

Особенности поведения резервуаров с компримированным и сжиженным водородом в очаге пожара

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. Проведено обоснование важности исследований поведения резервуаров с компримированным и сжиженным водородом в очаге пожара в связи с тем, что такие аварии на объектах водородного транспорта являются наиболее опасными. Актуальность статьи обусловлена необходимостью оценки опасности указанного выше сценария аварии с целью его предотвращения и снижения последствий. Целью работы является анализ закономерностей протекания таких аварий на основе рассмотрения современных исследований в указанном направлении.

Поведение резервуаров с компримированным водородом в очаге пожара. Компримированный водород, как правило, хранится в баллонах из композитных материалов, а сжиженный — в двухболоочечных изотермических резервуарах. При попадании баллона из композитных материалов в очаг пожара через 5–15 мин происходит его взрыв. При этом давление газа в баллоне в момент его разрыва отличается от первоначального не более чем на 10 %.

Поведение резервуаров с жидким водородом в очаге пожара. Жидкий водород хранится и транспортируется в изотермических двухболоочечных резервуарах. Время сохранения целостности подобного резервуара (промежуток времени от начала огневого воздействия до разрыва) может достигать нескольких десятков минут в зависимости от его конструкции и интенсивности теплового воздействия.

Выводы. При разрушении баллонов с компримированным водородом и резервуаров с жидким водородом образуются ударные волны, огненные шары и разлетающиеся фрагменты баллонов и резервуаров. Размеры зон поражения могут достигать нескольких десятков метров в зависимости от параметров баллонов и резервуаров. При этом наибольший размер зоны поражения наблюдается в случае образования огненного шара.

Ключевые слова: разрыв резервуаров; время сохранения целостности; огненный шар; ударная волна; фрагменты резервуара

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Особенности поведения резервуаров с компримированным и сжиженным водородом в очаге пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 50–58. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.50-58

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

Behavior of compressed and liquefied hydrogen tanks in a fire zone

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 paper substantiates the importance of investigations into the behaviour of tanks with compressed and liquefied hydrogen in the body of the fire due to the fact that such accidents at hydrogen transport facilities are the most dangerous. The relevance of the paper is conditioned by the need to analyze such scenario of the accident to prevent it and to reduce its consequences. The aim of the paper is to analyze the regularities of such accidents on the basis of consideration of modern research in the specified direction.

Behavior of tanks with compressed hydrogen in the body of the fire. Compressed hydrogen is usually stored in composite cylinders, while liquefied hydrogen is stored in double-shell isothermal tanks. When the cylinder made of composite materials with compressed hydrogen gets into a fire, it explodes within 5–15 minutes if no fireproofing is made for these cylinders. A destruction of the cylinder made of the composite materials takes place at gas pressures exceeding an initial pressure not more than on 10 %. A rupture occurs due to a loss of polymer compound. A fire resistance limit of such a cylinder is inversely proportional to an intensity of thermal action of the fire.

Behavior of tanks with liquid hydrogen in a fire. Liquid hydrogen is stored and transported in double-shell isothermal tanks. The fire resistance limit of the liquefied hydrogen tank can reach several tens of minutes depending on the parameters of thermal isolation.

Conclusions. Shock waves, fireballs and fragments of the tanks are the main hazardous factors of the accidents with a rupture of the hydrogen tanks. Sizes of hazardous zones can reach several tens of metres, depending on the parameters of cylinders and tanks. The largest size of the affected zone was observed in the case of the fireball formation. The fire resistance limit of the tanks is inversely proportional to an intensity of the thermal action of the fire.

Keywords: tank rupture; fire resistance limit; fireball; shock wave; tank fragments

For citation: Shebeko Yu.N. Behavior of compressed and liquefied hydrogen tanks in a fire zone. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):50-58. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.50-58 (rus).

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

Введение

В настоящее время в развитых странах мира большое внимание уделяется развитию водородной энергетики (преимущественно в части транспорта, работающего на водородном топливе). Так, согласно [1], в Корею эксплуатируются 16 206 автомобилей на водородном топливе, имеется 112 водородных АЗС (данные на август 2021 г.). Согласно плану, Корея до 2040 г. намеревается произвести 6,2 млн автомобилей на водородном топливе и построить 1200 водородных АЗС (включая многотопливные). Водородные технологии развиваются и в Российской Федерации. Обзор отечественных и международных документов в указанной области дан в работах [2, 3]. В [4–7] дан обзор отечественных и зарубежных работ, посвященных обеспечению пожарной безопасности объектов инфраструктуры транспорта, использующего водород как моторное топливо, а также объектов хранения и транспортировки водорода.

Одной из характерных пожароопасных аварий на объектах водородного транспорта является попадание топливного резервуара в очаг пожара. При этом возможен разрыв данного резервуара с образованием ударных волн, огненного шара с интенсивным тепловым излучением и разлетом фрагментов. В связи с этим представляет интерес аналитический обзор опубликованных в литературе трудов, посвященных рассмотрению указанных явлений. Такому обзору применительно к транспортным резервуарам посвящена настоящая статья.

Водород на борту автомобиля может храниться в резервуарах (баллонах) как в газообразном (компримированном) виде ($G\text{H}_2$), так и в виде жидкого продукта ($L\text{H}_2$). Поведение резервуаров с $G\text{H}_2$ и $L\text{H}_2$ в очаге пожара существенно различается, что и отражено в настоящей статье.

Поведение резервуаров с компримированным водородом в очаге пожара

В [1] экспериментально изучено воздействие очага пожара, расположенного под автомобилем на водородном топливе, на топливный бак (баллон) с $G\text{H}_2$ под давлением 70 МПа. Баллон имел оболочку из поли-

амида с внешним покрытием из углепластика, снабжен тепловым предохранительным клапаном (TPRD), рассчитанным на температуру 110 °С, и содержал 6,3 кг водорода. Очаг пламени создавался с помощью 24 горелок, работающих на гептане. Нагрев продолжался вплоть до взрыва баллона. Экспериментальный стенд был оборудован датчиками температуры, а также датчиками давления для регистрации ударной волны (УВ) при взрыве топливного бака. После зажигания горелок пламя быстро охватывало весь автомобиль. Баллон взорвался через 11 мин 12 с, образуя УВ, огненный шар в виде грибовидного облака и фрагменты топливного бака и автомобиля. Задняя часть автомобиля поднималась на высоту 1,5 м от земли и была отброшена на расстояние 2 м. Давление в УВ составляло 9–173 кПа в зависимости от расстояния от места взрыва (173 кПа на расстоянии 3 м). Фрагменты с массой до 23,2 кг (в основном 3–4 кг) разлетались на расстояния до 55,8 м (фрагменты баллона) и 38,7 м (фрагменты автомобиля).

Работа [8] посвящена экспериментальному изучению поведения водородного баллона из композитных материалов со встроенными полимерными нитями в очаге пожара. Отмечено, что в отличие от металлических баллонов разрушение сосуда из композитных материалов в очаге пожара происходит без существенного повышения давления газа. Были выполнены эксперименты с баллонами объемом 19 и 36 л, заполненными различными газами (азот, водород, гелий) при начальных давлениях 10,25, 52,5 и 70 МПа. В стенки сосудов были вмонтированы термометры на различных расстояниях по толщине стенки. Тепловой поток на стенки создавался четырьмя водородными инжекторами. Определяли время до разрыва баллона и температуру по толщине стенки.

Апробация методики эксперимента проведена на стальных баллонах, имеющих те же размеры, что и баллоны из композитных материалов. По оценкам авторов статьи, плотность теплового потока на стенки баллона составляет 80–100 кВт/м². Температура стальных стенок составляла 800–1000 °С. Проведено более 30 опытов с баллонами из композитных материалов. Найдено, что вид газовой среды внутри

баллонов не оказывает существенного влияния на их поведение в очаге пожара. Разрушение баллонов из композитных материалов происходит при давлениях, относительно слабо отличающихся от начального (71,5 МПа при начальном давлении 70 МПа). Это обусловлено деградацией материала стенок при воздействии пламени. Время до разрыва баллона составляло около 240 с, при этом температура стенок по толщине в момент разрыва варьируется от 95 (внутренняя поверхность стенки) до 400 °С (внешняя поверхность стенки). Изучено влияние начального давления на время, требуемое для разрушения баллона: 70 МПа — 240 с, 52,5 МПа — 311 с. При давлениях 10 и 25 МПа взрывного разрушения баллонов не происходило. Так, при времени 490 и 400 с произошла разгерметизация баллонов с плавным падением давления в них.

В работе [9] проведены эксперименты по изучению взрывов баллонов с газообразным водородом при воздействии очага пожара. Выполнены два крупномасштабных опыта по определению таких характеристик процесса при разрыве баллона, как давление в ударной волне, тепловое излучение образующегося огненного шара и разлет фрагментов баллонов. Баллоны были изготовлены из композитных материалов, армированных алюминиевыми нитями, имели длину 1775 мм, внешний диаметр 370 мм и объем 165 л. Начальное давление газа 35 МПа, максимально допустимое давление 43,75 МПа. Баллоны были оборудованы тепловыми предохранительными клапанами, но эти клапаны не сработали. Через 9 мин 36 с после начала огневого воздействия баллон взорвался, давление газа в нем в этот момент составило 44 МПа. Максимальный диаметр образовавшегося огненного шара составил 7–8 м при длительности существования шара 1,5 с. Максимальный фрагмент имел массу 79 кг. Максимальный радиус разлета фрагментов составил 200 м. Для расчетной оценки максимального диаметра огненного шара и его времени существования использованы ранее опубликованные в литературе формулы, полученные для углеводородных горючих. При этом оказалось, что указанные формулы достаточно хорошо описывают экспериментальные данные. Расчетным путем определили радиусы поражения ударной волной и дальность разлета фрагментов. Оценили безопасные расстояния с точки зрения указанных опасных факторов (для различных степеней поражения): для УВ — 14–65 м; для теплового излучения огненного шара — 52–140 м; для разлета фрагментов — 148–365 м.

В [10] теоретически изучено влияние скорости тепловыделения при пожаре (HRR) на предел огнестойкости баллона со сжатым водородом (здесь и далее под пределом огнестойкости понимается промежуток времени от начала огневого воздей-

ствия до разрыва баллона). Международные требования к водородным автомобилям сформулированы в нормативном документе¹. Согласно ему, пожарный тест (реакция на пожар) является обязательным для водородных топливных резервуаров. Топливный резервуар должен в обязательном порядке быть оборудован тепловым предохранительным клапаном (TPRD). В литературе описан ряд экспериментов, в которых найдено, что предел огнестойкости водородных топливных резервуаров (FRR) находится в диапазоне от 6 до 16 мин в зависимости от интенсивности теплового воздействия, характеризуемого величиной HRR. Для водородных автомобилей значения скорости тепловыделения находятся в пределах от 2 (легковые автомобили) до 150 (грузовые автомобили) МВт.

В [10] описаны результаты численного моделирования процесса воздействия пламени на резервуар с целью изучения влияния скорости тепловыделения HRR на предел огнестойкости резервуара FRR, которые сравнивались с имеющимися в литературе экспериментальными данными. Изученные баллоны не имели теплового предохранительного клапана. Баллоны подвергались воздействию газовых факелов смеси метан – воздух и пропана. Опыты выполнены с двумя баллонами объемом 36 и 72,4 л с начальным давлением 70 и 35 МПа соответственно. Методика проведения опытов отвечала требованиям нормативного документа¹, при этом скорости тепловыделения составляли 79, 165 и 370 кВт. Найдено, что предел огнестойкости FRR существенно зависит от скорости тепловыделения HRR. Так, для баллона объемом 36 л величина FRR составила 21 мин 36 с при огневом воздействии с HRR = 165 кВт. Численное моделирование для баллона объемом 72,4 л дает для предела огнестойкости величину 6 мин 46 с при скорости тепловыделения 370 кВт, т.е. имеет место выполаживание кривой зависимости $FRR = f(HRR)$. Численное моделирование показало, что при величине HRR более 350 кВт значение предела огнестойкости перестает зависеть от скорости тепловыделения.

В [11] экспериментально изучены взрывы автомобильных водородных баллонов при воздействии очага пожара. Изучены баллоны из композитных материалов, армированных как металлической нитью из алюминия (тип 3), так и нитью из полимерных материалов (тип 4). Баллоны не имели предохранительных клапанов и были рассчитаны на давление 35 МПа. Сосуд типа 3 объемом 88 л и длиной 0,84 м был установлен на автомобиле.

¹ GTR#13. United Nations Economic Commission for Europe. Global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicle. Addendum 13: Global technical regulation No.13. Global Registry. UNECE, 2013.

Мощность пропановой горелки, пламя которой воздействовало на баллон, составляла 265 кВт. Начальное давление водорода в сосуде 31,8 МПа. Сосуд типа 4 имел длину 0,84 м, диаметр 0,41 м и объем 72,4 л. На сосуд воздействовало пламя пропановых горелок с мощностью 370 кВт.

В экспериментах с сосудом типа 3 через 20 с после начала пламенного воздействия появился черный дым, свидетельствующий о деградации оболочки. Давление газа слабо изменялось в течение 1 мин 24 с, далее вышел из строя датчик давления. Через 12 мин 18 с произошел разрыв сосуда.

В экспериментах с сосудом типа 4 через 45 с огневого воздействия появился упомянутый выше черный дым. В течение 6 мин температура газа внутри сосуда выросла с 27 до 39 °С, а давление с 34,5 до 35,7 МПа. Еще через 27 с произошел разрыв сосуда.

При взрыве сосуда типа 3 давление в УВ составило 140 кПа на расстоянии 1,2 м и 12 кПа на расстоянии 15 м. При взрыве сосуда типа 4 давление в УВ составило 300 кПа на расстоянии 1,9 м и 40 кПа на расстоянии 6,5 м. Диаметр образующихся в результате разрыва сосудов огненных шаров составил 7,7–24 м, длительность горения 4,5 с. Максимальная плотность теплового потока на расстоянии 15,2 м составила 210 и 300 кВт/м². Максимальная масса фрагмента сосуда была равна 14 кг, этот фрагмент был найден на расстоянии 82 м от места проведения эксперимента.

В работе [12] получены номограммы для оценки поражающего действия УВ при взрыве водородного баллона в очаге пожара. Представлено два вида номограмм:

- 1) учитывающие воздействие УВ на человека;
- 2) учитывающие воздействие УВ на здания и сооружения.

Дается ссылка на работу [13], где показано, что риск эксплуатации водородных автомобилей в Лондоне приемлем, если предел огнестойкости топливного бака не менее 45 мин, что значительно больше, чем у имеющихся автомобильных топливных баков. Полученные в работе [12] номограммы позволяют определить уровень поражения человека и окружающих объектов в зависимости от рабочего давления в баллоне и расстояния от места взрыва.

В работе [14] описан инцидент со взрывом автомобильного баллона с компримированным природным газом (по сути, аналог инцидента со взрывом водородного баллона) в США в 2016 г., при котором были повреждены 4 дома.

Взрыв водородного баллона в очаге пожара приводит к возникновению УВ, огненного шара и разлету фрагментов. При этом следует различать взрывы в открытом пространстве и под днищем

автомобиля. Во втором случае автомобиль может быть сдвинут на десятки метров [14].

Взрывы баллонов с водородом в очаге пожара изучались, как правило, при реализации инцидента в открытом пространстве. Исключением является работа [15], в которой теоретически рассмотрен случай взрыва автомобильного водородного баллона в тоннеле. Тоннель имел ширину 5,5 м для одностороннего и 9 м для двустороннего движения. Высота тоннеля в обоих случаях составляла 4,5 м. Объемы баллонов составляли 10, 30, 60 и 120 л. Найдено, что типичное значение давления в УВ на расстоянии 5–10 м от места взрыва составляет 100 кПа. Рассчитаны значения зон поражения опасными факторами таких аварий (УВ, тепловое излучение огненного шара, разлет фрагментов баллонов), которые могут достигать сотен метров. При этом безопасное расстояние составляет более 3000 м, т.е. взрыв водородного баллона в очаге пожара в случае тоннеля значительно опаснее, чем в случае открытого пространства.

В работе [16] описаны результаты экспериментов по изучению поведения водородных баллонов из композитных материалов в очаге пожара. Отмечено, что эти баллоны при нагреве ведут себя совершенно иначе, чем металлические, которые быстро передают тепло к хранящемуся газу с соответствующим ростом давления. В случае баллонов из композитных материалов рост давления вплоть до их разрушения в очаге пожара не превышает 10 % от начального давления.

В первой серии опытов измеряли тепловой поток, падающий на стенку баллона, используя в качестве имитатора металлический сосуд объемом 36 л, оснащенный 24 термопарами, при воздействии водородно-кислородного пламени. Найдено, что разница температур в различных точках по толщине стенки не превышала 70 °С при температуре внутренней поверхности стенки 650 °С. Исследовали влияние вида газа внутри баллона на его предел огнестойкости (заменяли водород на гелий и азот). Найдено, что вид газа не оказывает существенного влияния на предел огнестойкости баллона.

Во второй серии проведены опыты с баллонами из композитных материалов объемом 36 л при начальном давлении 70 МПа. Баллоны взрывались через 240 с, при этом повышение давления составляло всего 1,5 МПа. Таким образом, разрушение баллона происходит не из-за высокого давления, а из-за потери стенкой баллона механической прочности при воздействии пламени. Выполнены также опыты при начальном давлении 10, 25 и 52,5 МПа. Если при начальных давлениях 52,5 и 70 МПа происходил разрыв баллона, то при начальных давлениях 10 и 25 МПа возникала утечка газа из-за плавления полимерной составляющей композитного материала с образованием местной негерметичности.

Рассмотрено воздействие пламени на контейнер, содержащий 4 баллона объемом 150 л каждый при начальном давлении газа 70 МПа. Найдено, что при огневом воздействии баллоны не взрываются одновременно и безопасные расстояния можно определять как для одного баллона. С точки зрения допустимого давления в УВ при разрыве баллона 5 кПа безопасное расстояние составляет 34 м. Рекомендуется размещать баллоны в металлических ящиках, при этом баллон при начальном давлении 70 МПа выдерживает 13 мин огневого воздействия.

Возникает вопрос, как снизить опасность взрыва водородного баллона в очаге пожара. Одним из возможных способов является использование тепловых предохранительных клапанов. В работе [17] рассмотрено поведение емкостей для хранения водорода, оборудованных TPRD. Отмечено, что для хранения GH_2 наибольшее распространение получили баллоны из композитных материалов с алюминиевыми и полимерными нитями внутри стенок. Эти баллоны должны вмещать до 5 кг (легковые автомобили), 50 кг (грузовые автомобили), 100–200 кг (железнодорожные локомотивы) и быть рассчитаны на давление 35 или 70 МПа. Основное достоинство баллона из композитных материалов — низкий вес, основной недостаток — низкая огнестойкость. Для компенсации этого недостатка предложено использовать тепловые предохранительные клапаны в соответствии с нормативными документами^{1, 2}. Однако в этих документах не прописаны детальные требования к TPRD. Решению этой задачи посвящена работа [17]. Экспертная оценка дает для требуемой величины диаметра TPRD значение 5–6 мм, но эта величина не имеет под собой экспериментального обоснования. Длина водородного факела при диаметре 6 мм и давлении 87,5 МПа составляет 21 м. Это означает, что срабатывание TPRD в закрытых объемах (тоннели, автомобильные парковки, склады) может привести к созданию обширных зон загазованности. Цель работы [17] — найти нижнюю границу диаметра TPRD, при которой, с одной стороны, предотвращается разрыв баллона в очаге пожара и, с другой, исключается факел большого размера и недопустимо высокое давление для строительных конструкций при сгорании газа в струевом пламени.

Разработана математическая модель поведения баллона, оснащенного тепловым предохранительным клапаном, в очаге пожара. Модель верифицирована с помощью экспериментальных данных, полученных в Германии в институте Karlsruhe Institute of Technology на емкостях с гелием объемом 19 и 26 л

² United Nations Economic Commission for Europe. Addendum 133 – Regulation No.134. Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regards to the safety-related performance of hydrogen fueled vehicles (HFCV).

при начальном давлении 70 МПа. Найдено, что предел огнестойкости баллона FRR обратно пропорционален удельной скорости тепловыделения при пожаре пролива горючей жидкости HRR/A (A — площадь пожара). Для величины HRR/A 1–2 МВт/м², характерной для горения бензина или дизельного топлива, величина FRR составляет 4–6 мин.

Другой возможностью предотвращения взрыва баллона с водородом в очаге пожара является использование вспучивающихся огнезащитных покрытий вместе с тепловыми предохранительными клапанами. В работе [18] проведено математическое моделирование поведения водородного баллона из композитных материалов, снабженного TPRD и вспучивающимся огнезащитным покрытием, в очаге пожара. Найдено, что при диаметре TPRD 1 мм и толщине огнезащитного покрытия 10,0, 13,5 и 16,5 мм предел огнестойкости составляет 49, 70 и 91 мин.

Поведение резервуаров с жидким водородом в очаге пожара

Значительно меньшее количество исследований посвящено изучению поведения резервуаров с жидким водородом LH_2 в очаге пожара. Анализ возможности разрыва резервуара с LH_2 в очаге пожара выполнен в работе [19]. Отмечено, что жидкий водород хранят в двухболоочечных резервуарах с разными видами вакуумной теплоизоляции. При этом существенна глубина вакуума: при давлении 10^{-4} торр коэффициент теплопроводности газовой среды составляет 0,04 Вт/(м·К), а при давлении 100 торр — $30 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м·К). Одним из наиболее опасных сценариев развития аварии при воздействии на резервуар с LH_2 очага пожара является реализация эффекта BLEVE (взрыв паров вскипающей жидкости), который был экспериментально исследован компанией BMW в 1992–1995 гг. [20].

В работе [19] описан подход к оценке последствий аварий с возникновением BLEVE на резервуарах с жидким водородом. Описан механизм реализации BLEVE в перегретых жидкостях. Отмечены три основных опасных фактора таких аварий: УВ, тепловое излучение огненного шара и разлетающиеся фрагменты резервуара. Приведены аналитические соотношения для оценки величин упомянутых факторов. В частности, для длительности и интенсивности теплового излучения огненного шара использованы формулы, применявшиеся ранее для резервуаров с углеводородами. Для среднеповерхностной плотности теплового излучения при массе жидкого водорода в резервуаре более 1000 кг принята величина 350 кВт/м², сравнимая со случаем пропана [21] и меньшая, чем для природного газа (450 кВт/м² [22]). Проведены расчеты размеров зон поражения при возникновении BLEVE на резервуарах с LH_2 . При этом

наибольший размер зоны поражения оказался для теплового излучения огненного шара.

В работе [23] выполнены эксперименты по изучению воздействия пожара на резервуары с жидким водородом объемом 1 м³. Резервуары были двухоболочечными с заполнением жидким водородом на 35–40 % по объему (масса LН₂ 25–30 кг). Эксперименты выполнены на полигоне ВАМ на площадке диаметром 400 м с обетонированием в центре на площади 80 × 80 м. Испытали два горизонтальных резервуара, один из которых был с вакуумно-перлитовой теплоизоляцией, а другой — с многослойной теплоизоляцией, а также один вертикальный резервуар с вакуумно-перлитовой теплоизоляцией. Обе оболочки каждого резервуара были изготовлены из нержавеющей стали, внешняя имела толщину 3 мм из нержавеющей стали, а внутренняя — 4 мм (в верхней части 5 мм). Оболочки рассчитаны на давление 0,9 МПа. Давление воздуха в межоболочечном пространстве составляло 3 мбар. Термопары, прокладки фланцев, трубопроводы и арматура были защищены от воздействия пламени стекловатой.

Огневое воздействие на резервуар осуществляли с помощью 36 пропановых горелок, что обеспечивало плотность теплового потока на стенку 100–150 кВт/м². Пропан подавался из резервуара, отгороженного бетонной стеной от места расположения испытываемого резервуара. Расположение горелок обеспечивало равномерный обогрев стенок резервуара. Термопары располагались во внутренней оболочке в газовой и жидкой фазах, а также на поверхности внутренней и внешней оболочки в межоболочечном пространстве. Во внутренней оболочке и в межоболочечном пространстве располагались датчики давления. На экспериментальной площадке имелись датчики теплового потока для регистрации излучения от возможного огненного шара и датчики давления для регистрации УВ в двух направлениях для случая взрыва резервуара.

Горизонтальный резервуар с вакуумно-перлитовой теплоизоляцией не претерпел разрушения при длительности огневого воздействия 80 мин. Через 50 мин после начала огневого воздействия произошла разгерметизация наружной оболочки, через 75 мин разгерметизировался один из клапанов с образованием водородного факела. При этом давление во внутренней оболочке за 300 с упало с 2,35 до 1,0 МПа и до 0,1 МПа за 1000 с (момент окончания опыта).

При огневом воздействии на горизонтальный резервуар с многослойной теплоизоляцией сброс продукта через предохранительный клапан начался через 40 мин после начала воздействия. Образование факела не наблюдалось из-за сброса водорода по специальному трубопроводу на значительном расстоянии от пламени. После начала сброса продукта

давление в резервуаре стабилизировалось на уровне 5 МПа. Через 68 мин после начала огневого воздействия резервуар взорвался с образованием огненного шара, УВ и разлетом фрагментов. В момент взрыва температуры жидкой и паровой фаз продукта составили –245 и –180 °С соответственно (перед началом эксперимента эти величины составляли –253 и –250 °С соответственно). При этом в момент взрыва резервуара температура жидкой фазы была близка к предельной температуре перегрева. Давление в межоболочечном пространстве в этот момент составило 56 мбар (до начала огневого воздействия 0,3 мбар). Образовавшиеся при взрыве резервуара фрагменты разлетались на расстояние до 200 м, относительно крупные фрагменты — на расстоянии от 6 до 35 м. Давление в УВ на расстояниях 22,5 и 26,4 м составило 1,33 и 0,99 кПа. Максимальный диаметр огненного шара составил 20 м при длительности около 5 сек с временем подъема шара 2 с. Плотность теплового потока от огненного шара была равна 2,1 и 1,2 кВт/м² на расстояниях 70 и 90 м.

Огневое воздействие на вертикальный резервуар с вакуумно-перлитовой теплоизоляцией продолжалось в течение 4 ч и было прекращено из-за израсходования пропана. В этот момент давление в резервуаре составляло 6 МПа. При этом внешняя оболочка резервуара была разгерметизирована через короткое время после начала опыта.

В работе [24] путем численного моделирования изучены параметры УВ при разрушении резервуара с жидким водородом в очаге пожара. Описан инцидент с резервуаром для хранения LН₂ объемом 76 м³. В описанном инциденте произошло истечение продукта через сбросную свечу с образованием факела. Прибывшие к месту пожара пожарные попытались потушить факел путем подачи воды. За счет замерзания воды в отверстии сбросной трубы подача газа и горение прекратились, при этом перестал работать замерзший предохранительный клапан. В результате реализовался взрыв резервуара в режиме BLEVE. Со ссылкой на работу [20] описаны эксперименты компании BMW по изучению опасных факторов (УВ, тепловое излучение) при взрыве резервуаров с жидким водородом в очаге пожара. Объем резервуаров составлял 120 л. Давление газа в резервуаре непосредственно перед разрушением составляло от 0,2 до 1,5 МПа. Разрыв резервуара инициировали подрывом навески конденсированного взрывчатого вещества (ВВ). Получена трехпиковая структура волны давления при взрыве резервуара, которая в работе [24] объясняется следующим образом.

Первый пик вызван взрывом ВВ. Второй пик обусловлен выходом водорода в атмосферу и сгоранием образующейся водородовоздушной смеси в взрывном режиме. Третий пик вызван реализацией

эффекта BLEVE, т.е. взрывным вскипанием жидкого водорода при падении давления. Неожиданным оказался тот факт, что второй пик давления превышает третий в отличие от случая, когда в резервуаре хранятся углеводороды. Это обусловлено значительно более высокой скоростью сгорания водородовоздушных смесей по сравнению со случаем смесей углеводородных газов с воздухом.

Выводы

На основании проведенного анализа литературных данных могут быть сделаны следующие выводы.

1. Водород может храниться как в сжатом, так и в жидком виде. Сжатый водород, как правило, хранится в баллонах из композитных материалов, а сжиженный водород — в двухоболочечных изотермических резервуарах. В зависимости от этого поведение резервуаров с водородом в очаге пожара существенно различается.

2. При попадании в очаг пожара баллон из композитных материалов взрывается, как правило, через 5–15 мин после начала огневого воздействия. Исключения могут составлять огнезащищенные и имеющие тепловой предохранительный клапан достаточно большого проходного сечения (диаметр не менее 5–6 мм). Наличие огнезащитного покрытия

может увеличить время пребывания баллона в очаге пожара без взрыва до нескольких десятков минут.

3. Разрушение баллона из композитных материалов с сжатым водородом в очаге пожара происходит при давлениях газа, слабо отличающихся от рабочего давления (отличие, как правило, не более 10 %). Это обусловлено тем обстоятельством, что основной причиной разрушения баллона является не чрезмерное повышение давления газа в нем, а потеря полимерного связующего из его стенок. При этом предел огнестойкости баллона (время, в течение которого он сохраняет свою целостность) обратно пропорционально интенсивности теплового воздействия.

4. Предел огнестойкости двухоболочечного резервуара с жидким водородом может достигать нескольких десятков минут в зависимости от его конструкции (включая параметры тепловой изоляции) и интенсивности теплового воздействия.

5. При разрушении баллонов с сжатым водородом и резервуаров с жидким водородом образуются ударные волны, огненные шары и разлетающиеся фрагменты баллонов и резервуаров. Размеры зон поражения могут достигать нескольких десятков метров в зависимости от параметров баллонов и резервуаров. При этом наибольший размер зоны поражения наблюдается в случае образования огненного шара.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Byoungjik Park, Yangkyun Kim.* Reenacting the hydrogen tank explosion of a fuel-cell electric vehicle: An experimental study // *International Journal of Hydrogen Energy.* 2023. Vol. 48. Pp. 34987–35003.
2. *Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н.* Пожаровзрывобезопасность объектов водородной энергетики // *Безопасность труда в промышленности.* 2022. № 2. С. 7–12. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-7-12
3. *Шебеко Ю.Н.* Нормативные документы, регламентирующие вопросы пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // *Пожарная безопасность.* 2020. № 4. С. 36–42.
4. *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
5. *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
6. *Шебеко Ю.Н., Болодьян И.А.* Международный опыт обеспечения пожарной безопасности водородных автозаправочных станций // *Вести газовой науки. Научно-технический сборник.* 2022. № 2 (51). С. 151–157.
7. *Шебеко Ю.Н.* Пожарная безопасность хранения и транспортировки водорода // *Пожарная безопасность.* 2023. № 1. С. 17–26. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.001
8. *Halm D., Fouillen F., Lain E., Gueguen M., Bertheau D., Eckelen T.* Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: Fire tests and simulation // *International Journal of Hydrogen Energy.* 2017. Vol. 42. Pp. 20056–20076. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.088
9. *Chuanchuan Shen, Li Ma, Gai Huang, Yingzhe Wu, Jinyang Zheng, Yan Liu et al.* Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2018. Vol. 55. Pp. 223–231. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.06.016
10. *Kashkarov S., Makarov D., Molkov V.* Effect of a heat release rate on reproducibility of the test for hydrogen storage cylinder // *International Journal of Hydrogen Energy.* 2018. Vol. 43. No. 21. Pp. 10185–10192. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.047
11. *Zalosh R.* Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure // *Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards.* Edinburgh, 2008. Pp. 149–158.

12. *Kashkarov S., Li Z., Molkov V.* Blast wave from a hydrogen tank rupture in the open: Hazard distances nomograms // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Pp. 2429–2446. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.084
13. *Dadashzadeh M., Kashkarov S., Makarov D., Molkov V.* Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. Pp. 6462–6475. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.195
14. *Molkov V., Kashkarov S.* Blast wave from a high pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under vehicle hydrogen tanks // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40. No. 36. Pp. 12581–12603. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.001
15. *Molkov V., Dery W.* The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Pp. 31289–31302. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.062
16. *Blanc-Vannet P., Jallais S., Fuster B., Fouillen F., Halm D.* Fire tests carried out in FGH JU Firecomp project, recommendations and application to safety of gas storage systems // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Pp. 9100–9109.
17. *Molkov V., Dadashzadeh M., Kashkarov S., Makarov D.* Performance of hydrogen storage tank with TPRD in an engulfing fire // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. Pp. 36581–36587. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.128
18. *Kim Y., Makarov D., Kashkarov S., Joseph P., Molkov V.* Modeling heat transfer in an intumescent paint and its effect on fire resistance of on-board hydrogen storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. No. 11. Pp. 7297–7303.
19. *Ustolin F., Paltrinieri N., Landucci G.* An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 68. P. 104323. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104323
20. *Pehr K.* Aspects of safety and acceptance of LH₂ tank systems in passengers cars // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1996. Vol. 21. Pp. 387–395.
21. *Roberts A.F.* Thermal radiation hazards from released LPG from pressurized storage // *Fire Safety Journal*. 1982. Vol. 4. Pp. 197–212. DOI: 10.1016/0379-7112(81)90018-7
22. *Betteridge S., Phillips L.* Large scale pressurized LNG BLEVE experiments. Symposium series no. 160. Hazards 25. Shell. 2015. 12 p.
23. *Wingerden K., Kluge M., Habib A.K., Ustolin F., Paltrinieri N.* Medium-scale tests to investigate the possibility and effects of BLEVEs of storage vessels containing liquefied hydrogen // *Chemical Engineering Transactions*. 2022. Vol. 90. Pp. 547–552. DOI: 10.3303/CET2290092
24. *Cirrone D., Makarov D., Molkov V.* Rethinking “BLEVE explosion” after liquid hydrogen storage tank rupture in a fire // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. Pp. 8716–8730. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.114

REFERENCES

1. Byoungjik Park, Yangkyun Kim. Reenacting the hydrogen tank explosion of a fuel-cell electric vehicle: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48:34987-35003.
2. Gordienko D.M., Shebeko Yu.N. Fire and explosion safety of objects of hydrogen energetics. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 2:7-12. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-7-12 (rus).
3. Shebeko Yu.N. Normative documents on fire safety of hydrogen energetics infrastructure. *Fire Safety*. 2020; 4:36-42 (rus).
4. Gordienko D.M., Shebeko Yu.N. Fire safety of objects of hydrogen transport infrastructure. *Pozharovzrивobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):41-51. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.41-51 (rus).
5. Shebeko Yu.N. Fire safety of hydrogen refueling stations. *Pozharovzrивobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):42-50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50 (rus).
6. Shebeko Yu.N., Bolodian I.A. An international experience of fire safety provision of hydrogen refueling stations. *News of gas science. Scientific and Technical Book*. 2022; 2(51):151-157. (rus).
7. Shebeko Yu.N. Fire safety of storage and transportation of hydrogen. *Fire Safety*. 2023; 1:17-26. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.001 (rus).
8. Halm D., Fouillen F., Lain E., Gueguen M., Bertheau D., Eckelen T. Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: Fire tests and simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42:20056-20076. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.088
9. Chuanchuan Shen, Li Ma, Gai Huang, Yingzhe Wu, Jinyang Zheng, Yan Liu et al. Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 55:223-231. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.06.016

10. Kashkarov S., Makarov D., Molkov V. Effect of a heat release rate on reproducibility of the test for hydrogen storage cylinder. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43(21):10185-10192. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.047
11. Zalosh R. Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure. *Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Edinburgh, 2008; 149-158.
12. Kashkarov S., Li Z., Molkov V. Blast wave from a hydrogen tank rupture in the open: Hazard distances nomograms. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:2429-2446. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.084
13. Dadashzadeh M., Kashkarov S., Makarov D., Molkov V. Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018; 43:6462-6475. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.195
14. Molkov V., Kashkarov S. Blast wave from a high pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under vehicle hydrogen tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015; 40(36):12581-12603. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.001
15. Molkov V., Dery W. The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:31289-31302. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.062
16. Blanc-Vannet P., Jallais S., Fuster B., Fouillen F., Halm D. Fire tests carried out in FGH JU Firecomp project, recommendations and application to safety of gas storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44:9100-9109.
17. Molkov V., Dadashzadeh M., Kashkarov S., Makarov D. Performance of hydrogen storage tank with TPRD in an engulfing fire. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46:36581-36587. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.128
18. Kim Y., Makarov D., Kashkarov S., Joseph P., Molkov V. Modeling heat transfer in an intumescent paint and its effect on fire resistance of on-board hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42(11):7297-7303.
19. Ustolin F., Paltrinieri N., Landucci G. An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68:104323. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104323
20. Pehr K. Aspects of safety and acceptance of LH₂ tank systems in passengers cars. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1996; 21:387-395.
21. Roberts A.F. Thermal radiation hazards from released LPG from pressurized storage. *Fire Safety Journal*. 1982; 4:197-212. DOI: 10.1016/0379-7112(81)90018-7
22. Betteridge S., Phillips L. Large scale pressurized LNG BLEVE experiments. *Symposium series no. 160. Hazards 25. Shell*. 2015; 12.
23. Wingerden K., Kluge M., Habib A.K., Ustolin F., Paltrinieri N. Medium-scale tests to investigate the possibility and effects of BLEVEs of storage vessels containing liquefied hydrogen. *Chemical Engineering Transactions*. 2022; 90:547-552. DOI: 10.3303/CET2290092
24. Cirrone D., Makarov D., Molkov V. Rethinking “BLEVE explosion” after liquid hydrogen storage tank rupture in a fire. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48:8716-8730. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.114

*Поступила 10.01.2024, после доработки 19.02.2024;
принята к публикации 04.03.2024*

*Received January 10, 2024; Received in revised form February 19, 2024;
Accepted March 4, 2024*

Информация об авторе

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 AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Information about the authors

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 AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547, e-mail: yn_shebeko@mail.ru