radiation of cryogenic hydrogen jets. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012; 37:17589-17598. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.070
7. *Makeev V.I.* Safety of objects with an application of liquid cryogenic products. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1992; 1(3):34-45. (rus).
8. *Bolodian I.A., Kestenboym H.S., Makhviladze G.M., Makeev V.I., Fedotov A.P., Chuguev A.P.* Fire and explosion hazard of low temperature clouds of hydrogen in atmosphere. *Heterogeneous and Gas Systems Combustion : Proceedings of the 9th All-Union Symposium on Combustion and Explosion*. Chernogolovka, Institute of Chemical Physics, 1989; 15-17. (rus).

9. Yang F., Wang T., Deng X., Dang J., Huang Z., Hu S. et al. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46:31467-31488. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.005
10. Abohamzeh E., Salehi F., Sheikholeslami M., Abbassi R. Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 72:104569. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104569
11. Pique S., Wienberger B., De-Dianous V., Debray B. Comparative study of regulations, codes and standards and practices on hydrogen fuelling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42(11):7429-7439. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.158
12. Tsunemi K., Kihara T., Kato E., Kawamoto A., Saburi T. Quantitative risk assessment of the interior of a hydrogen refueling station considering safety barrier systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44:23522-23531. DOI:10.1016/j.ijhydene.2019.07.027
13. Shirvill E.C., Roberts T.A., Royle M., Willoughby D.B., Sathiah P. Effects of congestion and confining walls on turbulent deflagrations in a hydrogen storage facility — Part 1: Experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43:7618-7642. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.135
14. Tanaka T., Azuma T., Evans J.A., Cronin P.M., Jonson D.M., Cleaver R.P. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007; 32:2162-2170. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.019
15. Pan X., Li Z., Zhang C., Lv H., Liu S., Ma J. Safety study of wind-solar hybrid renewable hydrogen refueling station in China. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016; 41:13315-13321.
16. Karpov V.L. Fire safety of regular and accidental releases of flammable gases. Part 1. Limiting conditions of stable combustion and extinguishing of jet flames in a still air. *Pozharovzryvbezopasnost/ Fire and Explosion Safety*. 1998; 7(3):36-43. (rus).
17. Saffers J.-B., Molkov V.V. Towards hydrogen safety engineering for reacting and non-reacting hydrogen releases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013; 26:344-350. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.05.002
18. Chance J.La, Houf W., Middleton B., Fluer L. *Analysis support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards*. SAND2009-0874. Albuquerque, Sandia National Laboratory, 2009; 121.
19. Pitts W.M., Yang J.C., Blais M., Joyce A. Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012; 37:17457-17469. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2012.03.074
20. Shebeko Yu.N., Keller V.D., Eremenko O.Ya., Smolin I.M. Peculiarities of formation and combustion of local hydrogen/air mixtures in a large volume. *Khimicheskaya Promishlennost/Chemical Industry*. 1988; 12:728-731.(rus).
21. Brennan S., Hussein H.G., Makarov D., Shentsov V., Molkov V.V. Pressure effects of an ignited release from onboard storage in a garage with a single vent. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44:8927-8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.130
22. Makarov D., Shentsov V., Kuznetsov M., Molkov V.V. Pressure peaking phenomenon: model validation against unignited release and jet fire experiments. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43:9454-9469. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.162
23. Brennan S., Molkov V. Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013; 38:8159-8166. DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2012.08.036
24. Zhiyong Li, Yiyang Luo. Comparison of hazard distances and accident duration between hydrogen vehicles and CNG vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44:8954-8959.
25. Bauwens C.R., Dorofeev S.B. CFD modeling and consequence analysis of an accidental hydrogen release in a large scale facility. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014; 39:20447-20454.
26. Lack A.W., Gaathaug A.V., Vaagsaether K. Pressure peaking phenomena: Unignited hydrogen release in confined spaces — Large scale experiments. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:32702-32712.
27. Zeldovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Mathematical theory of combustion and explosion*. Moscow, Nauka Publ., 1980; 478. (rus).
28. Zeldovich Ya.B., Voevodskii V.V. *Thermal explosion and a flame propagation in gases*. Alma Ata, Kazakh State University, 2004; 210. (rus).
29. *Fire and explosion hazard of substances and materials and fire extinguishing agents : handbook*. A.N. Baratov and A.Ya. Korolchenko (Eds.). Vol. 1, 2. Moscow, Khimiya Publ., 1990. (rus).

*Поступила 18.01.2022, после доработки 14.02.2022;
принята к публикации 01.03.2022*

*Received January 18, 2022; Received in revised form February 14, 2022;
Accepted March 1, 2022*

Информация об авторах

ГОРДИЕНКО Денис Михайлович, д-р техн. наук, начальник института, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 301154; Scopus Author ID: 2073393280; Researcher ID: 301154; ORCID: 0000-0002-5849-6956; e-mail: d_m_gordienko@mail.ru

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Denis M. GORDIENKO, Dr. Sci. (Eng.), Head of Institute, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 301154; Scopus Author ID: 2073393280; Researcher ID: 301154; ORCID: 0000-0002-5849-6965; e-mail: d_m_gordienko@mail.ru

Yury N. SHEBEKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.