

## Пожарная безопасность водородных автозаправочных станций

© Ю.Н. Шебеко ✉

Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России  
(Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проблема загрязнения атмосферы парниковыми газами, образующимися в основном при эксплуатации автомобилей на углеводородном топливе, делает актуальной необходимость использования водорода в качестве альтернативного моторного топлива. Пути решения этой проблемы изложены в ряде работ зарубежных исследователей. Настоящая статья посвящена анализу указанных работ в части обеспечения пожаровзрывобезопасности автозаправочных станций (АЗС) на газообразном и жидком водороде (водородные АЗС).

**Особенности хранения водорода.** Одной из основных проблем функционирования водородных АЗС является хранение моторного топлива. Отмечены наиболее перспективные способы хранения водорода (в газообразном и жидком виде, адсорбированном виде, в составе гидридов металлов).

**АЗС с хранением сжатого водорода.** Рассмотрены особенности пожаровзрывобезопасности АЗС, на которых водород хранится в сжатом виде и поставляется предприятиями по его производству. При этом, как правило, применяются передвижные топливозаправщики, оснащенные резервуарами со сжатым газом.

**АЗС с использованием жидкого водорода.** Проанализированы аспекты обеспечения пожарной безопасности АЗС, на которые водород поставляется и хранится в жидком виде с дальнейшей регазификацией и заправкой автомобилей сжатым газом.

**АЗС с получением водорода непосредственно на станции.** Одним из способов снабжения водородной АЗС топливом является его получение непосредственно на станции путем дегидрогенизации метилциклогексана, который поставляется автомобильными цистернами. Полученный водород компримируется и хранится в сжатом виде в баллонах, из которых идет заправка автомобилей. Проанализированы особенности пожарной опасности таких станций.

**Основные положения NFPA 2 в части водородных АЗС.** Рассмотрены требования международного стандарта NFPA 2 Hydrogen Technologies Code. 2016 Edition для АЗС на сжатом и сжиженном водороде.

**Выводы.** На основании проведенного анализа сделан вывод, что в ряде стран активно ведутся работы по созданию водородных АЗС. Показано, что при выполнении необходимых защитных мероприятий водородные АЗС могут быть столь же безопасными, как и станции на углеводородном топливе. Сделан вывод о необходимости разработки отечественного нормативного документа, содержащего требования пожарной безопасности к водородным АЗС и использующего наработанный международный опыт.

**Ключевые слова:** водородная безопасность; способы хранения водорода; сжатый водород; сжиженный водород; получение водорода на АЗС

**Для цитирования:** 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

✉ Шебеко Юрий Николаевич, e-mail: yn\_shebeko@mail.ru

## Fire safety of hydrogen filling stations

© Yuriy N. Shebeko ✉

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia  
(VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

### ABSTRACT

**Introduction.** The problem of greenhouse gas emissions from hydrocarbon-powered vehicles, polluting the air, makes consumption of hydrogen as an alternative motor fuel particularly relevant. Solutions to this problem are provided in a number of works written by foreign researchers. This article contains the analysis of these works in respect of fire and explosion safety assurance at gaseous and liquid hydrogen filling stations (hydrogen filling stations).

**Features of hydrogen storage.** Motor fuel storage is a main problem of hydrogen filling stations and their operation. Most advanced hydrogen storage methods (applicable to gaseous, liquid and adsorbed hydrogen, as well as metal hydrides that contain hydrogen) are analyzed in the work.

**Compressed hydrogen filling stations.** Fire and explosion safety features of filling stations, where compressed hydrogen is stored, are considered by the author. As a rule, mobile fuel trucks, equipped with compressed gas tanks, are used there.

**Liquid hydrogen filling stations.** Fire safety aspects of filling stations, where liquid hydrogen is stored, regasification is performed, and vehicles are filled with compressed gas, are also analyzed.

**Hydrogen formation at filling stations.** One of the ways to supply fuel to a hydrogen filling station is to produce it on site using dehydrogenation of methylcyclohexane, which is delivered in tank trucks. Hydrogen is compressed and stored in cylinders. Fire hazards arising at such stations are analyzed.

**Main provisions of NFPA 2 in terms of hydrogen filling stations.** The requirements of the international standard NFPA 2 Hydrogen Technologies Code. 2016 Edition, that apply to compressed and liquefied hydrogen filling stations, are considered.

**Conclusions.** The author has made a conclusion that hydrogen filling stations are intensively built in several countries. It has been proven that if necessary protective measures are taken, hydrogen filling stations can be as safe as those using hydrocarbon fuel. It is necessary to develop a domestic regulatory document containing fire safety requirements applicable to hydrogen filling stations with account taken of the international experience.

**Keywords:** hydrogen safety; hydrogen storage methods; compressed hydrogen; liquefied hydrogen; hydrogen generation at filling stations

**For citation:** Shebeko Yu.N. Fire safety of hydrogen filling stations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):42-50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50 (rus.).

✉ Yury Nikolaevich Shebeko, e-mail: yn\_shebeko@mail.ru

## Введение

В настоящее время в развитых странах мира ведутся работы по интеграции в экономику водородной энергетики, что во многом связано с решением проблемы загрязнения атмосферы парниковыми газами, являющимися результатом применения углеводородного топлива. Научная основа водородной энергетики была заложена в работах отечественных [1–4] и зарубежных [5–8] авторов. В этих работах рассмотрены аспекты пожаровзрывобезопасности объектов с использованием газообразного ( $\text{GH}_2$ ) и жидкого ( $\text{LH}_2$ ) водорода.

Известно, что основным источником поступающих в атмосферу парниковых газов являются автомобили, работающие на углеводородном топливе. В связи с этим перевод автомобилей на водородное топливо помог бы решить указанную экологическую проблему. К сожалению, в нашей стране не уделяется достаточного внимания задаче перехода транспорта на водородное топливо. Поэтому настоящая работа посвящена анализу работ зарубежных исследователей, посвященных вопросу обеспечения пожаровзрывобезопасности автозаправочных станций (АЗС), осуществляющих заправку автомобилей газообразным и жидким водородом (водородные АЗС).

## Особенности хранения водорода

Одной из основных проблем функционирования водородных АЗС является осуществление хранения моторного топлива. Возможные способы хранения водорода рассмотрены в работах [7, 8].

Методы хранения водорода подразделяются на три группы:

- физические — в газообразном и жидком виде;

- в адсорбированном виде;
- путем химического связывания с образованием соединений, разлагающихся с выделением водорода.

Хранение газообразного водорода осуществляется в баллонах под давлением до 70 МПа, а также в подземных полостях, расположенных в соляных пластах.

В случае жидкого водорода существенны проблемы сжижения газа и снижения скорости его испарения при хранении. Для этого обычно используют двухоболочечный резервуар с вакуумной теплоизоляцией. Возможно применение твердого теплоизоляционного материала. При этом скорость испарения составляет около 0,1 % в сутки. Испарившийся газ может подвергаться сжижению и направляться обратно в резервуар хранения.

Водород может храниться в адсорбированном виде на поверхности твердого пористого материала. При этом необходимо создать давление 1,0...10,0 МПа. Адсорбировать можно также и жидкий водород.

Возможно хранение водорода в химически связанном виде (например, в составе гидридов металлов или других соединений). Выделение водорода из гидридов достигается одним из двух путей: нагреванием или реакцией с водой (гидролизом). Наиболее эффективны такие гидриды, как  $\text{NaBH}_4$ ,  $\text{MgH}_2$ ,  $\text{AlH}_3$ ,  $\text{LiBH}_4$ .

Авторы [7, 8] констатируют, что наименьшая плотность хранящегося водорода реализуется в случае газообразного водорода, а наибольшая — при хранении  $\text{H}_2$  в жидком виде. Наиболее экономичны способы хранения в сжатом, сжиженном и адсорбированном виде, так как при этом не требуется много энергии для получения газообразного  $\text{H}_2$ , исполь-

зуемого для работы автомобильных двигателей. В случае использования гидридов металлов для получения газообразного водорода необходим нагрев до температуры 100...300 °С в зависимости от вида гидрида.

### АЗС с использованием сжатого водорода

В настоящем разделе будут рассмотрены особенности обеспечения пожарной безопасности АЗС, на которых водород присутствует в сжатом виде и куда поставляется с предприятий по его производству. При этом, как правило, применяются передвижные хранилища сжатого водорода.

В работе [9] рассмотрена типичная АЗС с передвижным хранилищем  $H_2$  в баллонах с давлением до 18 МПа, осуществляющая заправку автомобилей в городах. Станция предназначена для одновременной заправки до десяти легковых автомобилей и до двух автобусов. Размеры станции в плане 100 × 65 м. Газ из передвижного хранилища подается в компрессор, сжимающий его до давления 70 МПа, а затем в топливный бак заправляемого автомобиля. АЗС включает в себя передвижное хранилище, компрессор, распределительные трубопроводы, топливораздаточные колонки (ТРК) и пульт управления. Выполнен расчет риска для указанного объекта. Потенциальный риск вблизи ТРК превышает  $10^{-3}$  год<sup>-1</sup>, а на расстоянии 400 м от АЗС —  $10^{-4}$  год<sup>-1</sup>. Величина социального риска с числом жертв не более 100 превышает  $10^{-4}$  год<sup>-1</sup>. Авторы делают вывод о недопустимости столь высокого риска и необходимости его снижения как минимум в 10 раз за счет дополнительных защитных мероприятий (например, оснащения станции датчиками дозврывоопасных концентраций, применения систем аварийного отключения, противопожарных экранов и т.п.).

В работе [10] проведено экспериментальное исследование модельного пожара на АЗС со сжатым водородом. Изучен выброс струи  $H_2$  в загроможденное пространство, имитирующее расположение объектов на реальной станции, с образованием и сгоранием водородовоздушной смеси в указанном пространстве. В экспериментах загромождение моделировало два резервуара хранения водорода, заправляемый автомобиль и ограждающий экран между ТРК и резервуарами хранения. Модель резервуара хранения имела размеры 0,6 × 0,9 × 2,1 м. Модель автомобиля размером 3,8 × 1,7 × 1,3 м была размещена на высоте 0,3 м от поверхности земли. Модель АЗС помещали в прозрачную пластиковую оболочку размерами 5,4 × 6,0 × 2,5 м, в которую подавали водород.

Проведено два типа экспериментов:

а) с предварительно перемешанной водородовоздушной смесью, зажигаемой искровым источником с энергией 50 МДж в различных местах (между моделями резервуаров хранения, между моделями резервуаров хранения и моделью автомобиля, под моделью автомобиля);

б) с зажиганием струи  $H_2$ , истекающей из отверстия диаметром 8 мм под давлением 40 МПа при различных интервалах задержки зажигания.

Измеренные давления взрыва составляли: вблизи модели автомобиля — 31,7...136,6 кПа, на расстоянии 30 м — 3,2...6,3 кПа, на расстоянии 100 м — 0,3...0,8 кПа. Полученные результаты говорят о возможности реализации давлений взрыва, опасных для расположенных вблизи АЗС зданий и сооружений.

В работе [11] проведена расчетная оценка безопасных расстояний от АЗС на сжатом водороде до соседних объектов. Рассмотрен случай, когда давление в топливном резервуаре автомобиля составляло 35 и 70 МПа. Найдено, что определенные в работе безопасные расстояния сравнимы с аналогичными величинами для АЗС на жидком моторном топливе и компримированном природном газом, в то время как для станции с наличием сжиженного углеводородного газа (СУГ) безопасные расстояния существенно выше. Сделан вывод о возможности размещения ТРК с водородом на АЗС с жидким моторным топливом.

Как отмечено в работе [12], АЗС на сжатом водороде с передвижным хранилищем топлива могут быть столь же безопасными, как станции с жидким моторным топливом, и при этом иметь более низкую стоимость.

Анализ риска для водородной АЗС с передвижным блоком хранения топлива, размещенной в условиях плотной городской застройки, выполнен в работе [13]. Риск оценен как для персонала объекта, так и для людей на окружающих станцию объектах. Показано, что риск от указанной АЗС более, чем на порядок, ниже установленных критериев. Наибольший вклад в величину риска вносит нагнетательный компрессор, обеспечивающий необходимое для заправки автомобилей давление водорода. Утечки из резервуаров хранения значительно менее вероятны, но приводят к более тяжелым последствиям. Риск, связанный с перемещением передвижного блока хранения водорода по улицам города, может быть снижен до допустимого уровня путем организационно-технических мероприятий (например, перемещения блока хранения в ночное время, когда улицы города практически пусты).

В работе [14] описан передвижной блок хранения водорода с баллонами из композитных материалов.

Ранее для хранения водорода использовали стальные баллоны, рассчитанные на давление 19,6 МПа. Предложено использовать баллоны из композитных материалов с рабочим давлением 35 и 45 МПа. В статье описаны конструкции указанных передвижных блоков хранения водорода.

Возможность применения баллонов из композитных материалов, которые рассматриваются в качестве наиболее удобного способа хранения водорода под высоким давлением как в случае резервуаров АЗС, так и в случае топливных баков автомобилей, рассмотрена также в работе [15]. Эти баллоны ведут себя при нагреве совершенно иначе, чем стальные баллоны, которые быстро нагреваются и передают тепло хранящемуся газу с соответствующим ростом давления. В случае баллонов из композитных материалов рост давления при тепловом воздействии не превышает 10 % от первоначальной величины. В работе экспериментально изучено воздействие имитатора полного охвата пламенем поверхности баллона, предполагая факельное горение менее опасным.

В работе [16] проанализирована проблема определения безопасных расстояний для водородной АЗС на сжатом газе. Одним из способов определения безопасных расстояний является рассмотрение максимальной проектной аварии. При этом используются различные критерии поражения людей и окружающих объектов (например, предельно допустимая плотность теплового потока 1,6 кВт/м<sup>2</sup> при длительном воздействии на человека, 4,7 кВт/м<sup>2</sup> — при воздействии в течение 20 с, 25 кВт/м<sup>2</sup> — при длительном воздействии на соседние здания и сооружения). Альтернативным является подход, основанный на построении полей потенциального риска. В качестве примера рассмотрена водородная АЗС, предназначенная для ежедневной заправки 100 автомобилей с топливными резервуарами, рассчитанными на давление до 70 МПа. Блок хранения водорода содержал 51 баллон емкостью 250 л каждый. Найдено, что опасные расстояния составляют:

- 33 м — для смертельного поражения людей тепловым излучением;
- 25 м — для смертельного поражения при возникновении пожара-вспышки.

Взрыв водородовоздушной смеси не рассматривался, так как вклад от него в силу малой загроможденности территории станции значительно меньше, чем от других упомянутых опасных сценариев аварии.

### **АЗС с использованием жидкого водорода**

Переходя к рассмотрению пожарной опасности АЗС с использованием жидкого водорода, следует

отметить, что в этом случае речь идет только о доставке топлива на станцию (в том числе и многотопливную). При этом не предусматривается загрузка жидкого водорода непосредственно в топливный бак автомобиля, а только регазификация жидкого водорода с дальнейшим его компримированием для подачи в топливный бак автомобиля.

В работе [17] теоретически изучено воздействие пожара пролива бензина диаметром 3 м на многотопливной АЗС на резервуар хранения жидкого водорода. Длительность горения составила 30 мин. Исследователи варьировали расстояние от границ пролива бензина до резервуара хранения жидкого водорода в диапазоне от 3,5 до 14 м. При этом температура внешней оболочки двухстенного резервуара хранения жидкого водорода, обращенной в сторону пожара пролива, находилась в диапазоне от 300 до 800 °С. Сделан вывод о том, что минимально допустимое расстояние от границ пожара пролива до резервуара хранения жидкого водорода составляет 14 м, в то время как, согласно японским нормативным документам, это расстояние равно 3,9 м, а по европейским нормативным документам — 8 м.

В работе [18] выполнены расчеты риска для АЗС с жидким водородом, оценены последствия аварий оборудования, содержащего жидкий водород. Авторы работы получили данные качественного анализа риска (матрицу риска) и предложили мероприятия по его снижению. В качестве примера рассмотрена станция с 10-ю заправляемыми автомобилями в час. Жидкий водород хранится в двухоболочечном резервуаре. Технологические трубопроводы (включая заправочные рукава) являются двухстенными. Поставлена цель, чтобы АЗС с наличием жидкого водорода были столь же безопасными, как станции на жидком моторном топливе. Рассматриваемая АЗС имеет следующие параметры:

- емкость хранения жидкого водорода имеет объем 17 м<sup>3</sup> с рабочим давлением 0,35 МПа;
- на станции имеется две ТРК;
- скорость заправки автомобиля — 380 л/ч;
- емкость топливного бака автомобиля составляет 38 л.

Рассмотрен 131 сценарий аварии. В качестве опасных проявлений аварии учитывали взрыв газового облака и факельное горение. Найдено, что при истечении жидкого водорода из отверстия диаметром 1 мм с образованием газового облака и его сгоранием давление взрыва на границе АЗС не превышает 30 кПа. При факельном горении длина факела составляет 10 м при диаметре истечения 14 мм, 1,7 м — при диаметре истечения 1 мм. При диаметре истечения 0,2 мм факел не образуется. Предложены необходимые защитные мероприятия, среди кото-



рых основными являются применение противопожарных экранов высотой 2 м, прокладка подземных технологических трубопроводов в специальных каналах, размещение технологического оборудования на едином фундаменте для защиты от землетрясений и подвижек грунта, контроль давления в межстенном пространстве резервуара, используемого для хранения жидкого водорода.

Одна из основных опасностей, связанных с применением жидкого водорода (в том числе на АЗС), — образование факела при истечении топлива. В работе [19] экспериментально изучены параметры теплового излучения от факельного горения струи жидкого водорода. Найдено, что плотность теплового потока от факела при истечении жидкого водорода из отверстия диаметром 1 мм на расстоянии 1,8 м от оси факела составляет 9 кВт/м<sup>2</sup>. В данном случае важным отличием от факела углеводородного топлива является низкая доля теплоты сгорания, переходящей в излучение (около 0,06).

### **АЗС с получением водорода непосредственно на станции**

Одним из способов снабжения водородной АЗС топливом является его получение непосредственно на станции путем разложения метилциклогексана [20–22]. Согласно [20], технологический процесс на такой станции реализуется следующим образом. На станцию в автоцистернах доставляется метилциклогексан и сливается в подземный резервуар для хранения. Далее метилциклогексан поступает в реактор дегидрогенизации, где в результате теплового разложения продукта получают водород. При этом побочным продуктом является толуол, который сливается в подземный резервуар, откуда он увозится автоцистернами для последующего использования в химической промышленности. Выделившийся водород компримируется и подается на очистку, после которой он опять компримируется до рабочего давления 82 МПа и направляется в резервуары для хранения с дальнейшей подачей на ТРК. Резервуары для хранения сжатого водорода выгорожены противопожарными экранами. Предусматриваются следующие меры безопасности:

- защита ТРК от наезда автомобилей;
- противопожарные экраны;
- датчики дозврывоопасных концентраций;
- спринклерная система водяного орошения технологического оборудования;
- система аварийного сброса давления;
- первичные средства пожаротушения;
- автоматическая установка пожарной сигнализации.

В работе [21] проанализированы последствия аварий на АЗС рассматриваемого типа, связанных

с утечкой газообразного водорода, а также с проливом метилциклогексана и толуола. Оценены параметры ударной волны при взрыве водородовоздушных смесей, теплового излучения от факела газообразного водорода и пожаров пролива метилциклогексана и толуола, поражения токсичными парами указанных жидкостей. Найдено, что опасные факторы взрыва и токсического поражения распространяются за пределы АЗС, но их вклад в опасность объекта сравнительно невелик. В то же время воздействие факела хотя и локализовано в пределах территории станции, но представляет более высокую опасность. Аналогичные выводы сделаны в работе [22].

### **Основные положения NFPA 2 в части водородных АЗС**

Одним из основных международных нормативных документов, регламентирующих безопасность объектов водородной энергетики, является стандарт NFPA 2 Hydrogen Technologies Code. 2016 Edition. Рассмотрим основные положения этого стандарта, посвященные автозаправочным станциям на сжатом и сжиженном водороде.

Основные требования к АЗС на сжатом водороде заключаются в следующем. Система защиты от недопустимого давления (более 1,2 от рабочего давления) не должна содержать разрывные мембраны. Технологические трубопроводы должны быть стальными, при этом допускаются только сварные соединения. Гибкие трубопроводы могут быть использованы только для заправочных рукавов, которые должны быть снабжены обратными клапанами, автоматически перекрывающими указанные рукава при их повреждении. Заправочная площадка должна быть оборудована датчиками дозврывоопасных концентраций системы газового анализа и автоматической пожарной сигнализацией. При срабатывании датчиков указанных систем в автоматическом режиме должна быть прекращена заправка автомобиля, которая может быть возобновлена только ручным способом. При потере электроснабжения аварийная запорная арматура должна срабатывать автоматически. Заправочная площадка должна быть оснащена не менее, чем двумя огнетушителями, расположенными на расстоянии не более 15 м от нее. Регламентированы минимально допустимые расстояния для разработки генеральных планов АЗС и их размещения относительно соседних зданий и сооружений. При соблюдении ряда дополнительных требований допускается расположение топливозаправочных пунктов в помещениях.

АЗС на жидком водороде должны отвечать приведенным выше требованиям для станций на сжатом газе, а также ряду дополнительных требований. Технологическое оборудование (за исключением

ТРК и заправочных рукавов) должно быть отделено от прочих зданий и сооружений противопожарными экранами. Аварийные сбросные клапаны должны осуществлять сброс продукта через сбросную трубу. Заправка автомобилей в помещениях не допускается.

Сформулированы требования к технологическому оборудованию и его обслуживанию. Технологическое оборудование должно размещаться на открытых площадках, на которых допускается использование навесов из негорючих материалов для защиты от неблагоприятных погодных условий. Заправочная площадка должна иметь бетонное покрытие, применение асфальта не допускается. Возможно использование передвижных АЗС.

### Выводы

В настоящей работе проведен анализ работ зарубежных исследователей в области обеспечения пожаровзрывобезопасности автозаправочных станций, осуществляющих заправку автомобилей водородом как моторным топливом. Рассмотрены различные способы хранения водорода (в газообразном и жидком виде, адсорбированном виде, в составе гидридов металлов или иных соединений). Проанализированы особенности пожаровзрывоопасности АЗС с использованием газообразного и жидкого водорода, включая необходимые мероприятия по обеспечению их безопасности. Особо отмечены водородные АЗС, на которых водород получают непосредственно на станции путем дегидрогенизации метилциклогексана. Проанализированы основные

положения международного стандарта NFPA 2, относящиеся к автозаправочным станциям с наличием сжатого и сжиженного водорода.

На основании проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы. В ряде стран (Япония, Южная Корея, Китай) активно ведутся работы по созданию водородных АЗС, являющихся экологически более безопасными по сравнению со станциями на углеводородном топливе (как газообразном, так и жидком). Выполнены достаточно многочисленные научные исследования в области обеспечения пожаровзрывобезопасности водородных АЗС. Показано, что при выполнении необходимых защитных мероприятий водородные АЗС могут быть столь же безопасными, как станции на углеводородном топливе. Создан международный стандарт NFPA 2, регламентирующий требования безопасности к объектам водородной энергетики, в том числе и к водородным АЗС.

Аналогичный российский документ отсутствует. Совокупность упомянутых работ может быть положена в основу создания отечественного нормативного документа, регламентирующего требования пожаровзрывобезопасности к водородным АЗС. При этом необходимы также нормативные документы, содержащие требования пожарной безопасности как к автомобилям на водородном топливе, так и к соответствующим объектам инфраструктуры (стоянки автомобилей на водороде, предприятия по обслуживанию автомобилей на водороде, правила пожарной безопасности при их эксплуатации и т.п.).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Макеев В.И.* Безопасность объектов с использованием жидких криогенных продуктов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1992. Т. 1. № 3. С. 34–45.
2. *Болодьян И.А., Кестенбойм Х.С., Махвиладзе Г.М., Макеев В.И., Федотов А.П., Чугуев А.П.* Взрывопожароопасность низкотемпературных облаков водорода в атмосфере // Горение гетерогенных и газовых систем : мат. IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. Черногловка : АН СССР, Отделение Института химической физики, 1989. С. 15–17.
3. *Карпов В.Л.* Пожаробезопасность регламентных и аварийных выбросов горючих газов. Часть 1. Предельные условия устойчивого горения и тушения диффузионных факелов в неподвижной атмосфере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 1998. Т. 7. № 3. С. 36–43.
4. *Шебеко Ю.Н., Келлер В.Д., Еременко О.Я., Смолин И.М.* Закономерности образования и горения локальных водородовоздушных смесей в большом объеме // Химическая промышленность. 1988. № 12. С. 728–731.
5. *Dadashzadeh M., Makarov D., Molkov V.* Modeling of hydrogen tank fuelling // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Vol. 2. Saint Petersburg : Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2019. Pp. 1396–1407. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-20
6. *Gökalp I.* A holistic approach to promote the safe development of hydrogen as an energy vector // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Vol. 2. Saint Petersburg : Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2019. Pp. 1387–1395. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-127

7. *Andersson J., Grönkvist S.* Large-scale storage of hydrogen // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Issue 23. Pp. 11901–11919. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063
8. *Abe J.O., Popoola A.P.I., Ajenifuja E., Popoola O.* Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Issue 29. Pp. 15072–15086. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.068
9. *Gye H.-R., Seo S.-K., Bach Q.-V., Ha D., Lee C.-J.* Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Issue 2. Pp. 1288–1298. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.035
10. *Shirvill L.C., Roberts T.A., Royle M., Willoughby D.B., Gautier T.* Safety studies on high-pressure hydrogen vehicle refuelling stations: Releases into a simulated high-pressure dispensing area // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. Issue 8. Pp. 6949–6964. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.01.030
11. *Matthijssen A.J.C.M., Kooi E.S.* Safety distances for hydrogen filling stations // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2006. Vol. 19. Issue 6. Pp. 719–723. DOI: 10.1016/j.jlp.2006.05.006
12. *Reddi K., Elgowainy A., Sutherland E.* Hydrogen refueling station compression and storage optimization with tube-trailer deliveries // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. Issue 33. Pp. 19169–19181. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.09.099
13. *Sun K., Pan X., Li Z., Ma J.* Risk analysis on mobile hydrogen refueling stations in Shanghai // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. Issue 35. Pp. 20411–20419. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.07.098
14. *Azuma M., Oimatsu K., Oyama S., Kamiya S., Igashira K., Takemura T. et al.* Safety design of compressed hydrogen trailers with composite cylinders // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. Issue 35. Pp. 20420–20425. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.147
15. *Blanc-Vannet P., Jallais S., Fuster B., Fouillen F., Halm D., van Eekelen T. et al.* Fire tests carried out in FCH JU Firecomp project, recommendations and application to safety of gas storage systems // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Issue 17. Pp. 9100–9109. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.070
16. *LaChance J.* Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34. Issue 14. Pp. 5838–5845. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.070
17. *Sakamoto J., Nakayama J., Nakarai T., Kasai N., Shibutani T., Miyake A.* Effect of gasoline pool fire on liquid hydrogen storage tank in hybrid hydrogen-gasoline fueling station // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41. Issue 3. Pp. 2096–2104. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.039
18. *Kikukawa S., Mitsuhashi H., Miyake A.* Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34. Issue 2. Pp. 1135–1141. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.10.093
19. *Friedrich A., Breitung W., Stern G., Veser A., Kuznetsov M., Fast G. et al.* Ignition and heat radiation of cryogenic hydrogen jets // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. Issue 22. Pp. 17589–17598. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.070
20. *Nakayama J., Kasai N., Shibutani T., Miyake A.* Security risk analysis of a hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system involving methylcyclohexane // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Issue 17. Pp. 9110–9119. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.177
21. *Tsunemi K., Yoshida K., Yoshida M., Kato E., Kawamoto A., Kihara T. et al.* Estimation of consequence and damage caused by an organic hydride hydrogen refueling station // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. Issue 41. Pp. 26175–26182. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.082
22. *Nakayama J., Sakamoto J., Kasai N., Shibutani T., Miyake A.* Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on a hybrid gasoline-hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system using organic chemical hydride // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41. Issue 18. Pp. 7518–7525. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.143

## REFERENCES

1. Makeev V.I. Safety of objects with an application of liquid cryogenic products. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1992; 1(3):34-45. (rus.).
2. Bolodyan I.A., Kestenboym H.S., Makhviladze G.M., Makeev V.I., Fedotov A.P., Chuguev A.P. Fire and explosion hazard of low-temperature clouds of hydrogen in the atmosphere. *Combustion of Heterogeneous and Gaseous Systems : Proceedings of the IX All-Union Symposium on Combustion and Explosion*. Chernogolovka, Academy of Sciences of the USSR, Department of the Institute of Chemical Physics, 1989; 15-17. (rus.).
3. Karpov V.L. Fire safety of regulatory and emergency emissions of combustible gases. Part 1. Limiting conditions for stable combustion and extinguishing of diffusion flares in a stationary atmosphere. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1998; 7(3):36-43. (rus.).
4. Shebeko Yu.N., Keller V.D., Eremenko O.Ya., Smolin I.M. Regularities of the formation and combustion of local hydrogen-air mixtures in large volumes. *Chemical Industry*. 1988; 12:728-731. (rus.).
5. Dadashzadeh M., Makarov D., Molkov V. Modeling of Hydrogen Tank Fuelling. *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Vol. 2. Saint Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2019; 1396-1407. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-20
6. Gökalp I. A Holistic Approach to Promote the Safe Development of Hydrogen As an Energy Vector. *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. Vol. 2. Saint Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2019; 1387-1395. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-127
7. Andersson J., Grönkvist S. Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(23):11901-11919. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063
8. Abe J.O., Popoola A.P.I., Ajenifuja E., Popoola O.M. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(29):15072-15086. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.068
9. Gye H.-R., Seo S.-K., Bach Q.-V., Ha D., Lee C.-J. Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(2):1288-1298. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.035
10. Shirvill L.C., Roberts T.A., Royle M., Willoughby D.B., Gautier T. Safety studies on high-pressure hydrogen vehicle refuelling stations: Releases into a simulated high-pressure dispensing area. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012; 37(8):6949-6964. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.01.030
11. Matthijsen A.J.C.M., Kooi E.S. Safety distances for hydrogen filling stations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2006; 19(6):719-723. DOI: 10.1016/j.jlp.2006.05.006
12. Reddi K., Elgowainy A., Sutherland E. Hydrogen refueling station compression and storage optimization with tube-trailer deliveries. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014; 39(33):19169-19181. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.09.099
13. Sun K., Pan X., Li Z., Ma J. Risk analysis on mobile hydrogen refueling stations in Shanghai. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014; 39(35):20411-20419. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.07.098
14. Azuma M., Oimatsu K., Oyama S., Kamiya S., Igashira K., Takemura T. et al. Safety design of compressed hydrogen trailers with composite cylinders. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014; 39(35):20420-20425. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.147
15. Blanc-Vannet P., Jallais S., Fuster B., Fouillen F., Halm D., van Eekelen T. et al. Fire tests carried out in FCH JU Firecomp project, recommendations and application to safety of gas storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(17):9100-9109. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.070
16. LaChance J. Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009; 34(14):5838-5845. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.070
17. Sakamoto J., Nakayama J., Nakarai T., Kasai N., Shibutani T., Miyake A. Effect of gasoline pool fire on liquid hydrogen storage tank in hybrid hydrogen-gasoline fueling station. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016; 41(3):2096-2104. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.039
18. Kikukawa S., Mitsunashi H., Miyake A. Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009; 34(2):1135-1141. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.10.093
19. Friedrich A., Breitung W., Stern G., Veser A., Kuznetsov M., Fast G. et al. Ignition and heat radiation of cryogenic hydrogen jets. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012; 37(22):17589-17598. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.070



20. Nakayama J., Kasai N., Shibutani T., Miyake A. Security risk analysis of a hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system involving methylcyclohexane. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(17):9110-9119. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.177
21. Tsunemi K., Yoshida K., Yoshida M., Kato E., Kawamoto A., Kihara T. et al. Estimation of consequence and damage caused by an organic hydride hydrogen refueling station. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42(41):26175-26182. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.082
22. Nakayama J., Sakamoto J., Kasai N., Shibutani T., Miyake A. Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on a hybrid gasoline-hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system using organic chemical hydride. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016; 41(18):7518-7525. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.143

Поступила 03.06.2020, после доработки 09.07.2020;

принята к публикации 15.07.2020

Received June 3, 2020; Received in revised form July 9, 2020;

Accepted July 15, 2020

### Информация об авторе

**ШЕБЕКО Юрий Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация; РИНЦ ID: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn\_shebeko@mail.ru

### Information about the author

**Yury N. SHEBEKO**, Doctor Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ID RISC: 47042; Scopus Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547; e-mail: yn\_shebeko@mail.ru