

УДК 614.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОТЕКАНИЯ ПОЖАРА НА ГИБРИДНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ЗАПРАВОЧНОЙ СТАНЦИИ

Королев Денис Сергеевич¹, Епифанов Евгений Николаевич², Кончаков Сергей Александрович³

¹ Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России, г. Воронеж, Российская Федерация

² Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, г. Воронеж, Российская Федерация

³ Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Вопросы обеспечения пожарной безопасности на объектах защиты тесно связаны с финансовыми вложениями. Поэтому неудивительно, что предлагаются различные варианты по уменьшению вторых, не снижая общий уровень безопасности. К одним из таких способов можно отнести комбинирование похожих технологических процессов, объединение помещений по классу функциональной пожарной опасности. Характерным мировым примером является строительство комбинированных (гибридных) автомобильных заправочных станций, позволяющее снизить капитальные и эксплуатационные расходы, сэкономить земельные ресурсы. В этом случае специалисты должны обеспечить комплексный подход для защиты населения и их имущества. Однако оба вида топлива (водород и бензин) представляют собой взрывоопасные вещества, способные привести к катастрофическим последствиям. Для предотвращения деструктивных ситуаций на подобных объектах следует проводить оценку пожарной опасности и устанавливать величину пожарного риска. В нашем исследовании оценку риска проводили при помощи специального программного обеспечения при различных сценариях. Наиболее опасным был признан случай, при котором происходит утечка водорода из диспенсера, что приводит к факельному возгоранию, а это в свою очередь разрушает топливораздаточную колонку с бензином, вызывая вторичную аварию. Данное исследование может стать основой как для определения безопасных противопожарных расстояний между технологическим оборудованием, так и оптимизации планировки объекта защиты.

Ключевые слова: гибридная автозаправочная станция, вероятность события, пожарная безопасность, риск, эмпирические зависимости

Для цитирования: Королев Д. С., Епифанов Е. Н., Кончаков С. А. Исследование процесса протекания пожара на гибридной автомобильной заправочной станции // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 75–90.

A STUDY OF THE FIRE BEHAVIOR AT A HYBRID VEHICLE FILLING STATION

Denis S. Korolev¹, Evgeny N. Epifanov², Sergey A. Konchakov³

¹ Voronezh institute of Advanced Training of Employees of the EMERCOM of Russia, Voronezh, Russian Federation

² Voronezh State University of Forestry and Technologies named G. F. Morozov, Voronezh, Russian Federation

³ SFA of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

Abstract. Fire safety issues at protected facilities are currently closely intertwined with financial investments. Therefore, it's not surprising that various options are being proposed to reduce the latter without compromising overall safety. Some of these methods include combining similar technological processes and grouping facilities according to functional fire hazard class. A typical global example is the construction of combined (hybrid) petrol stations, which reduce capital and operating costs and conserve land resources. In this case, specialists must ensure a comprehensive approach to protecting the population and their property. However, both fuels (hydrogen and gasoline) are explosive substances that can lead to catastrophic consequences. To prevent destructive situations at such facilities, it is necessary to conduct a fire hazard assessment and determine the fire risk. In our study, the risk assessment was conducted using specialized software across various scenarios. The most dangerous scenario was identified as a hydrogen leak from the dispenser, leading to a flare-up fire that, in turn, destroys the gasoline dispenser, causing a secondary accident. This study can serve as a basis for determining safe fire distances between process equipment and optimizing the layout of the protected facility.

Keywords: hybrid petrol station, probability of event, fire safety, risk, empirical dependencies

For citation: Korolev D. S., Epifanov E. N., Konchakov S. A. A study of the fire behavior at a hybrid vehicle filling station // *Technosphere safety*. 2026. No. 3 (52). P. 75–90.

Введение

В условиях стремительного изменения климата, отказа от традиционных видов топлива, нехватки энергии происходит постепенная переориентация всех отраслей промышленности на использование возобновляемых источников энергии и развитие зеленой энергетики. Большинство стран мира, включая и Российскую Федерацию, обозначили развитие водородной энергетики как национальную стратегию в достижении технологического преимущества и суверенитета [1–3].

На сегодняшний день производство удобрений, повышение качества бензина, улучшение свойств стали, производство маргарина и твердых кондитерских жиров методом

гидрогенизации растительных масел, охлаждение генераторов на электростанциях, проведение гидроочистки, гидрообессеривания, гидрокрекинга, регенерации катализаторов не обходится без применения водорода. Перспектива перехода на водородную энергетику с углеводородной и дальнейшее использование в качестве топлива для автомобилей увеличивают потребность в чистом источнике энергии на порядок [4]. Например, в КНР строительство комбинированных заправочных станций кратно возросло. С 2016 г. было построено свыше 270 гибридных (водородно-бензиновых) автомобильных станций, считающихся одним из оптимальных вариантов, обусловленных снижением затрат на строительство и обслуживание объектов защиты в пределах одного земельного участка.

Отметим, что водород представляет собой легкий взрывоопасный газ, обладающий широким диапазоном воспламенения и минимальной энергией зажигания в сравнении с традиционными источниками энергии (природным газом, бензином), и в совокупности с человеческим фактором, выходом из строя инфраструктуры (клапанов, фланцевых соединений и др.), способностью охрупчивать металл, слабой организацией системы безопасности повышает вероятность возникновения деструктивных ситуаций техногенного характера [5, 6]. Несоблюдение противопожарных расстояний повышает риск того, что при возгорании одного объекта огонь быстро перекинется на рядом стоящие здания, сооружения или строения — возникнет эффект домино.

Поэтому основной целью настоящей работы является всесторонний анализ и оценка пожарной опасности водородно-бензиновой инфраструктуры на примере многотопливной заправки.

Методы и результаты исследований

Многотопливные автомобильные заправочные станции (АЗС) характеризуются повышенной взрывопожароопасностью, особенно если она расположена в городской черте с высокой плотностью населения и интенсивным движением. Следовательно, установление причин образования горючей среды и источников зажигания является неотъемлемой задачей в обеспечении безопасности людей.

В качестве объекта исследования выбрана стандартная многотопливная заправочная станция (рис. 1), включающая несколько зон [7]:

- заправочное оборудование (компрессоры, резервуары для хранения топлива, система трубопроводов);
- зона заправки водородом (топливораздаточные колонки);
- зона заправки бензином (топливораздаточные колонки);
- торговая зона.

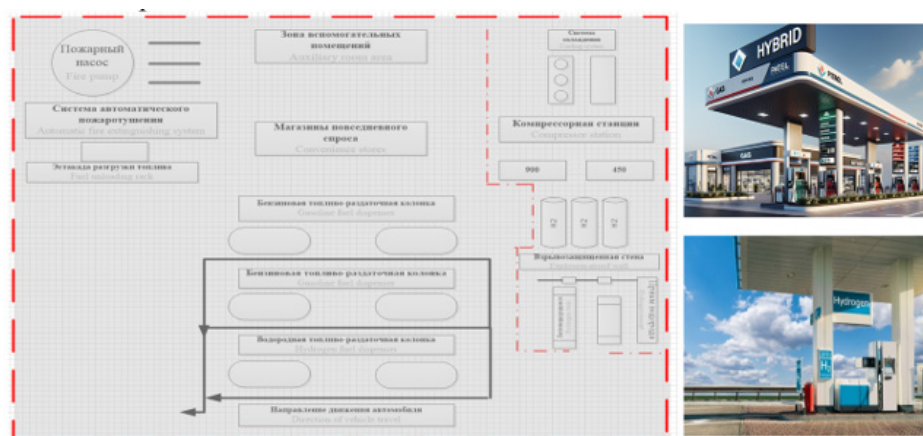


Рис. 1. Принципиальная схема комбинированной заправочной станции

Fig. 1. Schematic diagram of a combined filling station

Все зоны перегружены людьми и транспортными средствами, это увеличивает тяжесть потенциальных последствий. Водородное топливо, как и бензин, производится

за пределами гибридной заправочной станции и при помощи автомобильного транспорта с композитными баллонами под высоким давлением доставляется к потребителю.

Согласно статистическим данным, к обстоятельствам, способствующим возникновению пожаров и взрывов на подобных объектах, следует отнести (рис. 2):

- человеческий фактор: нарушение правил пожарной безопасности, диверсия третьих лиц, применение беспилотных воздушных судов, человеческая рассеянность (например, когда автовладелец забывают вытащить заправочный пистолет из бака автомобиля), искры системы выхлопа автомобиля;
- технологический и химический факторы: отказы технологического оборудования, использование оборудования несоответствующего уровня, класса и степени защиты, неисправность электрического оборудования, воздействие электростатического электричества, усталость металла, коррозия;
- механический фактор: проведение ремонтных и очистных работ, поврежде-

ние водородного дозатора, некачественная перепрессовка;

- факторы окружающей среды: воздействие атмосферного электричества.

В целях обеспечения пожарной безопасности на объекте защиты реализована система безопасности, которая должна сработать за доли секунды, минимизируя объемы выброса горючего газа:

- пожарная автоматика (система пожарной сигнализации, система пожаротушения, система комплексного управления);
- устройство защиты электрических цепей (исключение образования искр, перегрузки, больших переходных сопротивлений и т. д.);
- ручная система аварийного отключения;
- система зануления и заземления;
- предусмотрено обвалование.



Рис. 2. Наиболее вероятные места возникновения аварийных ситуаций

Fig. 2. Most likely locations for the occurrence of emergency situations

В основу методологии идентификации пожарного риска был заложен принцип комплексного анализа пожароопасных свойств используемых веществ, применяемого оборудования, позволяющего опре-

делить интенсивность излучения и потенциальный вред, оказываемый на человека (рис. 3) [8, 9].

Для определения инициирующих событий использовали основные руководящие

документы [9, 10], которые опираются на вероятности базовых событий, с учетом реализованной на объекте защиты системы пожарной безопасности, влияющей на их развитие. Водородная энергетика — достаточно молодое направление, следова-

тельно, специализированной базы данных по частотам отказов водородного оборудования пока не существует, поэтому частоты инициирующих событий получали расчетным способом, анализом литературы, экспертным опросом [9–13].



Рис. 3. Алгоритм идентификации пожарного риска для гибридной АЗС (ГС — горючая среда, ИЗ — источник зажигания)

Fig. 3. Fire risk identification algorithm for a hybrid petrol station (CS — combustible medium, IS — ignition source)

Для определения наиболее вероятного и неблагоприятного сценария возникновения деструктивного события подготовили графологическое дерево отказов на основе логического рассуждения и оценки опасности системы при эксплуатации водорода (рис. 4). В табл. 1 представлены основные показатели вероятности.

К сценариям с повышенной взрывопожароопасностью при утечке водорода следует отнести:

- истечение газа из отверстия (в случае быстрой утечки образуется турбулентная струя, быстро создающая взрывоопасную смесь, присутствует высокий риск мгновенного воспламенения от электростатики самой струи);

- импульс волны давления при разрыве резервуара с водородом;
- образование огненного шара;
- взрыв (мгновенное и отсроченное воспламенение утечки водорода высокого давления из заправочного шланга);
- импульс волны давления при сгорании газопаровоздушной смеси;
- тепловое излучение при факельном горении (опасная тепловая волна).

Для моделирования развития взрывоопасной ситуации, связанной с выходом водорода, использовали специальное программное обеспечение, реализующее вычислительную динамическую модель тепломассопереноса при горении. Программа особое внимание уделяет распространению

опасных факторов пожара и теплопередаче. Также были приняты следующие условия:

— основное вещество — водород (давление — 35 МПа, массовый расход — 0,6 кг/с);

— побочный продукт — бензин (плотность — 0,725 г/мл, объем бака автомобиля — 45 л);

— скорость ветра — 2 м/с;

— внутренний диаметр шланга — 6,35 мм.

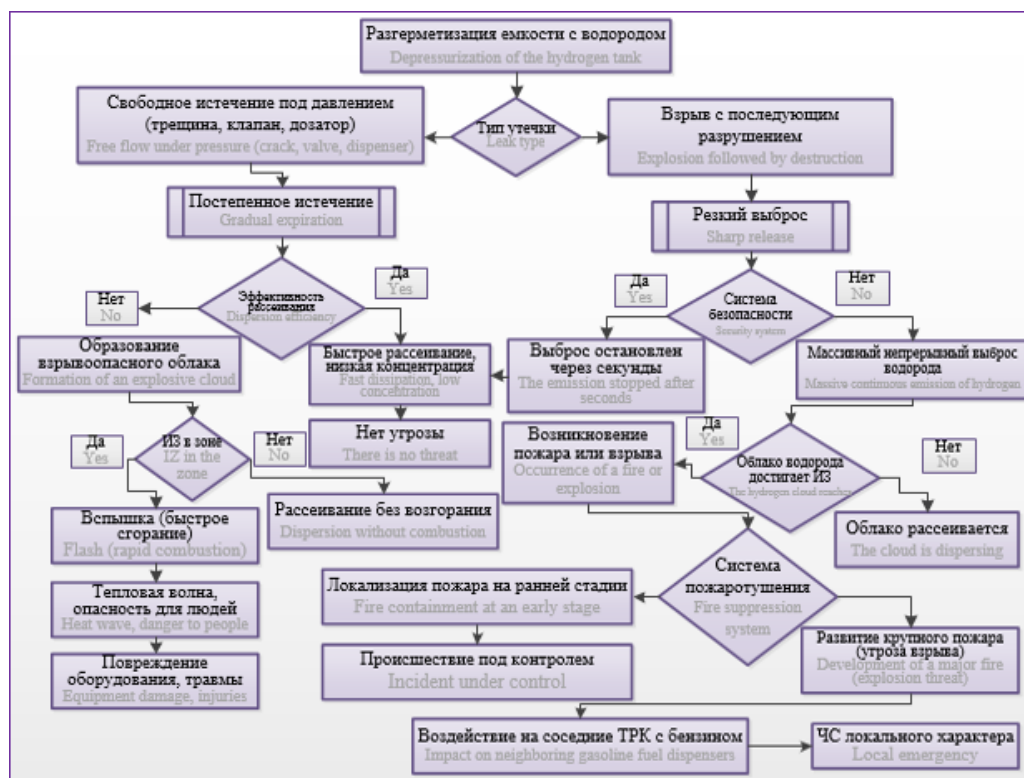


Рис. 4. Дерево отказов для сценария утечки водорода

Fig. 4. Derevo otkazov dlya stsenariya utechki vodoroda

Таблица 1
Вероятность возникновения оперативного события

Table 1
Probability of occurrence of an operational event

Обозначение Designation	Определение Definition	Значение Meaning
Разгерметизация резервуара для хранения сжиженных газов (водород) (полное разрушение) Leakage of a liquefied gas storage tank (hydrogen) (complete destruction)		
$Q_{1,1}$	Разрушение — мгновенное воспламенение — огненный шар Destruction — instantaneous ignition — fireball $Q_{1,1} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
$Q_{1,2}$	Разрушение — мгновенное воспламенение — взрыв Destruction — instantaneous ignition — explosion $Q_{1,2} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1 \cdot 0,2 = 1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$

Окончание таблицы 1

Обозначение Designation	Определение Definition	Значение Meaning
$Q_{1,3}$	Разрушение — мгновенное воспламенение — быстрое сгорание без взрыва Destruction — instantaneous ignition — rapid combustion without an explosion $Q_{1,3} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
$Q_{1,4}$	Разрушение — нет мгновенного воспламенения — облако — последующее воспламенение бензина Destruction — no instant ignition — cloud — subsequent ignition of gasoline $Q_{1,4} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,3 = 8,1 \cdot 10^{-8}$	$8,1 \cdot 10^{-8}$
При частичном разрушении резервуара с водородом Partial destruction of the hydrogen tank		
$Q_{2,1}$	Утечка — мгновенное воспламенение — огненный шар Leak — instant ignition — fireball $Q_{2,1} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
$Q_{2,2}$	Утечка — мгновенное воспламенение — взрыв Leak — instantaneous ignition — explosion $Q_{2,2} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,2 = 1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
$Q_{2,3}$	Утечка — мгновенное воспламенение — быстрое сгорание Leak — instantaneous ignition — rapid combustion $Q_{2,3} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
$Q_{2,4}$	Утечка — нет мгновенного воспламенения — облако — последующее воспламенение бензина Leak — no immediate ignition — cloud — subsequent ignition of gasoline $Q_{2,4} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,3 = 8,1 \cdot 10^{-7}$	$8,1 \cdot 10^{-7}$
$Q_{2,5}$	Утечка — нет мгновенного воспламенения — облако — воспламенение водорода — переход на бензин Leak — no instant ignition — cloud — hydrogen ignition — transition to gasoline $Q_{2,5} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,7 \cdot 0,5 = 9,45 \cdot 10^{-7}$	$9,45 \cdot 10^{-7}$

В большинстве случаев техногенные аварии одновременно наносят ущерб материальному имуществу, окружающей среде, представляют серьезную опасность для людей. Поэтому в нашем исследовании обеспечим единообразную оценку потерь по всем трем аспектам. Кроме того, предполагается, что вы-

ход водорода наружу будет происходить в разных направлениях для понимания опасности в различных местах объекта защиты.

Сценарий 1 подразумевает: постепенную утечку горючего газа — рассеивание — образование газообразного облака — вспышку — тепловую волну (1):

$$Q_{s1} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9 \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,9 = 2,43 \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

На рис. 5 показано стремительное распространение пламени после внезапного воспламенения водорода. С течением времени температура начинает уменьшаться, а максимальное значение зафиксировано на отметке 927 °С. Отметим, что пламя поднимается

вверх и распространяется на бензиновую топливораздаточную колонку (ТРК). Через 2–4 с с момента начала возгорания огонь переходит в устойчивое состояние. Термическое излучение колеблется вверх-вниз под воздействием потоков ветра. После стабилизации пламени

происходит тепловое воздействие на бензиновую топливораздаточную колонку со средним значением $116,1 \text{ кВт/м}^2$.

Сценарий 2 подразумевает вспышку газовой среды при том, что система обеспечения безопасности не срабатывает (2):

$$Q_{s2} = 2,43 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9 = 2,187 \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

На рис. 6 представлена несколько иная ситуация: когда факельное горение водорода распространяется в противоположную сторону, а длина струи достигает 17 м, что обусловлено отсутствием препятствий.

Однако, если проезжая часть находится на расстоянии 15 м от места утечки, то тепловому воздействию будут подвергать-

ся люди и мимо проезжающие автомобили. При этом значение лучистого теплового потока составит 48 кВт/м^2 . Поэтому любой автомобиль, припаркованный ближе 15 м, будет поврежден. Также существует вероятность летального исхода у людей при воздействии на них опасного фактора в течение 10 с.

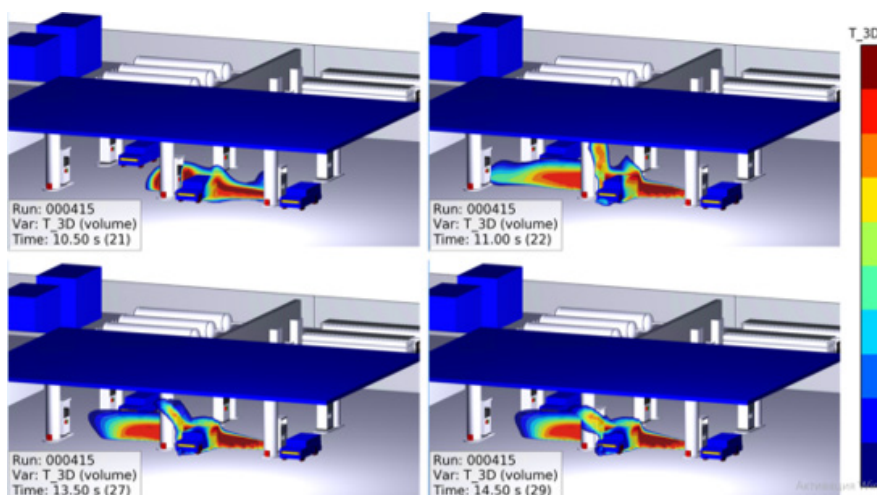


Рис. 5. Развитие деструктивной ситуации с водородом по сценарию 1

Fig. 5. Development of a destructive situation with hydrogen according to scenario 1

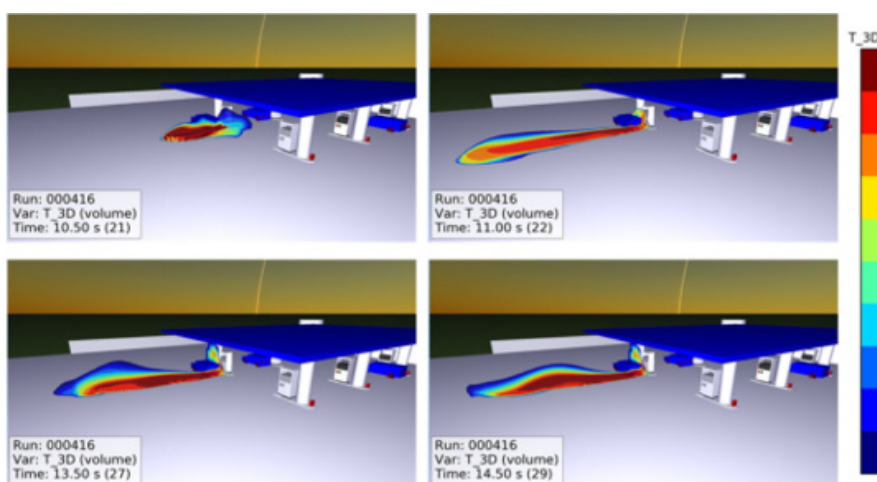


Рис. 6. Развитие деструктивной ситуации с водородом по сценарию 2

Fig. 6. Development of a destructive situation with hydrogen according to scenario 2

Сценарий 3 — ситуация, когда газообразный водород будет скапливаться в пространстве между топливораздаточными колонками. Инициатором горения может быть маломощный источник зажигания: искра статического электричества, искры выхлопной трубы, что обусловлено крайне малой энергией воспламенения водорода (0,02 мДж).

В этом случае произойдет взрыв с максимальным расчетным избыточным давлением 0,055 МПа. Такое давление может привести к серьезным повреждениям основных строительных конструкций, технологического оборудования, к утечке бензина и последующим негативным последствиям.

Сценарий 4 также подразумевает возможность взрыва водорода. Ключевым отличием от сценария 3 выступает ограниченность объема горючего вещества, определяемая объемом бака автомобиля (рис. 7). Максимальное давление взрыва будет относительно низкое, что обусловлено свободным окружающим пространством, быстрым испарением водорода. По мере того, как топливо в автомобиле будет заканчиваться, негативные последствия также будут снижаться.

Повышенное давление в локальной зоне не достигнет дороги или здания АЗС. Серьезные повреждения может получить ТРК (3):

$$Q_{s4} = 1,25 \cdot 10^{-7} \cdot 0,3 \cdot 1 = 3,645 \cdot 10^{-8} \quad (3)$$

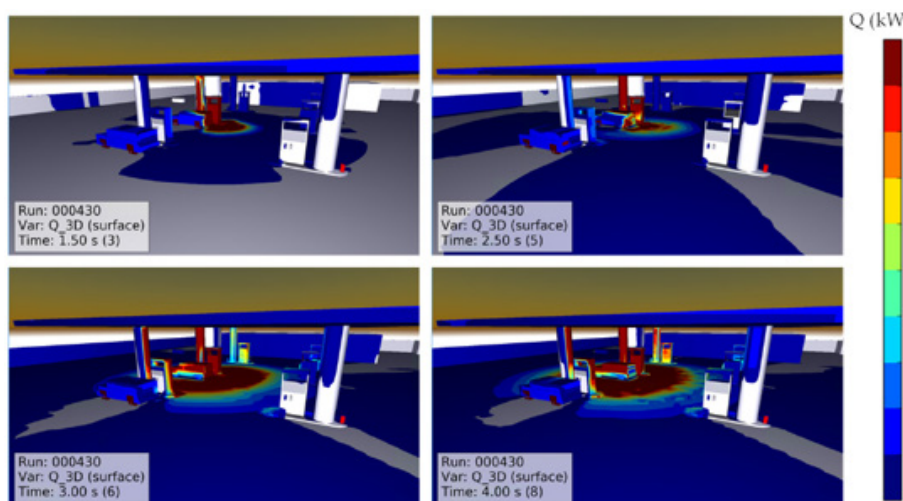


Рис. 7. Развитие деструктивной ситуации с водородом по сценарию 4

Fig. 7. Development of a destructive situation with hydrogen according to scenario 4

При некоторых обстоятельствах, способствующих длительному воздействию теплового излучения, может быть разрушена соседняя ТРК.

Отметим, что при моделировании всех четырех сценариев наблюдается колебание давления от отрицательного до положительного манометрического, после — достигаются показатели атмосферного давления. В соот-

ветствии с основными критериями повреждений при воздействии максимального избыточного давления отмечается деформация стальных конструкций, находящихся в зоне действия системы подачи газа.

Рассмотрим некоторые эмпирические зависимости по исследованию (табл. 2–4). Для струйного горения водорода (4) и для теплового потока 15 кВт/м² (5):

$$R = 0,9 \cdot \sqrt{m} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,9 \cdot \sqrt{0,6} \cdot \frac{35}{0,1} = 244 \text{ м.} \quad (4)$$

$$R = 0,4 \cdot \sqrt{m} \cdot \frac{P}{P_0} = 0,4 \cdot \sqrt{0,6} \cdot \frac{35}{0,1} = 108,5 \text{ м.} \quad (5)$$

Линейная аппроксимация для диапазона 35–70 МПа (6):

$$R = (P) = 3,1 \cdot P.$$

$$R_1 = (35) = 108,5. \quad (6)$$

$$R_2 = (50) = 155.$$

$$R_3 = (70) = 217.$$

Массовый расход водорода зависит от диаметра отверстия, тогда (7):

$$m = C_d \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot P \cdot \sqrt{\frac{M}{ZRT}}.$$

$$m = 0,85 \cdot \frac{\pi \cdot (0,00635)^2}{4} \cdot 35 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\frac{0,002}{1,1 \cdot 8,314 \cdot 293}}. \quad (7)$$

$$m = 0,85 \cdot 3,167 \cdot 10^{-5} \cdot 3,5 \cdot 10^7 \cdot 8,63 \cdot 10^{-4} = 0,01488.$$

где:

C_d — коэффициент истечения 0,85;

M — молярная масса 0,002 кг/моль;

Z — коэффициент сжимаемости при 35 МПа (~1,1);

R — газовая постоянная 8,314 Дж/(моль · К);

T — 293 К.

Таблица 2
Эмпирические зависимости (диаметр, площадь, масса)

Table 2
Empirical dependencies (diameter, area, mass)

Диаметр, d (мм) Diameter, d (mm)	Площадь, S (мм ²) Area, S (mm ²)	Масса, m (кг/с) Weight, m (kg/s)
1	0,785	0,0117
3,18	7,94	0,118
6,35	31,67	0,6
10	78,54	1,168
12,7	126,7	1,885

Определим зависимость теплового потока и расстояния. Из закона сохранения энергии для факела (8):

$$q(r) = \frac{\eta \cdot m \cdot H_c}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{0,2 \cdot 0,6 \cdot 120 \cdot 10^6}{12,57 \cdot r^2} = \frac{1,146 \cdot 10^6}{r^2}, \quad (8)$$

где H_c — доля энергии, идущая на излучение, $120 \cdot 10^6$.

В нашем случае путем моделирования получаются несколько другие значения, поэтому продолжим аппроксимацию уравнения. Степенная функция (9):

$$q = q_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^n = 48 = 116 \cdot \left(\frac{2}{15}\right)^n. \quad (9)$$

$$\left(\frac{2}{15}\right)^n = 0,4138.$$

$$n = \frac{\ln 0,4138}{\ln 0,1333} = \frac{-0,882}{-2,015} = 0,438.$$

$$q(r) = 116 \cdot \left(\frac{2}{15}\right)^{0,438}.$$

Таблица 3
Эмпирические зависимости (радиус, тепловой поток, негативное воздействие)

Table 3
Empirical dependencies (radius, heat flow, negative impact)

Радиус, r (м) Radius, r (m)	Тепловой поток, q (кВт/м ²) Heat flux, q (kW/m ²)	Воздействие Impact
1	144,5	смертельно за 1–2 с fatally in 1–2 sec.
2	116	—
5	77,5	ожоги 3-й степени third-degree burns
10	56,6	ожоги 3-й степени second-degree burns
15	48	—

Рассчитаем вероятность возникновения одного из негативных событий. Предположим, что на гибридной АЗС

имеются 4 баллона, 20 фланцевых соединений, 8 клапанов, тогда суммарная вероятность (10):

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{сум}} &= 4 \cdot Q_{2.1} + 20 \cdot Q_{\text{фл}} + 8 \cdot Q_{\text{кл}}. \\ Q_{\text{фл}} &= 0,1 \cdot Q_{2.1} = 5 \cdot 10^{-7}. \\ Q_{\text{кл}} &= 0,5 \cdot Q_{2.1} = 2,5 \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\lambda_{\text{сум}} = 4 \cdot 5 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 5 \cdot 10^{-7} + 8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} = 5,0 \cdot 10^{-5}.$$

Тогда вероятность аварии за определенный промежуток времени (t) (для малых вероятностей) будет определяться формулой (11):

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda_{\text{сум}} \cdot t} \approx \lambda_{\text{сум}} \cdot t. \quad (11)$$

Таблица 4
Вероятность негативного события

Table 4
Probability of a negative event

Время, t (лет) Time, t (years)	Риск, $P(t)$ Risk, $P(t)$	Вероятность Probability
1	$5 \cdot 10^{-5}$	1/20000
2	$2,5 \cdot 10^{-4}$	1/4000
5	$5 \cdot 10^{-4}$	1/2000
20	$1 \cdot 10^{-3}$	1/1000

Для определения величины пожарного риска распределим зоны объекта защиты и вероятности поражения людей в них:

— зона водородного оборудования, емкость с водородом (зона В): $Q_{1.1}, Q_{1.2}, Q_{1.3}, Q_{2.1}, Q_{2.2}, Q_{2.3}, Q_{2.5}$;

— зона бензинового оборудования, емкости (зона Б): $Q_{1.4}, Q_{2.4}, Q_{2.5}$;

— зона административного здания (зона А): только вторичные воздействия

(ударная волна, тепловое излучение на расстоянии и т. д.);

— селитебная зона (зона С): только социальный риск.

Значение потенциального пожарного риска следует определять по формуле (12). Для расчета индивидуального пожарного риска следует использовать формулу (13). Сводная табл. 5 рассчитанных значений представлена ниже.

$$P_n = \sum_{j=1}^J Q_j \cdot L_{nj}, \quad (12)$$

$$R_n = \sum_{i=1}^N P_i \cdot q_{im}, \quad (13)$$

где:

J — количество рассматриваемых сценариев развития неконтролируемого горения на объекте защиты;

Q_j — вероятность реализации выбранного сценария пожара, год^{-1} ;

L_{nj} — вероятность поражения человека при выбранном сценарии;

q_{im} — вероятность присутствия человека.

Таблица 5
Сводная таблица расчетных значений

Table 5
Summary table of calculated values

Зона анализа The analysis area	Величина P_n , год ⁻¹ Value of P_n , year ⁻¹	Величина R_n , год ⁻¹ Value of R_n , year ⁻¹	Величина S_n , год ⁻¹ Value of S_n , year ⁻¹
Зона В Zone B	$1,09725 \cdot 10^{-5}$	$R_{\text{раб}} = 1,087 \cdot 10^{-6}$	$S = 5 \cdot 10^{-7}$
Зона Б Zone Б	$9,135 \cdot 10^{-7}$	$R_{\text{админ}} = 1,66 \cdot 10^{-7}$	—
Зона А Zone А	$5,5 \cdot 10^{-8}$	—	—

Таким образом, для рабочих, постоянно находящихся у водородной зоны, риск превышает допустимые значения, установленные ст. 93 Федерального закона от 22.07.2008 № 123-ФЗ [14].

Заключение

1. Полученные результаты величины пожарного риска показывают, что уровень безопасности выходит за пределы допустимых значений, установленных Техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности [14] для зоны, в которой постоянно находятся рабочие. Поэтому разработка мощной системы обеспечения пожарной безопасности является приоритетной задачей.

2. При помощи специального программного обеспечения проводили моделирование развития пожара по четырем сценариям. Наиболее худшим определен сценарий, в котором возникает эффект домино. В целом по всем сценариям результаты можно резюмировать следующим образом:

- при возникновении утечки водорода под давлением из диспенсера с последующим возгоранием длина факела пламени составила 17 м, оказывая негативное влияние

на бензиновую ТРК (утечка горючего топлива);

- в случае возникновения взрыва избыточное давление стремительно возрастает, достигая высоких пиковых показателей в ограниченном пространстве, разрушая технологическое оборудование.

3. Для предотвращения условий, способствующих возникновению пожара и взрыва, рекомендуется:

- усилить защиту от маломощных источников зажигания (искр, статического электричества и т. д.) в зоне расположения диспенсеров;

- обеспечить физическое разделение водородной и бензиновой заправочных зон для минимизации вероятности возникновения эффекта домино;

- обеспечить свободное прохождение воздушных потоков по территории объекта защиты.

4. В нормативных документах [9, 10, 14] нет четких требований, предъявляемых к противопожарным расстояниям при использовании водородного оборудования, его размещению и т. д., учитывающих его высокую диффузию и широкий диапазон воспламеняемости водорода. Кроме того, методика [9, 10] не позволяет в полном объеме

оценить величину пожарного риска в случае возникновения эффекта домино.

Таким образом, проектирование и безопасное строительство гибридных водородно-бензиновых станций может быть обеспечено при условии соблюдения приемлемых уровней пожарного риска.

Рассмотренные варианты оперативных событий могут быть использованы при проектировании подобного рода заправочных станций. В будущих исследованиях целесообразно проанализировать ситуации, когда проведено техническое переоснащение или оказывают влияние потоки ветра.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Терехов Е. Ю., Елистратов В. В. Эколого-экономическое сравнение технологий производства водорода в рамках стратегии низкоуглеродного развития // Альтернативная энергетика и экология. 2025. № 2 (431). С. 56–70.
2. Терентьев Д. И., Сатюков Р. С. Анализ сведений о пожарах, вызванных самовозгоранием литий-ионных аккумуляторных батарей // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 20–27.
3. Терентьев Д. И., Кокшаров А. В., Сатюков Р. С. Особенности формирования токсичной газовой среды в помещении при пожаре кобальтсодержащих литий-ионных аккумуляторных батарей, составленных из элементов форм-фактора 18650 // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 24–32.
4. Mathematical intellectual algorithm for determining the fire hazard parameters of oil and oil refining products / D. S. Korolev [et al.] // AIP Conference Proceedings. Melville, New York, 2021. P. 70028.
5. Krysanov N. S., Berdonosova E. A., Klyamkin S. N. Hydrogen separation from gas mixtures: evaluation of adsorbent performance using the IAST model // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2025. Vol. 10. No. 4. P. 342–350.
6. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник в 2 ч. М., 2004. Ч. I. 713 с.
7. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник в 2 ч. М., 2004. Ч. II. 774 с.
8. Факеров Х. Н., Мухторзода С. С. Цифровая трансформация торговли в контексте регионального развития: методология, модели и вызовы центральной Азии // Экономика Таджикистана. 2025. № 4. С. 203–210.
9. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533 // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://clck.su/goXLF> (дата обращения: 24.02.2026).
10. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 // Консорциум Кодекс : электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://clck.su/lcRPI> (дата обращения: 24.02.2026).

11. Аминов Р. З., Бурденкова Е. Ю., Портянкин А. В. Методика оценки годового риска от поломок, пожаров и взрывов на основе графов состояний в электролизных цехах // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11, № 4. С. 305–310.
12. Разработка и обоснование способа безопасного использования водорода при перегреве рабочего тела в паротурбинном цикле АЭС / А. Н. Байрамов [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. 2024. № 12 (429). С. 48–94.
13. Аминов Р. З., Портянкин А. В. Анализ компоновочных решений электролизного цеха водородной надстройки с учетом надежности и взрывопожароопасности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 5-6. С. 29–36.
14. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон № 123 : принят Государственной Думой 04.07.2008 : одобрен Советом Федерации 11.07.2008 // Гарант.ру : информационно-правовой портал. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения: 24.02.2026).

REFERENCES

1. Terekhov E. Yu., Elistratov V. V. Ecological and economic comparison of hydrogen production technologies within the framework of a low-carbon development strategy // Alternative Energy and Ecology. 2025. No. 2 (431). P. 56–70.
2. Terentyev D. I., Satyukov R. S. Analysis of data on fires caused by spontaneous combustion of lithium-ion batteries // Technosphere Safety. 2025. No. 4 (49). P. 20–27.
3. Terentyev D. I., Koksharov A. V., Satyukov R. S. Features of the formation of a toxic gas environment in a room during a fire in cobalt-containing lithium-ion batteries made up of 18650 form factor cells // Technosphere Safety. 2025. No. 3 (48). P. 24–32.
4. Mathematical intellectual algorithm for determining the fire hazard parameters of oil and oil refining products / D. S. Korolev [et al.] // AIP Conference Proceedings. Melville, New York, 2021. P. 70028.
5. Krysanov N. S., Berdonosova E. A., Klyamkin S. N. Hydrogen separation from gas mixtures: evaluation of adsorbent performance using the IAST model // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2025. Vol. 10. No. 4. P. 342–350.
6. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. Fire and Explosion Hazard of Substances and Materials and Means of Their Extinguishing: A Reference Book in 2 parts. Moscow, 2004. Part I. 713 p.
7. Korolchenko A. Ya., Korolchenko D. A. Fire and Explosion Hazard of Substances and Materials and Means of Their Extinguishing: A Reference Book in 2 parts. Moscow, 2004. Part II. 774 p.
8. Fakerov Kh. N., Mukhtorzoda S. S. Digital Transformation of Trade in the Context of Regional Development: Methodology, Models, and Challenges for Central Asia // Economy of Tajikistan. 2025. No. 4. P. 203–210.
9. On Approval of the Methodology for Determining the Estimated Values of Fire Risk at Industrial Facilities : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 26.06.2024 No. 533 // Codex : electronic fund of legal and regulatory technical documents. URL: <https://clck.su/goXLF> (accessed 24.02.2026).

10. On approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures, and fire compartments of various functional fire hazard classes : Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated 14.11.2022 No. 1140 // Codex : electronic fund of legal and regulatory technical documents. URL: <https://clck.ru/lcRPI> (accessed 24.02.2026).

11. Aminov R. Z., Burdenkova E. Yu., Portyankin A. V. Methodology for assessing the annual risk from breakdowns, fires, and explosions based on state graphs in electrolysis shops // Reliability and Safety of Energy. 2018. Vol. 11. No. 4. P. 305–310.

12. Development and justification of a method for the safe use of hydrogen during overheating of the working fluid in the steam turbine cycle of a nuclear power plant / A. N. Bayramov [et al.] // Alternative Energy and Ecology. 2024. No. 12 (429). P. 48–94.

13. Aminov R. Z., Portyankin A. V. Analysis of layout solutions for the electrolysis shop of the hydrogen superstructure taking into account reliability and explosion and fire hazard // News of higher educational institutions. Problems of Energy. 2018. Vol. 20. No. 5–6. P. 29–36.

14. Technical Regulations on Fire Safety Requirements : Federal Law No. 123 : adopted by the State Duma on 04.07.2008 : approved by the Federation Council on 11.07.2008 // Garant.ru : information and legal portal. URL: <https://base.garant.ru/12161584/> (accessed 24.04.2026).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Королев Денис Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник Воронежского института повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России (394000, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, д. 231); РИНЦ ID: 829407; e-mail: spectrumptonus@yandex.ru

Епифанов Евгений Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и правовых отношений Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (394000, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8); РИНЦ ID: 825680.

Кончаков Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры гражданской обороны, защиты населения и территорий Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); РИНЦ ID: 809831.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis S. Korolev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Research Officer, Voronezh institute of Advanced Training of Employees of the EMERCOM of Russia (231 Krasnoznamennaya St., Voronezh, 394000, Russian Federation); ID RSCI: 829407; e-mail: spectrumptonus@yandex.ru

Evgeny N. Epifanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Life Safety and Legal Relations, Voronezh State University of Forestry and Technologies named G. F. Morozov (8 Timiryazeva St., Voronezh, 394000, Russian Federation); ID RSCI: 825680.

Sergey A. Konchakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Civil Defense, Population and Territory Protection, SFA of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); ID RSCI: 809831.