https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.05.5-12
УДК 641.841.12

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

Нормативное регулирование пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики

© **Ю.Н. Шебеко** ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены российские и международные нормативные документы, отражающие специфические требования к объектам инфраструктуры водородной энергетики, к числу которых следует отнести объекты получения газообразного (GH_2) и сжиженного (LH_2) водорода, хранилища водорода (газообразного, сжиженного и в виде гидридов металлов), автозаправочные станции с использованием GH_2 и LH_2 в качестве моторного топлива, энергетические установки с применением водорода, предприятия по обслуживанию автомобилей на водородном моторном топливе.
Российские нормативные правовые и нормативные документы. Выявлено, что в настоящее время в Российской Федерации отсутствуют нормативные правовые документы, регламентирующие достаточные требования к перечисленным выше объектам водородной энергетики, а существующие нормативные документы в указанной области весьма немногочисленны.
Стандарт NFPA 2. Среди международных нормативных документов, в первую очередь, следует отметить стандарт NFPA 2, детально регламентирующий требования пожарной безопасности для объектов инфраструктуры водородной энергетики. Однако далеко не все его положения могут быть использованы в Российской Федерации без соответствующей адаптации.
Выводы. На основе проведенного анализа представляется целесообразной следующая иерархия нормативных правовых и нормативных документов по безопасности объектов водородной энергетики. Во главе этой иерархии должен стоять нормативный правовой акт (федеральный закон или постановление Правительства), который формулирует общие требования к объектам водородной энергетики. Далее должна следовать серия нормативных документов добровольного применения (стандарты и своды правил). Указанные нормативные документы должны содержать требования к технологическому оборудованию, зданиям и сооружениям объектов водородной энергетики. Отдельно следует рассмотреть требования к эксплуатации рассматриваемых объектов. При этом необходимо отметить, что предлагаемые к разработке документы должны учитывать лучшую мировую практику (в частности, рассмотренный в настоящей работе стандарт NFPA 2).

Ключевые слова: объекты энергетики; газообразный водород; жидкий водород; нормативные правовые акты; стандарт, свод правил; стандарт NFPA 2

Для цитирования: *Шебеко Ю.Н.* Нормативное регулирование пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 5. С. 5–12. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.5-12

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

Normative regulation of fire safety of infrastructural objects of hydrogen energetics

© **Yury N. Shebeko** ✉

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

ABSTRACT

Introduction. Now many countries produce measures for a transfer of their economics to an application of a hydrogen energetics. Because of a high fire hazard of hydrogen a fire safety provision of infrastructural objects of the hydrogen energetics is a very important task. The infrastructural objects of the hydrogen energetics are the facilities aimed on a production and storage of hydrogen, transportation of gaseous (GH_2) and liquid (LH_2) hydrogen, an application of hydrogen for an energy generation, car refueling stations etc. Scientific basis for a creation of the fire safety normative documents was laid in studies of Russian and foreign investigators.
Russian normative documents. Russian normative documents in the area considered are analyzed in this work. A draft of the Technical Regulation on a safety of the facilities aimed on production, storage, transportation and application of hydrogen is the most important among them. This document contains a lot of specific require-

ments which should be used independently of a type of the hydrogen facility. Therefore this document can be considered as extremely "rigid" for a practical applications. A set of rules SP 162.1330610.2014 is aimed on the regulation of the safety requirements for the facilities using liquid hydrogen. The document PB 03-598-03 considers the safety requirements for a production of hydrogen by an electrolysis of water. A conclusion was made that Russian normative basis is not sufficient for a development of the hydrogen energetics.
Standard NFPA 2. The standard NFPA 2 can be considered as a most important normative document containing the safety requirements for the facilities for production, storage, transportation and application of hydrogen in a gaseous and a liquid phase. This standard contains both general and specific requirements for the infrastructural objects such as car refueling stations, storages of hydrogen in the gaseous and the liquid phase and also using metal hydrides, hydrogen production facilities, energy generation objects using hydrogen, technological equipment containing hydrogen, laboratory facilities, car parks for the cars using hydrogen as a fuel etc.
Conclusions. It was found that there is no comprehensive set of the normative documents regulating fire safety of infrastructural objects of hydrogen energetics. The series of the Russian normative documents in this area which should be created was proposed. A conclusion was made that the requirements of NFPA 2 can be used at a creation of the Russian normative basis of the hydrogen energetics.

Keywords: power engineering objects; gaseous hydrogen; liquid hydrogen; normative juridical acts; standards; set of rules; standard NFPA 2

For citation: Shebeko Yu.N. Normative regulation of fire safety of infrastructural objects of hydrogen energetics. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 2020; 29(5):5-12. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.5-12 (rus.).

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

Введение

В настоящее время в развитых странах мира ведутся работы по переводу экономики на использование водородной энергетики. Эта отрасль энергетики включает в себя объекты получения и хранения водорода, его транспортировку, использование в энергетических установках и в качестве моторного топлива для автомобилей и железнодорожных локомотивов и т.п. Научная основа водородной энергетики была заложена в работах отечественных (см., например, [1–4]) и зарубежных (см., например, [5–13]) ученых. Рассмотрены аспекты пожаровзрывоопасности газообразного (GH_2) и сжиженного (LH_2) водорода, в том числе требования к объектам инфраструктуры водородной энергетики. Однако для практической реализации упомянутых достижений необходима разработка соответствующей нормативной базы, которая в нашей стране развита недостаточно по сравнению с развитыми странами.

В связи с вышесказанным, целью настоящей работы является анализ требований пожарной безопасности к объектам инфраструктуры водородной энергетики, содержащимся в отечественных и зарубежных нормативных документах. При этом в качестве наиболее полного зарубежного нормативного документа рассмотрен стандарт NFPA 2 [14]. Российская нормативная база содержит относительно небольшое количество нормативных документов федерального уровня, регламентирующих специфические требования пожарной безопасности к объектам водородной энергетики [15, 16]. В то же время к указанным объектам в той или иной степени применимы нормативные документы общего характера (стандарты, своды правил).

Российские нормативные правовые и нормативные документы

В первую очередь, представляет интерес рассмотреть проект Федерального закона № 496165-4 «Технический регламент по безопасности устройств и систем, предназначенных для производства, хранения, транспортировки и использования водорода» (далее по тексту — Проект ФЗ), непосредственно относящегося к объектам с наличием водорода. Указанный документ устанавливает минимально необходимые требования безопасности, учитывающие специфику водорода. В указанном документе рассмотрены следующие вопросы:

1) требования по безопасному размещению водородных устройств и систем в зданиях и на открытых площадках;

2) общие требования безопасности для водородных устройств и систем (в том числе требования к конструктивному исполнению);

3) требования по безопасности систем с наличием жидкого водорода;

4) требования к безопасности электролизеров;

5) требования по безопасности устройств и систем компримирования водорода;

6) требования по безопасности газгольдеров для хранения водорода и водородсодержащих газов;

7) требования по безопасности систем наполнения и опорожнения баллонов с водородом;

8) требования по безопасности электрохимических генераторов водорода;

9) требования по безопасности бортовых систем хранения водорода на транспортных средствах;

10) требования по безопасности трубопроводов и арматуры водородных систем;

11) требования к устройствам безопасности водородных систем;

12) требования к системам контроля и управления;

13) требования к монтажу водородных устройств и систем;

14) требования к эксплуатации водородных устройств и систем;

15) требования к маркировке водородных устройств и систем;

16) подтверждение соответствия водородных устройств и систем обязательным требованиям.

В приложениях к проекту закона приведены данные по минимальным расстояниям от водородных систем до окружающих объектов (включая системы сжиженного водорода).

Наличие в Проекте ФЗ большого количества конкретных величин различных параметров (например, расстояний) может вызвать затруднения при проектировании, так как ранг этого документа (Федеральный закон) не допускает каких-либо отступлений от него. В этом плане представляется более логичным изложить соответствующие требования в своде правил, который, согласно Федеральному закону № 184-ФЗ «О техническом регулировании» [17], является документом добровольного применения, т.е. допускает отступление от указанных требований с учетом положений ст. 6 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [18].

В своде правил СП 162.1330610.2014 «Требования безопасности при производстве, хранении, транспортировании и использовании жидкого водорода» [15] изложены требования безопасности при производстве, хранении, транспортировании и использовании жидкого водорода. Данный свод правил распространяется на проектирование, строительство, монтаж, прием в эксплуатацию, расширение, реконструкцию, техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию:

- производств, цехов, отделений и опытно-промышленных установок получения жидкого водорода;
- базисных и расходных хранилищ жидкого водорода;
- станций наполнения жидкого водорода и сливо-наливных устройств;
- испытательных комплексов, лабораторий и отдельных сооружений, где происходят испытания изделий, узлов и агрегатов, связанных с применением жидкого и газообразного водорода под давлением до 42 МПа;
- заправочных комплексов ракетно-космической техники;
- средств транспортирования.

Свод правил [15] уточняет и дополняет имеющиеся нормативные документы по отдельным специальным вопросам, которые состоят в следующем:

1) основные физические, химические, биологические свойства водорода (включая некоторые показатели пожарной опасности);

2) классификация установок жидкого водорода;

3) классификация хранилищ жидкого водорода;

4) требования к площадкам (станциям) наполнения и сливо-наливным (приемным) устройствам жидкого водорода;

5) классификация водородных испытательных комплексов изделий ракетно-космической техники;

6) состав водородных заправочных комплексов наземной космической инфраструктуры стартовых и испытательных комплексов;

7) классификация объектов и сооружений по степени пожаро- и взрывоопасности;

8) требования к генеральным планам объектов с наличием сжиженного водорода;

9) требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям зданий и сооружений;

10) требования к инженерным системам (вентиляция, отопление, водоснабжение, канализация и т.п.);

11) требования к вспомогательным зданиям и сооружениям;

12) требования к электрооборудованию;

13) требования к проектированию и монтажу технологического оборудования;

14) общие требования к аппаратам и предохранительным устройствам при производстве водорода;

15) требования к резервуарам и цистернам для жидкого водорода;

16) требования к системам и оборудованию испытательных комплексов;

17) требования к космическим заправочным комплексам;

18) требования пожарной безопасности к объектам с наличием сжиженного водорода;

19) требования к газоспасательной службе;

20) требования к охране труда и охране окружающей среды.

В своде правил [15] содержатся приложения, регламентирующие методику расчета безопасных расстояний при сооружении хранилищ жидкого водорода и стендовых комплексов, требования к конструкционным материалам, требования к газгольдерам низкого давления переменного объема, рекомендации по защите от статического электричества, требования пожарной безопасности к инфраструктуре обеспечения жидким водородом аэродромных комплексов.

Свод правил [15] достаточно подробно описывает требования безопасности к объектам с на-

личием жидкого водорода, однако в ряде случаев нормирует такие параметры, как категории помещений и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (что является предметом расчета в соответствии со сводом правил СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» [19]), защиту от статического электричества и т.п., что регламентируется имеющимися нормативными документами (т.е. имеются элементы дублирования). Используются устаревшие обозначения классов взрывоопасных зон. СП 162.1330610.2014 [15] в основном направлен на обеспечение безопасности объектов ракетно-космической отрасли и в недостаточной степени рассматривает объекты другого назначения.

Вопросы безопасности при производстве водорода методом электролиза воды регламентированы в нормативном документе ПБ 03-598-03 «Правила безопасности при производстве водорода методом электролиза воды» [16]. Данный документ устанавливает требования к взрывопожароопасным объектам, направленные на предупреждение аварий, случаев производственного травматизма на объектах, связанных с получением, обращением, применением и хранением электролитического водорода и кислорода.

Проектирование объектов, связанных с указанными выше процессами, должно проводиться с разделением технологической схемы на отдельные технологические блоки, обеспечивающие их минимальный уровень взрывоопасности. При разработке мероприятий по предотвращению взрывов и пожаров на рассматриваемых объектах должны учитываться нормативные требования пожарной безопасности. Нормативный документ [16] рассматривает следующие вопросы:

- требования к территории производства электролитического водорода;
- требования к зданиям, сооружениям и помещениям производства водорода;
- отопление, вентиляция и кондиционирование;
- водоснабжение и канализация;
- освещение;
- общие требования к безопасному ведению процессов;
- требования к расположению оборудования и рабочих мест;
- технологическое оборудование электролизных установок;
- предохранительные устройства и технологические выбросы;
- приготовление электролита;
- очистка и осушка газов;
- газгольдеры для водорода;
- компримирование водорода;
- наполнение и опорожнение баллонов с водородом;
- снабжение потребителей электролитическим водородом;
- требования к трубопроводам и арматуре;
- газоанализаторные участки;
- экспресс-лаборатории;
- требования к электротехническим устройствам;
- автоматизированные системы управления и средства противоаварийной защиты (ПАЗ);
- требования к эксплуатации производственных помещений.

Приложения к документу [16] содержат справочный материал, касающийся взрывопожарной и пожарной опасности, основных физико-химических свойств сырья и готовой продукции, терминов и определений и т.п. Кроме того, приложения включают в себя сведения о допустимых расстояниях между производственными зданиями и сооружениями.

Рассматривая документ [16] в целом, необходимо отметить, что он содержит довольно широкий круг требований, применимых, однако, только к объектам, связанным с производством электролитического водорода. Кроме того, представляется необходимым разделить требования к оборудованию, зданиям и сооружениям и требования к эксплуатации объектов и изложить их в разных документах, как это сделано в документах по пожарной безопасности (требования пожарной безопасности к эксплуатации объектов изложены в Правилах противопожарного режима в Российской Федерации [20], а требования пожарной безопасности к оборудованию, зданиям и сооружениям — в стандартах и сводах правил). Это связано с тем, что указанные требования имеют разную степень обязательности: имеются как нормативные правовые документы, подлежащие обязательному исполнению (например, [20]), так и документы добровольного применения (например, стандарты и своды правил).

Стандарт NFPA 2

Целью стандарта NFPA 2 [14] является изложение требований пожарной безопасности при получении, хранении, транспортировке и использовании водорода в газообразном и сжиженном виде. Рассмотрены как стационарные, так и мобильные системы, включая объекты инфраструктуры автомобильного транспорта. Требования стандарта [14] являются дополнительными к требованиям других нормативных документов, т.е. специфическими для объектов водородной энергетики. В случае несоответствия требований стандарта [14] и требований других нормативных документов следует использовать требования стандарта [14].

В первых частях стандарта излагаются общие требования безопасности к зданиям, сооружениям и технологическому оборудованию объектов инфраструктуры водородной энергетики. Эти требования должны гарантировать требуемый уровень безопасности людей, включая членов оперативных пожарных подразделений. Технологические процессы должны проводиться безопасным способом, обеспечивающим контроль и ликвидацию опасных факторов пожара и снижающим риск поражения персонала и населения, проживающего вблизи опасного объекта. В стандарте [14] используется концепция единичной проектной аварии и единичного пожара. Применительно к объектам допускается использование как «жесткого» (prescriptive codes), так и «гибкого» (performance based codes) нормирования.

На объекте разрешено применение, как правило, негорючих строительных и конструкционных материалов. В исключительных случаях допускаются горючие материалы с удельной теплотой сгорания не более 8141 кДж/кг. Заметная часть документа посвящена вопросам применения «гибкого» нормирования при проектировании объектов водородной энергетики. Квалификация персонала, применяющего подходы «гибкого» нормирования, должна быть признана надзорными органами. Надзорный орган может при необходимости направить проект, выполненный с применением «гибкого» нормирования, на независимую экспертизу.

В проекте, выполненном с применением «гибкого» нормирования, должны содержаться критерии допустимости проектных решений, описаны использованные сценарии аварий и пожаров, а также примененные методы расчета и модели процессов, протекающих при авариях и пожарах. Указанный проект, одобренный надзорным органом, должен быть представлен в подразделение пожарной охраны для составления плана пожаротушения. В проекте должны быть предусмотрены меры по защите персонала объекта от опасных факторов пожара, а также меры по обеспечению действий оперативных пожарных подразделений. Сформулированы требования к выбору сценариев проектных аварий и пожаров, которые должны быть приняты во внимание при проектировании. Документация, представляемая в надзорный орган, должна содержать:

- описание объекта, включая данные о наличии и размещении людей на объекте и вблизи него;
- критерии безопасности;
- сценарии проектных аварий и пожаров;
- исходные данные для моделирования;
- выходные данные, в том числе оценку их чувствительности к неопределенностям исходных данных, и применяемые коэффициенты безопасности;
- применяемые требования нормативных документов;
- описание использованных моделей с результатами их апробации;
- выводы по результатам моделирования.

Помещения с наличием резервуаров со сжиженным и газообразным водородом должны быть оборудованы спринклерными системами водяного орошения при объеме сжиженного водорода более 170 л и газообразного водорода более 112 м^3, а также вытяжной вентиляцией вне зависимости от объема хранения. Повышенная надежность электроснабжения должна быть предусмотрена для вентиляции, приборов контроля температуры, систем оповещения об аварии или пожаре, системы обнаружения пожара и газа. Для технологических систем со сжиженным водородом следует применять приборы обнаружения утечек жидкого продукта, дренажные системы, запасные резервуары, поддоны и обвалования. Выбросы из предохранительных клапанов должны направляться через сбросные трубы непосредственно наружу. Сброс из трубы должен осуществляться на высоте не менее 3 м от поверхности земли, 0,6 м над технологическим оборудованием и 1,5 м над покрытием зданий и сооружений вдали от мест массового пребывания людей, потенциальных источников зажигания, забора воздуха приточной вентиляции и проемов зданий. Удельная (на 1 м^2 пола) производительность вентиляции должна быть не менее 0,0051 м^3/(с·м^2).

В стандарте [14] сформулированы специфические требования для объектов с наличием сжиженного водорода. При размещении резервуаров со сжиженным водородом следует руководствоваться следующими требованиями:

- резервуары должны располагаться на расстоянии не менее 6,1 м от мест размещения других горючих веществ и материалов и на расстоянии не менее 7,6 м от невзрывозащищенного электрооборудования и иных потенциальных источников зажигания;
- резервуары должны располагаться на расстоянии не менее 15 м от мест забора воздуха системами приточной вентиляции и хранилищ других горючих газов;
- резервуары должны быть защищены от механических повреждений.

Помещения, где размещены резервуары со сжиженным водородом, должны быть отделены противопожарными преградами с пределом огнестойкости не менее 2 ч. Резервуары со сжиженным водородом не допускается размещать внутри обвалований хранилищ других жидких горючих веществ.

Необходимо предусматривать дренажные системы для предотвращения скопления пролитого продукта под резервуарами для его хранения. Опоры под резервуарами хранения сжиженного водорода высотой более 457 мм должны иметь предел огнестойкости не менее 2 ч. Резервуары хранения LH_2 должны быть двухоболочечными с вакуумной теплоизоляцией, причем внешняя оболочка должна быть рассчитана на давление не ниже 207 кПа. Резервуары объемом более 7570 л должны быть оборудованы дистанционно управляемой запорной арматурой. Подземные трубопроводы для транспортировки LH_2 должны иметь вакуумную теплоизоляцию. В стандарте [14] представлены детальные требования к размещению резервуаров для хранения сжиженного водорода на открытых площадках.

Кроме изложенных выше общих требований, стандарт [14] содержит специфические требования к отдельным объектам инфраструктуры водородной энергетики, таким, как автозаправочные станции для GH_2 и LH_2, хранилища водорода с использованием гидридов металлов, объекты получения водорода, энергетические установки с применением водорода в качестве топлива, технологическое оборудование с водородным охлаждением, лабораторное оборудование, автомобильные парковки для автомобилей с использованием водородного моторного топлива, предприятия по обслуживанию упомянутых выше автомобилей.

В приложениях к стандарту [14] приведены данные по физическим и пожароопасным свойствам водорода, требования по охране труда на предприятиях инфраструктуры водородной энергетики, методы определения допустимых расстояний между резервуарами хранения водорода, особенности систем обнаружения утечек водорода и т.п.

Выводы

На основании проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы. В настоящее время в Российской Федерации отсутствуют нормативные правовые акты, в достаточной степени регламентирующие безопасность объектов водородной энергетики. Имеющийся Проект ФЗ содержит необоснованно детальный перечень требований, от которых при проектировании в силу обязательности нормативного правового акта отступать нельзя, хотя такие отступления, как показала практика, неизбежно потребуются при проектировании конкретных объектов. Поэтому нормативный правовой акт, будь то Федеральный закон или постановление Правительства, должен иметь более общий вид. Все детальные требования при этом должны быть изложены в документах добровольного применения (стандартах и сводах правил). Имеющиеся же нормативные документы [15, 16] хотя и содержат ряд полезных требований, тем не менее относятся к достаточно специфическим случаям применения жидкого водорода и производству водорода методом электролиза воды.

В связи с вышеизложенным, представляется целесообразной следующая иерархия нормативных правовых и нормативных документов по безопасности объектов водородной энергетики. Во главе этой иерархии должен стоять нормативный правовой акт (Федеральный закон или постановление Правительства), который формулирует общие требования к объектам водородной энергетики. Далее должна следовать серия нормативных документов добровольного применения (стандарты и своды правил). Указанные нормативные документы должны содержать требования к технологическому оборудованию, зданиям и сооружениям объектов водородной энергетики. Отдельно следует рассмотреть требования к эксплуатации рассматриваемых объектов. Подобно документу [20], это может быть постановление Правительства. При этом необходимо отметить, что предлагаемые к разработке документы должны учитывать лучшую мировую практику (в частности, рассмотренный в настоящей работе стандарт NFPA 2 [14]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Макеев В.И.* Безопасность объектов с использованием криогенных продуктов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safey. 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. 9-го Всесоюз. симп. по горению и взрыву. 12–24 нояб. 1989 г., Суздаль. Черноголовка : ОИХФ, 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 Safey. 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.* Modelling of hydrogen tank fuelling // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Vol. 2: 21–26 April 2019, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg, 2019. Pp. 1396–1407. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-20
6. *Gocalp I.* A holistic approach to promote the safe development of hydrogen as energy vector // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Vol. 2: 21–26 April 2019, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg, 2019. Pp. 1387–1395. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-127
7. *Andersen J., Gronkvist S.* Large-scale storage of hydrogen // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. No. 23. Pp. 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 recommendations // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. No. 29. Pp. 15072–15086. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.068
9. *Gue 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. No. 2. Pp. 1288–1298. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.035
10. *Brennan S., Hussein H.G., Makarov D., Shentsov V., Molkov V.* Pressure effects of an ignited release from onboard storage in a garage with a single vent // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. V. 44. No. 17. P. 8927–8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.130
11. *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. No. 3. Pp. 2096–2104. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.039
12. *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. No. 17. Pp. 9110–9119. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.177
13. *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. No. 25. Pp. 20420–20425. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.147
14. NFPA 2. Hydrogen Technologies Code. 2016 Edition. Quincy : NFPA, 2016.
15. СП 162.1330610.2014. Требования безопасности при производстве, хранении, транспортировании и использовании жидкого водорода. URL: http: www.docs.cntd.ru/document/1200124842 (дата обращения 27.08.2020).
16. ПБ 03-598-03. Правила безопасности при производстве водорода методом электролиза воды : утв. Приказом Ростехнадзора от 06.06.2003 № 75. URL: http://www.docs.cntd.ru/document/901865925 (дата обращения 27.08.2020).
17. О техническом регулировании : Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ. URL: http://docs.cntd.ru/document/901836556 (дата обращения 27.08.2020).
18. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». М. : ВНИИПО, 2015. 148 с.
19. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности // Пожарная безопасность. 2011. № 1. С. 18–38.
20. Правила противопожарного режима в Российской Федерации : утв. Постановлением Правительства от 25.04.2012 № 390 // Пожарная безопасность. 2012. № 3. С. 5–53.

REFERENCES

1. Makeev V.I. Safety of objects using liquid cryogenic products. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 1992; 1(3):34-45. (rus.).
2. Bolodian I.A., Kestenboym H.S., Makhviladze G.M., Makeev V.I., Fedotov A.P., Chuguev A.P. Fire and explosion safety of low temperature clouds of hydrogen in the atmosphere. *Combustion of Heterogenic and Gaseous Systems : Proceedings of the IX All Union Symposium on Combustion and Explosion*. Chernogolovka, OIHF, 1989; 15-17. (rus.).
3. Karpov V.L. Fire and explosion safety of order and accidental releases of flammable gases. Part 1. Limiting conditions of stable burning and extinguishing of jet flames in still atmosphere. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety.* 1998; 7(3):36-43. (rus.).
4. Shebeko Yu.N., Keller V.D., Eremenko O.Ya., Smolin I.M. Peculiarities of formation and combustion of local hydrogen-air mixtures in a large volume. *Khimicheskaya Promyshlennost — Chemical Industry*, 1988; 12:728-731. (rus.).

5. Dadashzadeh M., Makarov D., Molkov V. Modelling of hydrogen tank fuelling. *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Vol. 2: 21-26 April 2019, Saint Petersburg, Russia*. Saint Petersburg, 2019; 1396-1407. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-20
6. Gocalp I. A holistic approach to promote the safe development of hydrogen as energy vector. *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Vol. 2: 21-26 April 2019, Saint Petersburg, Russia*. Saint Petersburg, 2019; 1387-1395. DOI: 10.18720/SPBPU/2/k19-127
7. Andersen J., Gronkvist 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 recommendations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(29):15072-15086. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.068
9. Gue 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. Brennan S., Hussein H.G., Makarov D., Shentsov V., Molkov V. Pressure effects of an ignited release from onboard storage in a garage with a single vent. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(17):8927-8934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.130
11. 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
12. 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
13. 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(25):20420-20425. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.147
14. NFPA 2. Hydrogen Technologies Code. 2016 Edition. Quincy : NFPA, 2016.
15. SP 162.1330610.2014. *Safety requirements at production, storage, transportation and application of liquid hydrogen*. URL: http: www.docs.cntd.ru/document/1200124842 (Accessed 27.08.2020) (rus.).
16. PB 03-598-03. *Safety rules at production of hydrogen using the method of a water electrolysis*. Stated by Order of Rostekhnadzor of Russia from 6.06.2020 No. 75. URL: http://www.docs.cntd.ru/document/901865925 (Accessed 27.08.2020) (rus.).
17. Federal Law from 27.12.2002 No. 184-FZ “On a technical regulation”. URL: http://docs.cntd.ru/document/901836556 (Accessed 27.08.2020) (rus.).
18. Federal Law from 22.07.2008 No. 123-FZ “*Technical regulation on fire safety requirements*”. Moscow, VNIIPO publ., 2015; 148. (rus.).
19. SP 12.131.2009. Determination categories of rooms, buildings and external facilities on fire and explosion hazard. *Fire Safety.* 2011; 1:18-38. (rus.).
20. Fire safety rules in Russian Federation. Statement of Government from 25.04.2012 No. 390. *Fire Safety.* 2012; 3:5-53. (rus.).

Поступила 12.08.2020, после доработки 27.08.2020;
принята к публикации 08.09.2020
Received August 12, 2020; Received in revised form August 27, 2020;
Accepted September 8, 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