

Научная статья

УДК 614.83; 614.841; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-190-201

ОЦЕНКА ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ВОДОРОДНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА

Торопкин Александр Иванович;

✉ Королева Людмила Анатольевна.

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

✉ koroleva.l@igps.ru

Аннотация. Проведена оценка пожаровзрывобезопасности водорода как топлива, что является актуальным в связи с развитием водородного транспорта. Определены основные причины пожаровзрывоопасности водорода, представлены рекомендации по ее снижению. Установлены отличительные особенности водородных пожаров.

Представлены методы и модели расчета газодинамики, тепломассообмена при горении водорода, проведен их анализ. В качестве основной рассматривается модель вычислительной гидродинамики, которая основана на уравнениях неразрывности, состояния, сохранения импульса и энергии для случаев водородных пожаров и взрывов. Обсуждаются исследования струйного горения водорода. Установлено, что хорошее соответствие результатов расчета с экспериментальными данными по основным характеристикам пожар-струи дает вихреразрешающий подход к моделированию турбулентности. Дальнейшее развитие моделей горения водорода связано с проведением расчета поверхности потенциальной энергии частиц.

Ключевые слова: водород, пожаровзрывобезопасность, транспорт, вычислительная гидродинамика, модель, горение, взрыв, пожар-струя

Для цитирования: Торопкин А.И., Королева Л.А. Оценка пожаровзрывобезопасности водородного транспорта на основе моделирования процессов горения водорода // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 190–201. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-190-201.

Scientific article

ASSESSMENT OF FIRE AND EXPLOSION SAFETY OF HYDROGEN TRANSPORT BASED ON MODELING OF HYDROGEN COMBUSTION PROCESSES BURNING

Toropkin Alexander I.;

✉ Koroleva Ludmila A.

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

✉ koroleva.l@igps.ru

Abstract. The article evaluates the fire and explosion safety of hydrogen as a fuel, which is relevant in connection with the development of hydrogen transport. The main causes of the fire and explosion hazard of hydrogen are identified, and recommendations for its reduction are presented. The distinctive features of hydrogen fires have been established.

Methods and models for calculating gas dynamics and heat and mass transfer during hydrogen combustion are presented, and their analysis is carried out. The main model of computational fluid dynamics is considered, which is based on the equations of continuity, state,

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2025

conservation of momentum and energy for cases of hydrogen fires and explosions. Studies of jet burning of hydrogen are discussed. It is established that a good correspondence of the calculation results with experimental data on the main characteristics of the fire jet provides a vortex-resolving approach to turbulence modeling. The further development of hydrogen combustion models is related to the calculation of the surface potential energy of particles.

Keywords: hydrogen, fire and explosion safety, transport, computational fluid dynamics, model, burning, explosion, fire-jet

For citation: Toropkin A.I., Koroleva L.A. Assessment of fire and explosion safety of hydrogen transport based on modeling of hydrogen combustion processes burning // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 1 (73). P. 190–201. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-190-201.

Введение

В настоящее время возрастает роль использования экологически чистых видов топлива, одним из которых является водород [1–3]. Его теплота сгорания (120 МДж/кг) примерно в три раза больше, чем у дизельного топлива (42 МДж/кг). Также при производстве водорода методом электролиза не выделяется углекислый газ [4]. Исходя из преимуществ водородного топлива, по всему миру проводятся разработки и демонстрационные проекты техники на водородных топливных элементах [5, 6]. Однако, для широкого использования водорода в качестве источника энергии необходимо решить проблемы, связанные с обеспечением безопасности.

Водород имеет низкую энергию воспламенения 0,02 мДж, широкий диапазон распространения пламени 4–75 % об. и скорость горения 2,7–3,5 м/с, что приблизительно в десять раз быстрее, чем у метана, поэтому существует высокий риск возгорания и взрыва из-за утечки в процессе использования [7–9]. Утечка водорода может быть вызвана внутренними дефектами оборудования или внешними факторами, такими как некачественное техническое обслуживание и коррозия соединений, а также может произойти из-за вибрации или столкновений [10]. Если внешнее вентилирование недостаточное, существует риск возгорания или взрыва, вызванного электростатическим разрядом или искровым разрядом от изолированных проводников [11, 12]. В случае возгорания водорода тепловое излучение может привести к гибели или травмам людей и критическим повреждениям оборудования. Более того, если вытекающий водород не воспламеняется сразу и смешивается с воздухом, образуя гремучий газ, избыточное давление от взрыва может привести к разрушению, что в случае пожара вызовет эффект домино [13, 14]. Таким образом, исследования в области безопасности, снижения рисков и предотвращения чрезвычайных ситуаций (ЧС) имеют решающее значение для минимизации последствий в случае утечки водорода и пожара с водородными топливными элементами.

Так как пожарная безопасность транспорта напрямую зависит от вида используемого топлива, для изучения пожаровзрывобезопасности водородного транспорта рассматриваются процессы горения водорода [1–3, 7–9]. Цель работы заключается в оценке пожаровзрывобезопасности водорода как транспортного топлива с использованием моделей его горения.

Аналитическая часть

1. Хранение и пожаровзрывоопасность водорода

Используя водород в качестве топлива для транспорта, его хранят в компримированной, сжиженной, абсорбированной форме и в виде гидрида [15]. Чаще всего газообразный водород хранят под высоким давлением, для чего требуются композитные баллоны, рассчитанные

на давление до 100 МПа. При этом возможные утечки водорода в атмосферу опасны из-за трудного обнаружения горючей смеси. При аварии транспортного средства, работающего на сжатом водороде, возможно факельное горение либо образование взрывоопасного облака газа. У жидкого водорода из-за низкой температуры хранения (20 К) возникают другие угрозы: образование зон с опасной концентрацией и формирование взрывоопасного облака при утечке или проливе. Водород, хранящийся в виде гидридов металлов, способен в местах утечки образовывать зоны загазованности и провоцировать возникновение интенсивного горения. Водород в абсорбированной форме с применением сорбентов при разгерметизации десорбируется и бурно выделяется, что также может привести к аварии. Кроме того, на водородном транспорте высоковольтные батареи находятся вблизи топливных баков, что усложняет аварийную ситуацию. Для обеспечения пожаровзрывобезопасности в основном применяются средства, повышающие прочность и огнестойкость элементов топливной системы и ограничивающие объем выхода водорода. Так, баллоны со сжатым водородом покрываются огнезащитным материалом и для них также предусматриваются устройства аварийного сброса давления и внутренний запорный клапан. В работе [15] предлагается использование переносных токсиметров, определяющих содержание водорода, а также применение автомобиля азотного тушения, создающего среду, не поддерживающую горение.

Водород является взрывоопасным газом из-за своей высокой реакционной способности и способности образовывать взрывчатые смеси с кислородом [16]. Основные причины взрывоопасности водорода:

- легкость воспламенения (от малейшего источника тепла или искры);
- широкий диапазон распространения пламени (4–75 % водорода в воздухе);
- реакция горения сопровождается выделением большого количества энергии (с возможностью взрыва).

При концентрации водорода в воздухе 18–59 % возможен взрыв. Водородные пожары характеризуются как возгорание водорода, возникающее при утечке из резервуаров высокого давления с образованием турбулентного газового факела (пожар-струя) [17]. Отличительные особенности водородных пожаров:

- продолжительность примерно в одну треть от метанового пожара;
- температура пламени струи водорода выше (не менее 150 °C), чем при возгорании струи метана;
- горение возникает в процессе перемешивания водорода с окислителем, а не в готовой смеси.

В связи с ограниченностью статистических данных о пожарах на водородном транспорте предлагается рассмотреть резонансные пожары и инциденты, произошедшие или связанные с водородом в целом, сведения об авариях в разных отраслях промышленности (табл. 1). В результате вопрос пожаровзрывобезопасности водорода весьма актуален и требует комплексного решения [13].

Безопасность водородного транспорта в целом зависит от обеспечения безопасности использования водородного топлива [13, 15]. Снижают риск взрыва (пожара) такие свойства водорода, как текучесть, что не дает образовать взрывоопасную смесь с воздухом; легкость (улетучивание); отсутствие токсичных веществ при горении водорода. Для обеспечения пожаровзрывобезопасности на водородном транспорте рекомендуется: соблюдать технологические правила использования водорода (композитные баллоны высокого давления и материалы, которые не боятся водородного охрупчивания); автоматически блокировать подачу топлива при возникновении утечек (датчики потока и отсекающие клапаны); применять негорючие материалы вблизи элементов топливоподачи; использовать азотное тушение; применять переносные токсиметры для контроля взрывоопасности атмосферы; идентифицировать транспортные средства, работающие на водороде [15].

Таблица 1

Инциденты, связанные с водородом

№	Дата, место, инцидент	Обстоятельства
1	06.05.1937, авиабаза Лейкхерст, г. Манчестер-Тауншип, США; катастрофа дирижабля «Гинденбург»	Дирижабль при посадке, сбросив якорные канаты, загорелся, рухнул на землю и в течение 34 с сгорел дотла. Погибло 35 чел. на борту дирижабля, 1 рабочий погиб на земле
2	05.04.1975, г. Илфорд, Великобритания; взрыв кислородного сепаратора из-за попадания водорода	Из-за резкого выброса щелока пострадал 1 чел., который позже скончался от ожогов
3	28.01.1986, акватория Атлантического океана; взрыв резервуара со сжиженным водородом	Погибли все 7 астронавтов, находившихся на борту космического челнока «Челленджер»
4	08.01.2007, угольная электростанция Маскингем-Ривер, штат Огайо, США; взрыв сжатого водорода	Взрыв привел к значительному ущербу и гибели 1 чел. Причина: преждевременный разрыв предохранительного клапана, используемого в системе охлаждения сжатым водородом
5	11.03.2011, г. Фукусима, Япония; взрыв водорода в здании реакторов АЭС	Повреждены 3 здания реакторов. В окружающую среду попали радиоактивные элементы, объем выброса которых составил до 20 % от выбросов при чернобыльской аварии
6	12.02.2018, г. Даймонд-Бар, Калифорния, США; взрыв грузовика с водородом	По пути к водородной станции загорелся грузовик, перевозивший около 24 баллонов со сжатым водородом
7	23.05.2019, технопарк Канвондо, Южная Корея; взрыв водородного баллона	Погибли 2 чел. и 6 чел. получили ранения. Причина – кислород, который просочился в резервуары для хранения водорода
8	12.06.2019, г. Сандвик, Норвегия; мощный взрыв на водородной заправке	После взрыва резервуара с водородом начался сильный пожар. Персонал заправки не пострадал. От сильной ударной волны в ближайших авто сработали подушки безопасности, причинив увечья пассажирам. Закрылись водородные станции
9	09.08.2021, электростанция Медупи, ЮАР; взрыв на четвертом энергоблоке	Никто из сотрудников предприятия не пострадал. Причина – неправильно выполненная оператором процедура во время очистки генератора от водорода
10	25.02.2022, г. Детройт, штат Мичиган, США; взрыв баллона с водородом в кузове пикапа	2 чел. получили ранения. Причина – утечка в резервуаре с водородом
11	22.04.2022, г. Тованда, штат Пенсильвания, США; взрыв резервуара с водородом	5 сотрудников были доставлены в больницы с травмами, не представляющими угрозы для жизни
12	28.09.2022, г. Васай, Индия; взрыв баллона с водородом	3 чел. погибли, 8 – получили ранения. Причина – неисправный бак
13	19.12.2023, предприятие «ТАИФ-НК», г. Нижнекамск, Россия; факельное горение водорода	Причина: утечка водорода из-за разгерметизации при опрессовке трубопроводов. Защита сработала штатно, в течение 40 мин возгорание локализовано, пострадавших и разрушений нет
14	26.06.2024, г. Герстхофен, округ Аугсбург, Германия; взрыв на станции заправки водородом	В центре грузовых перевозок вспыхнул пожар. Никто не пострадал
15	19.09.2024, г. Гейсмар, штат Луизиана, США; взрыв водорода и пожар	На заводе по производству возобновляемого дизельного топлива Chevron Renewable Energy Group 2 рабочих получили серьезные ранения
16	23.12.2024, Корея; взрыв в отсеке топливных элементов водородного автобуса	Городской автобус, работавший на топливных элементах и водороде, заправлялся на водородной заправочной станции. Как только эта операция была завершена, двигатель – запущен повторно, в задней части транспортного средства произошел взрыв, в результате которого 3 чел. получили серьезные травмы. Взрыв прогремел в отсеке топливных элементов, и некоторые источники сообщают, что он случился через 11 с после перезапуска автобуса

№	Дата, место, инцидент	Обстоятельства
17	02.01.2025, Франция; пожар в парке водородных автобусов	Ночью в гараже компании общественного транспорта произошел пожар на топливных элементах, загорелся водородный автобус. На стоянке перед зданием было припарковано 7 автобусов. 6 из них были уничтожены огнем, а седьмой, последний в ряду, был серьезно поврежден. Пожарные расчеты потушили пожар 6 ч спустя. Никто не пострадал. Близлежащая станция заправки водородом, расположенная в 150 м от места происшествия, также не пострадала

2. Моделирование водородных пожаров

В большинстве случаев при рассмотрении водородных пожаров используется метод вычислительной гидродинамики (*CFD – computational fluid dynamics*). Он изучает численное решение основных уравнений, характеризующих движение жидкости и газов при описании поля течения в фиксированных точках пространства (способ Эйлера) или во времени (способ Лагранжа) [18]. Основные уравнения рассматривают три фундаментальных принципа физики: сохранение массы (уравнение непрерывности); 2-й закон Ньютона (уравнение движения); 1-й закон термодинамики (уравнение энергии). Однако для этих уравнений нет обобщенного аналитического решения, поэтому они решаются численно в дискретных точках пространства и/или времени.

Определяющие уравнения:

1. Уравнение неразрывности (закон сохранения массы):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0,$$

где ρ – плотность; \mathbf{v} – вектор скорости.

2. Уравнение движения (закон количества движения):

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v} - \mathbf{T}_\sigma) - \rho \mathbf{F} = 0,$$

где \mathbf{T}_σ – тензор напряжений; \mathbf{F} – заданный вектор внешних массовых сил.

3. Уравнение энергии:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla[(\rho e \mathbf{E} - \mathbf{T}_\sigma) \mathbf{v} + \mathbf{h}] - \rho(\mathbf{F} \mathbf{v} + q) = 0.$$

где e – удельная полная энергия; \mathbf{E} – единичный тензор; \mathbf{h} – вектор потока тепловой энергии; q – массовый источник энергии.

4. Уравнение энтропии:

$$\frac{\partial(\rho \eta)}{\partial t} + \nabla \left(\rho \eta \mathbf{v} + \frac{\mathbf{h}}{T} \right) - \rho \frac{q}{T} - \omega^* = 0,$$

где η – удельная энтропия; T – абсолютная температура; ω^* – функция диссипации.

Рассматриваемый раздел механики сплошных сред, посвященный исследованию газовых потоков, представляет собой интегрированный подход, объединяющий физические, математические и численные методы для определения параметров и характеристик таких процессов [18]. Определяющие уравнения различаются в зависимости от трения, сжимаемости среды, турбулентности, переноса веществ, электромагнитных взаимодействий, химических реакций, многофазности и т.д. Основные методы решения уравнений: метод конечных разностей, элементов, объемов, метод сглаженных частиц, метод с распределением вероятности.

Для моделирования водородных пожаров требуются специальные методы, так как горение пожар-струй, возникающее, например, при утечке водорода из бака транспортного средства, отличается от горения перемешанных горючих смесей [16]. Проводились экспериментальные и численные исследования утечки водорода и поведения пламени, некоторые из которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исследования струйного горения водорода

№	Авторы и эксперимент	Исследования	Ограничения, условия, особенности
1	Эстбери и Хоксворт, утечка водорода [12]	Сценарии возгорания, включающие немедленное воспламенение из-за утечки в трубопроводе подачи водорода	Давление 15 МПа, размер трубок 1–12 мм. Выброс искры управляемся электрическим сигналом
2	Чан и др., масштабный струйный пожар водорода в сложной конструкции [19]	Струйное пламя, которое повредило многие объекты и оборудование в конструкции	Давление 19 МПа, диаметр утечки 0,5 м. Длина струйного пламени в месте утечки через 60 с – 53 м
3	Се и др., струйный пожар в туннеле с продольной вентиляцией [20]	Максимальная температура потолка и высота теплового слоя в зависимости от скорости продольной вентиляции (обратная зависимость)	Туннель с продольной вентиляцией
4	Гу и др., струйный пожар в туннеле [21]	Влияние на диффузию водорода и температуру места утечки водорода, скорости и площади утечки, продольной и поперечной вентиляции и объема туннеля	Из-за концентрации водорода и роста температуры туннель более опасен (по сравнению с открытым пространством). Вентиляция с целью предотвращения вторичных аварий
5	Хукер и др., возгорание струи водорода и численное моделирование в помещении с вентиляцией [22]	Поведение струи водорода в зависимости от скорости выделения водорода, площади вентиляционного отверстия и тепловых характеристик помещений	Достаточная вентиляция эффективно снижает ущерб от пожара в случае утечки водорода
6	Лин и др., пожар при утечке водорода на платформе для производства водорода [23]	Построение полномасштабной модели, учитывающей компоновку оборудования, место и скорость утечки	Высокие температуры в плохо проветриваемых помещениях, что подтвердило важность вентиляции
7	Юань и др., возгорание водорода при утечке из баков хранения водорода [24]	Влияние водяного тумана на струйное тушение пожара как эффективное снижение температуры в очаге возгорания	Обобщение водородных пожаров в различных помещениях
8	В.Ю. Глотов и др., вертикальная водородная пожар-струя, с использованием методики КАБАРЕ [25]	Определение длины видимого пламени и распределение радиационного теплового потока по углу	Давление и температура водорода в баллоне: 10,5 МПа и -41,6 °C; в окружающей среде – 0,1 МПа и 20 °C. Геометрия – цилиндр высотой 16 м переменного диаметра (7–10,5 м). На нижнем торце по центру – инжекционная трубка длиной 1 м

№	Авторы и эксперимент	Исследования	Ограничения, условия, особенности
9	Лю и др., метод моделирования возгорания водородной струи с использованием симулятора динамики огня [16]	Анализируется влияние числовых (зона исключения самовоспламенения, смещение, количество частиц, сетка) и физических (скорость частиц, угол распыления и самовоспламенение) параметров на температуру газа. Результаты показывают, что температура газа вблизи сопла чувствительна к этим параметрам	Высокоскоростная струя водорода моделируется путем применения лагранжевых частиц, несущих необходимую массу и импульс. Частицы быстро испаряются, образуя струю газовой фазы

В работе [26] проведен обзор публикаций, посвященных оценке пожарной безопасности автомобильных стоянок и автозаправочных станций, использующих сжатый и сжиженный водород. Проанализированы аварии с участием водорода, причиной большинства из которых является нарушение герметичности запорной арматуры. Показано, что H_2 по сравнению с природным газом CH_4 является более пожаровзрывоопасным. Установлено, что при истечении водорода из сбросных клапанов топливных баков, сопровождающемся возникновением факельного горения, давление в гараже небольшого объема (например, индивидуальном гараже) может достичь высоких значений (около 55 кПа), что, по мнению авторов [26], обусловлено большой нормальной скоростью горения водорода, определяющей скорость тепловыделения во фронте пламени, которая значительно превышает соответствующую величину для факелов углеводородных газов.

Хорошее соответствие результатов расчета с экспериментом по основным характеристикам пожар-струи (видимая длина пламени, доля излучаемого тепла, профиль радиационного теплового потока) получено в работе [25], в которой описываются модели излучения и реакций горения водородной пожар-струи. Для выполнения расчетного анализа горения пожар-струи с помощью основанного на методике КАБАРЕ вихреразрещающего подхода к моделированию турбулентности проведена адаптация расчетной модели термического излучения и реакций диффузационного горения. Далее представлены измерения для определения геометрических (рис. 1) и радиационных (рис. 2) характеристик крупномасштабных вертикальных струй водородного пламени.

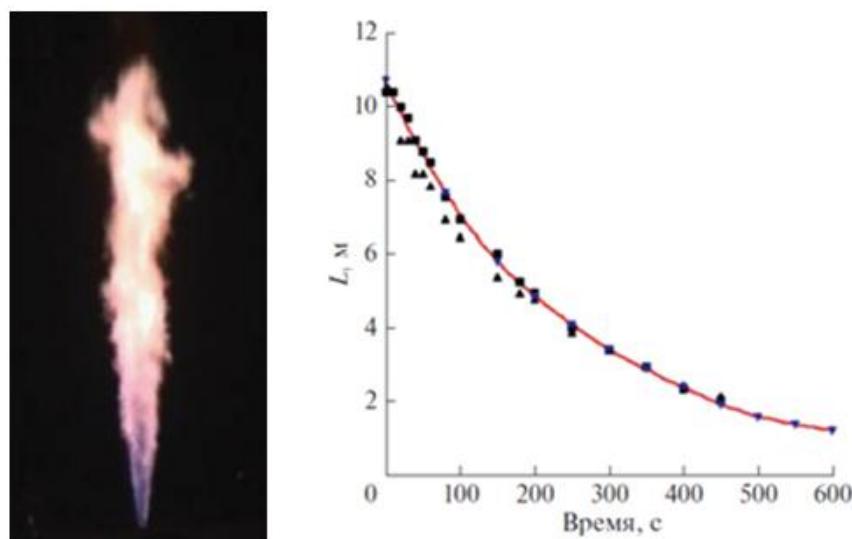


Рис. 1. Фотография видимого пламени водорода (слева) и его длина L в зависимости от времени (справа) [25]

Из рис. 2 видна существенная неоднородность распределения радиационного потока тепла вследствие лучевого эффекта, являющегося основным недостатком метода дискретных ординат [25]. По графику (рис. 2) наблюдаем, что в точках, которые попадают на лучи, величина радиационного теплового потока преувеличена, а в пространстве между лучами занижена. Чтобы получить действительный тепловой поток в точке (R, Z), необходимо усреднить эти данные по углу поворота ϕ . Здесь R – расстояние от оси струи, Z – высота от сопла пожар-струи. Данные исследования имеют отношение к сценарию внезапной утечки из сосуда под высоким давлением, содержащего водород, и послужат технологической основой для определения опасных масштабов, связанных с непреднамеренным выбросом водорода в центрах хранения и распределения [25].

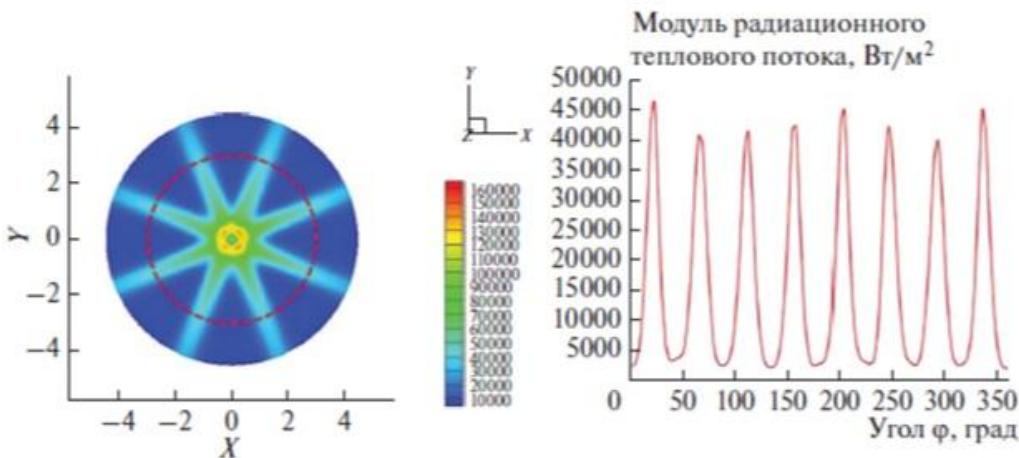


Рис. 2. Радиационный тепловой поток в зависимости от угла поворота ϕ на высоте $Z=3$ м от сопла с числом лучей 32 [25]

Важное практическое значение при воспламенении систем водород-воздух имеет период индукции, во время протекания которого происходят процессы, которые могут быть представлены в виде элементарных реакций (рис. 3) [26, 27]. Обрыв цепи (гибель) происходит из-за выхода активной частицы из зоны реакции за счет диффузии или конвекции.

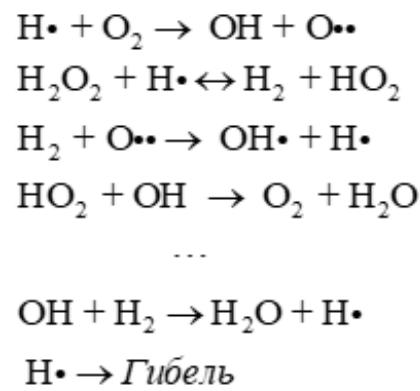


Рис. 3. Примеры элементарных реакций периода индукции для системы водород-воздух

Для уточнения пути протекания реакций, оценки периода индукции, моделирования процессов горения смеси водород-воздух авторами предлагается проведение расчета поверхности потенциальной энергии частиц.

Заключение

Высокая взрывопожароопасность водорода – следствие быстрого химического взаимодействия с окислителями и выделение большого количества тепла при горении. Наиболее взрывоопасен газообразный водород в воздушно-водородной смеси. Жидкий водород опасен при проливе, утечке в невентилируемом помещении из-за способности образовывать горючую и детонирующую смесь. Такие свойства водорода, как текучесть и легкость, снижают риск взрыва (пожара). При горении водорода отсутствуют токсичные продукты реакции.

Определены специфические меры пожаровзрывобезопасности при использовании водорода в качестве моторного топлива.

Моделирование водородных пожаров на транспорте выполняется на основе уравнений законов сохранения массы, импульса, энергии. Даны оценка моделей струйного горения водорода. Установлено, что высокую степень соответствия результатов расчета с экспериментальными данными по основным характеристикам пожар-струи дает вихреразрешающий подход к моделированию турбулентности. Дальнейшее развитие моделей горения водорода авторы связывают с установлением величин поверхности потенциальной энергии частиц, образующихся в ходе элементарных реакций при воспламенении систем водород-воздух.

Список источников

1. Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and chemicals: An environmental footprint assessment / R. Hren [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 173. P. 113–113.
2. Kim B., Hwang K.I. Effect of angular motion on accidental hydrogen fires in conceptional ship fuel preparation room with mechanical ventilation // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 50. P. 1075–1090.
3. Safety evaluation on hydrogen leakage and combustion of high-pressure hydrogen dispenser / B. Wang [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 72. P. 1010–1022.
4. Laguna-Bercero M.A. Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review // Journal of Power sources. 2012. Vol. 203. P. 4–16.
5. Sürer M.G., Arat H.T. Advancements and current technologies on hydrogen fuel cell applications for marine vehicles // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47. № 45. P. 19865–19875.
6. A study on a numerical simulation of the leakage and diffusion of hydrogen in a fuel cell ship / F. Li [et al] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 97. P. 177–185.
7. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process / F. Yang [et al.] // International journal of hydrogen energy. 2021. Vol. 46. № 61. P. 31467–31488.
8. Armaroli N., Balzani V. The hydrogen issue // ChemSusChem. 2011. Vol. 4. № 1. P. 21–36.
9. Mazloomi K., Gomes C. Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges // Renewable and sustainable energy reviews. 2012. Vol. 16. № 5. P. 3024–3033.
10. Simulation and analysis of hydrogen leakage and explosion behaviors in various compartments on a hydrogen fuel cell ship / X. Mao [et al.] // International journal of hydrogen energy. 2021. Vol. 46. № 9. P. 6857–6872.
11. Safety guidelines and a training framework for LNG storage and bunkering at ports / O. Aneziris [et al.] // Safety Science. 2021. Vol. 138. P. 105–212.
12. Astbury G.R., Hawksworth S.J. Spontaneous ignition of hydrogen leaks: a review of postulated mechanisms // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. Vol. 32. № 13. P. 2178–2185.

13. LaChance J., Tchouvelev A., Engebo A. Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure // International journal of hydrogen energy. 2011. Vol. 36. № 3. P. 2381–2388.
14. Gómez-Mares M., Zárate L., Casal J. Jet fires and the domino effect // Fire safety journal. 2008. Vol. 43. № 8. P. 583–588.
15. Оценка эффективности способов обеспечения пожаровзрывобезопасности транспорта на водородном топливе / И.П. Елтышев [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2022. № 2. С. 19–26.
16. Analyzing the gas temperature of a hydrogen jet fire in a compartment with the Fire Dynamics Simulator / W. Liu [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 53. P. 1097–1106.
17. Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames / R.W. Schefer [et al.] // International journal of hydrogen energy. 2007. Vol. 32. № 12. P. 2081–2093.
18. Coupling CFD and VR for advanced firefighting training in a virtual ship engine room / D. Glušić [et al.] // Results in engineering. 2024. Vol. 24. P. 103025.
19. Jang C.B., Choi S.W., Baek J.B. CFD modeling and fire damage analysis of jet fire on hydrogen pipeline in a pipe rack structure // International journal of hydrogen energy. 2015. Vol. 40. № 45. P. 15760–15772.
20. Thermal and fire characteristics of hydrogen jet flames in the tunnel at longitudinal ventilation strategies / Yu. Xie [et al.] // Fuel. 2021. Vol. 306. P. 121659.
21. Hazard analysis on tunnel hydrogen jet fire based on CFD simulation of temperature field and concentration field / X. Gu [et al.] // Safety science. 2020. Vol. 122. P. 104532.
22. Hydrogen jet fires in a passively ventilated enclosure / P. Hooker [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. № 11. P. 7577–7588.
23. Numerical simulation and consequence analysis of accidental hydrogen fires in a conceptual offshore hydrogen production / H. Lin [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48. № 27. P. 10250–10263.
24. Yuan Yu., Wu S., Shen B. A numerical simulation of the suppression of hydrogen jet fires on hydrogen fuel cell ships using a fine water mist // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46. № 24. P. 13353–13364.
25. Моделирование водородной пожар-струи с помощью методики КАБАРЕ / В.Ю. Глотов [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2022. № 4. С. 25–42.
26. Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31. № 2. С. 41–51.
27. Горев В.А., Медведев Г.М. Кинетические и газодинамические причины аварийных взрывов водорода // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22. № 11. С. 24–30.

References

1. Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and chemicals: An environmental footprint assessment / R. Hren [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 173. P. 113–113.
2. Kim B., Hwang K.I. Effect of angular motion on accidental hydrogen fires in conceptional ship fuel preparation room with mechanical ventilation // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 50. P. 1075–1090.
3. Safety evaluation on hydrogen leakage and combustion of high-pressure hydrogen dispenser / B. Wang [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 72. P. 1010–1022.
4. Laguna-Bercero M.A. Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review // Journal of Power sources. 2012. Vol. 203. P. 4–16.
5. Sürer M.G., Arat H.T. Advancements and current technologies on hydrogen fuel cell applications for marine vehicles // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47. № 45. P. 19865–19875.

6. A study on a numerical simulation of the leakage and diffusion of hydrogen in a fuel cell ship / F. Li [et al] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 97. P. 177–185.
7. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process / F. Yang [et al.] // International journal of hydrogen energy. 2021. Vol. 46. № 61. P. 31467–31488.
8. Armaroli N., Balzani V. The hydrogen issue // ChemSusChem. 2011. Vol. 4. № 1. P. 21–36.
9. Mazloomi K., Gomes C. Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges // Renewable and sustainable energy reviews. 2012. Vol. 16. № 5. P. 3024–3033.
10. Simulation and analysis of hydrogen leakage and explosion behaviors in various compartments on a hydrogen fuel cell ship / X. Mao [et al.] // International journal of hydrogen energy. 2021. Vol. 46. № 9. P. 6857–6872.
11. Safety guidelines and a training framework for LNG storage and bunkering at ports / O. Aneziris [et al.] // Safety Science. 2021. Vol. 138. P. 105–212.
12. Astbury G.R., Hawksworth S.J. Spontaneous ignition of hydrogen leaks: a review of postulated mechanisms // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. Vol. 32. № 13. P. 2178–2185.
13. LaChance J., Tchouvelev A., Engebo A. Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure // International journal of hydrogen energy. 2011. Vol. 36. № 3. P. 2381–2388.
14. Gómez-Mares M., Zárate L., Casal J. Jet fires and the domino effect // Fire safety journal. 2008. Vol. 43. № 8. P. 583–588.
15. Ocenna effektivnosti sposobov obespecheniya pozharovzryvobezopasnosti transporta na vodorodnom toplive / I.P. Eltyshev [i dr.] // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvratshchenie, likvidaciya. 2022. № 2. S. 19–26.
16. Analyzing the gas temperature of a hydrogen jet fire in a compartment with the Fire Dynamics Simulator / W. Liu [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 53. P. 1097–1106.
17. Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames / R.W. Schefer [et al.] // International journal of hydrogen energy. 2007. Vol. 32. № 12. P. 2081–2093.
18. Coupling CFD and VR for advanced firefighting training in a virtual ship engine room / D. Glujic [et al.] // Results in engineering. 2024. Vol. 24. P. 103025.
19. Jang C.B., Choi S.W., Baek J.B. CFD modeling and fire damage analysis of jet fire on hydrogen pipeline in a pipe rack structure // International journal of hydrogen energy. 2015. Vol. 40. № 45. P. 15760–15772.
20. Thermal and fire characteristics of hydrogen jet flames in the tunnel at longitudinal ventilation strategies / Yu. Xie [et al.] // Fuel. 2021. Vol. 306. P. 121659.
21. Hazard analysis on tunnel hydrogen jet fire based on CFD simulation of temperature field and concentration field / X. Gu [et al.] // Safety science. 2020. Vol. 122. P. 104532.
22. Hydrogen jet fires in a passively ventilated enclosure / P. Hooker [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. № 11. P. 7577–7588.
23. Numerical simulation and consequence analysis of accidental hydrogen fires in a conceptual offshore hydrogen production / H. Lin [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48. № 27. P. 10250–10263.
24. Yuan Yu., Wu S., Shen B. A numerical simulation of the suppression of hydrogen jet fires on hydrogen fuel cell ships using a fine water mist // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46. № 24. P. 13353–13364.
25. Modelirovanie vodorodnoj pozhar-strui s pomoshch'yu metodiki KABARE / V.Yu. Glotov [i dr.] // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika. 2022. № 4. S. 25–42.
26. Gordienko D.M., Shebeko Yu.N. Pozharnaya bezopasnost' ob"ektov infrastruktury transporta na vodorodnom toplive // Pozharovzryvobezopasnost'. 2022. T. 31. № 2. S. 41–51.
27. Gorev V.A., Medvedev G.M. Kineticheskie i gazodinamicheskie prichiny avarijnyh vzryvov vodoroda // Pozharovzryvobezopasnost'. 2013. T. 22. № 11. S. 24–30.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 22.01.2025; одобрена после рецензирования: 20.03.2025;
принята к публикации: 26.03.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 22.01.2025; approved after review: 20.03.2025;
accepted for publication: 26.03.2025

Информация об авторах:

Торопкин Александр Иванович, преподаватель кафедры практической подготовки сотрудников пожарно-спасательных формирований Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: toropkin_ai@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8061-6771>, SPIN-код: 4184-9948

Королева Людмила Анатольевна, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: koroleva.l@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN-код: 6101-9772

Information about the authors:

Toropkin Alexander I., lecturer of the department of practical training of fire and rescue personnel of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: toropkin_ai@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8061-6771>, SPIN: 4184-9948

Koroleva Ludmila A., professor of the department of fire, emergency rescue equipment and automotive industry of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: koroleva.l@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN: 6101-9772