

Пожарная безопасность заправочной инфраструктуры транспорта на водородном топливе

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 необходимости проведения исследований в области пожарной безопасности заправочной инфраструктуры железнодорожного, водного и воздушного транспорта, использующего водород в качестве топлива. Актуальность статьи обусловлена происходящим во всем мире расширением работ по переводу различных видов транспорта на водородное топливо. Целью работы является аналитический обзор исследований в области пожарной безопасности объектов, предназначенных для заправки указанных видов транспорта водородным топливом. При этом основной задачей является выявление пробелов в тематике и результатах уже проведенных исследований и разработка предложений по дальнейшим работам.

Анализ исследований в области пожарной безопасности заправочных станций для транспорта на водородном топливе. Проанализированы публикации в международных журналах, посвященных решению проблемы использования водорода на транспорте. Исследования в этом направлении ведутся во многих странах мира, хотя практическая реализация их результатов относительно невелика. В первую очередь следует отметить создание в Германии регулярных пассажирских железнодорожных перевозок, хотя масштабы этих перевозок невелики (работает только одна местная линия). В Норвегии подходят к концу работы по переводу паромов на водородное топливо. Работы в области применения водорода на воздушном транспорте носят поисковый характер.

Выводы. Водород является перспективным видом моторного топлива для различных видов транспорта, в том числе железнодорожного, морского и воздушного. Однако результаты работ, опубликованных в научной печати, свидетельствуют о достаточно слабой проработанности вопросов пожарной безопасности. В связи с этим представляется необходимым проведение дополнительных исследований в этой области. Намечены направления указанных исследований.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; водный транспорт; воздушный транспорт; заправочная станция; оценка риска

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность заправочной инфраструктуры транспорта на водородном топливе // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 6. С. 56–66. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.56-66

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

Fire safety of hydrogen fuel transport refueling infrastructure

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, Russia

ABSTRACT

Introduction. The necessity of research in the field of fire safety of an infrastructure of railway, waterway and air transport using hydrogen as a fuel is presented. The relevance of this study is stipulated by an expansion of works aimed on an application of hydrogen to various types of the transport. The aim of this study is a review of investigations in the area of the fire safety of the infrastructure for a hydrogen refueling (hydrogen transport). The main task is to identify gaps in the subject and results of already conducted research and to develop proposals for further work.

Analysis of investigations in the area of the fire safety of the refueling stations for transport using hydrogen as a fuel. Publications in international journals devoted to solving the problem of hydrogen use in transport were analyzed. Researches in this direction are carried out in many countries of the world, though practical realization of their results is relatively small. First of all, it is worth mentioning the creation of regular passenger railway transportations in Germany, although the scale of these transportations is small (only one local line operates).

In Norway, the conversion of ferries to hydrogen fuel is nearing completion. The works in the field of hydrogen application in air transport are of exploratory nature.

Conclusions. Hydrogen is a promising type of motor fuel for various types of transport, including railway, marine and air transport. However, the results of the works published in scientific press testify to rather weak elaboration of fire safety issues. In this connection it seems necessary to carry out additional research in this area. The directions of these studies are outlined.

Keywords: railway transport; waterway transport; air transport; refueling stations; risk assessment

For citation: Shebeko Yu.N. Fire safety of hydrogen fuel transport refueling infrastructure. *Pozharovzryvobezopasnost'/ Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(6):56-66. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.56-66 (rus).

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

Введение

В настоящее время во многих странах мира проводятся исследования в области развития водородной энергетики, что обусловлено в первую очередь необходимостью решения экологических проблем, связанных с загрязнением атмосферы при использовании ископаемого топлива. Большая часть этих исследований посвящена транспортным средствам и объектам транспортной инфраструктуры при применении водородного топлива. Исследования в области водородных технологий проводятся и в Российской Федерации. Обзор отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих требования безопасности к объектам, реализующим указанные технологии, дан в работах [1, 2]. В дополнение к рассмотренным в указанных работах нормативным документам следует отметить международный стандарт EN 17127¹. Недавно вступили в силу Изменения № 2 к СП 156.13130.2014², в которых изложены требования к автозаправочным станциям с применением компримированного водорода. В работах [3–5] дан обзор отечественных и зарубежных публикаций, посвященных обеспечению пожарной безопасности объектов инфраструктуры автомобильного транспорта, использующего водород в качестве моторного топлива.

Водород как топливо может использоваться не только для автомобилей, но и для других видов транспорта — железнодорожного, водного и воздушного. В связи с этим настоящая работа посвящена обзору исследований в области пожарной безопасности объектов заправочной инфраструктуры транспорта на водородном топливе (железнодорожного, водного, воздушного). Целью работы является аналитический обзор исследований в области пожарной безопасности объектов, предназначенных для заправки указанных видов транспорта водородным топливом. При этом основной задачей является выявление пробелов в тематике и результатах уже

проведенных исследований и разработка предложений по дальнейшим работам.

Анализ исследований в области пожарной безопасности заправочных станций для транспорта на водородном топливе

Общие вопросы обеспечения безопасности и оценка риска для объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе рассмотрены в работе [6]. Проведено сравнение пожароопасных свойств водорода и метана, который в настоящее время достаточно широко используется в качестве моторного топлива и имеет специфику пожарной опасности, близкую к водороду. Отмечены следующие основные отличия в специфике пожарной опасности этих двух видов топлива:

1. Образующиеся при утечках топливного газа водород (H_2) и метан (CH_4) гораздо опаснее в случае водорода.

2. Для метана существует хорошо разработанное и апробированное взрывозащищенное электрооборудование. Аналогичное оборудование для водорода существенно менее распространено.

3. Минимальная взрывоопасная концентрация кислорода (МВСК) в случае водорода составляет 5 % (об.), а для метана 12 % (об.).

4. Для водородовоздушных смесей достаточно вероятным является процесс перехода дефлаграции в детонацию, в то время как аналогичный процесс для метана наблюдали только в шахтах.

5. Испарение жидкого водорода, для которого нормальная температура кипения составляет 20,4 К, может приводить к конденсации воздуха с образованием конденсированных взрывоопасных составов.

Отмечены следующие пути определения безопасных параметров объектов транспортной инфраструктуры:

1. Применение согласительных процедур с участием надзорных органов. Примеры подобного подхода изложены в нормативном документе³ при наличии отступлений от нормативных требований.

¹ EN 17127. Outdoor hydrogen refueling points dispensing gaseous hydrogen and incorporating filling protocols. URL: [standards/cen/728dbf15-e72a-404c-91ba-5d3d0679886b/en-17127-2024](https://standards.cen/728dbf15-e72a-404c-91ba-5d3d0679886b/en-17127-2024)

² СП 156.13130.2014. Станции автомобильные заправочные. Требования пожарной безопасности.

³ NFPA 2. Hydrogen Technologies Code. URL: [standards/nfpa/nfpa2023](https://standards.nfpa/nfpa2023)

2. Концепция максимальной проектной аварии, с помощью которой оцениваются безопасные параметры объекта. Недостатком такого подхода является неопределенность при выборе указанной аварии. NFPA 2³ регламентирует оценку безопасных расстояний на основе критерия достижения концентрацией водорода величины нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) при разгерметизации трубопровода с образованием отверстия с площадью, составляющей 1 % от площади поперечного сечения указанного трубопровода.

3. Расчет риска. Безопасные расстояния оценивают исходя из контуров потенциального риска для его значений 10^{-7} , 10^{-6} и 10^{-5} год⁻¹.

Рассмотрены вопросы безопасности объектов инфраструктуры автомобильного, железнодорожного и водного транспорта. Описана имевшая место 10.06.2019 г. авария на автомобильной водородной заправочной станции (далее — HRS-hydrogen refueling station). Произошла небольшая утечка водорода (по данным расследования аварии — 0,04 г/с) из емкости объемом 50 л при давлении 95 МПа, продолжавшаяся в течение 2 ч. Причина такого события — недостаточная затяжка болтов, которая не была обнаружена персоналом вплоть до момента катастрофического разрушения силиконового уплотнения. За 2–3 с вышло около 2 кг водорода, в результате образовавшаяся газовоздушная смесь взорвалась. Жертв не было, на расстоянии до 65 м от места аварии разрушено остекление.

Приведены результаты оценки риска для скоростного пассажирского паромов на водородном топливе. Отмечено, что основная опасность связана с резервуарами хранения водорода и трубопроводами высокого давления. Опасность оборудования низкого давления, топливных ячеек и двигателя внутреннего сгорания существенно ниже в силу меньшей опасности утечек с образованием факелов или взрывоопасных смесей. Отмечено, что на пароме оборудование с водородом должно быть установлено на верхней палубе для безопасного рассеяния возможных аварийных утечек. Водород на пароме в количестве до 500 кг хранится в резервуарах из композитных материалов при давлении 25–35 МПа, оборудованных клапанами для сброса газа при воздействии на резервуар очага пожара.

Опыт количественной оценки риска для резервуаров со сжатым водородом (GH₂) показывает, что выполнение указанных выше критериев допустимого риска возможно лишь при исключении наиболее опасных сценариев аварии. Увеличение количества сжатого водорода на пароме неизбежно приведет к недопустимому росту риска в силу увеличения количества оборудования, работающего при высоком

давлении. Для избежания этого может быть использован жидкий водород (LH₂).

Одна из опасностей его применения связана с тем, что при контакте больших количеств пролитого при аварии LH₂ с воздухом последний конденсируется с преимущественным испарением азота как более летучего компонента с образованием жидкости, обогащенной кислородом. В конденсированной фазе при этом образуются взрывоопасные составы вида водород-кислородно-азотная смесь. В подтверждение этого механизма описан эксперимент [7], в котором наблюдали сильный взрыв при истечении LH₂, обусловленный образованием конденсированных отложений указанного вида на твердой поверхности. Эти отложения горели в течение 2 с, затем произошел сильный взрыв, эквивалентный взрыву 2–4 кг тринитротолуола (ТНТ). Данная опасность может проявиться при бункеровке при аварийных крупных выбросах жидкого водорода.

Отмечено появление поездов на водородном топливе, основная концепция развития которых заключается в том, что эти поезда не должны быть более опасными по сравнению с поездами на дизельном топливе. При этом наибольшую опасность представляют участки пути в железнодорожных тоннелях.

Вопросы безопасности водородных заправочных станций (HRS) для различных видов транспорта рассмотрены в работе [8]. Отмечены следующие виды возможных аварий:

- I — утечки водорода при негерметичности резервуаров, оборудования и трубопроводов;
- II — утечки водорода из фланцев, запорной арматуры и уплотнений;
- III — утечки водорода из-за ошибок оператора или внешнего воздействия;
- IV — пожары и взрывы;
- V — другие причины.

В Японии в 2018 г. эксплуатировалось 96 HRS, на которых в период с 2005 по 2014 г. произошла 21 авария, 14 из которых относились к типу II. Одна из указанных аварий сопровождалась взрывом.

Вместо доставки водорода на станцию предлагается производить его на месте с помощью электролизеров. В Швеции имеется станция Mariestad, на которой получают водород методом электролиза с использованием солнечной энергии. Мощность электролизера 250 кВт, станция работает в период с апреля по сентябрь. Водород компримируется и хранится в 216 резервуарах из композитных материалов при давлении 70 МПа.

1 июня 2019 г. произошел взрыв в северной Калифорнии (США) при заправке автоцистерны сжиженным водородом, после чего прекратились на 3 месяца поставки газа на 13 заправочных станций. Авария началась с небольшой утечки водорода, но процесс

заправки при этом не остановили, что привело к эскалации аварии.

В работе [9] рассмотрена возможность использования водородной заправочной инфраструктуры для итальянских региональных железнодорожных линий. Эта инфраструктура включает в себя производство, хранение и заправку железнодорожных транспортных средств. Поезда на водородном топливе являются подходящей альтернативой дизельным поездам для региональных линий. При этом выбросы углекислого газа снижаются на 79 %. Водород может использоваться как резервное топливо на неэлектрифицированных участках железной дороги.

В работах [10, 11] рассматривается возможность дооборудования существующих АЗС для получения водорода методом электролиза. Перспективы применения водорода в качестве топлива для региональных железнодорожных линий рассмотрены в работах [12, 13].

Состояние вопроса и перспективы создания поездов на водородном топливе проанализированы в работе [14]. Такие поезда более экономичны в части инфраструктурных затрат по сравнению с электропоездами. Время заправки водородом меньше, чем время зарядки электрических батарей в случае применения подвижного состава на аккумуляторах. Стоимость транспортировки водорода трубопроводным транспортом сравнима со стоимостью передачи электроэнергии с учетом затрат на создание соответствующей инфраструктуры, но потери энергии при этом ниже. Но при этом возникают две проблемы:

1. Вопросы безопасности.

2. Устройство водородных топливных баков на локомотивах (необходимы резервуары с давлением не менее 35 МПа для сжатого водорода или криогенных баков для жидкого водорода).

Способ размещения резервуаров с водородом на единицах подвижного состава (локомотивы, вагоны) очень важен для обеспечения безопасности. Первый способ — размещение на крышах вагонов. Второй — организация специального вагона с водородными резервуарами, что имеет преимущество с точки зрения обеспечения безопасности при заправке, так как такой вагон может быть отсоединен от состава. Как правило, применяют сжатый водород. Сжиженный водород более пригоден для поездов дальнего следования и рассматривается для применения в Корее.

Отмечены 14 реализуемых проектов поездов на водородном топливе: в Европе (Германия, Великобритания, Франция, Польша, Италия), в Азии (Китай, Корея, Индия) и северной Америке (США, Канада). Первый поезд на водородном топливе был пущен в Германии в 2018 г., но регулярное движение начато лишь в 2022 г. (компания Alstom). Состав имеет 5 ваго-

нов и может проезжать расстояние до 1000 км без дозаправки. Используется так называемый «серый» водород, получаемый на химических предприятиях. К 2026 г. планируется переход на «зеленый» водород. Стационарная заправочная станция работает с 2022 г., до этого момента применяли передвижной заправщик. Резервуары со сжатым водородом размещены на крышах вагонов. Имеются литий-ионные батареи для накопления избыточной энергии, которая может быть использована при повышенных нагрузках (например, при ускорении поезда).

Помимо отмеченной выше постоянно функционирующей в Германии железнодорожной линии на водородном топливе в ряде стран реализуются пробные проекты. В Великобритании в 2019 г. разработан поезд HydroFLEX, прототипом которого является состав на дизельном топливе 30-летней давности, у которого дизельный двигатель заменен на двигатель, питающийся от топливных элементов. Во Франции планируется запуск 12 поездов на водородной тяге. В Азии, как отмечено выше, проекты поездов на водородной тяге реализуются в Китае и Корее, причем в последнем случае упор делается на применение сжиженного водорода. В этих проектах противопожарная перегородка должна разделять резервуар со сжиженным водородом и блок топливных ячеек. Отсеки локомотива должны быть оснащены вытяжной вентиляцией с кратностью не менее 12. Поезд может проехать до 600 км со скоростью до 160 км/час без дозаправки. В Индии для снабжения поездов водородом планируется разработка мощного электролизера производительностью 240 кг водорода в день. В Японии коммерческое применение водородных поездов намечено к 2030 г.

Отмечены проблемы, которые следует решить для широкого применения поездов на водородном топливе:

- использование «чистых» источников энергии для получения водорода, тогда как в настоящее время его, как правило, получают из ископаемого топлива;
- хранение и транспортировка водорода;
- высокая техническая сложность водородных заправочных станций;
- вопросы безопасности.

Работа [15] посвящена обзору исследований применения водорода для различных видов транспорта (автомобильного, железнодорожного, водного, воздушного). Рассматриваются транспортные средства с двигателями внутреннего сгорания и на топливных элементах, технологии хранения и доставки водорода, особенности заправочных станций. Отмечено, что в основном используются двигатели на топливных элементах, так как двигатели внутреннего сгорания дают высокую температуру продуктов горения,

что влечет за собой высокие концентрации окислов азота в продуктах горения, а также высокую вероятность возникновения детонационных режимов горения водородовоздушных смесей.

В Великобритании имеется 13 действующих водородных заправочных станций, 5 станций планируется к строительству. Производительность одной такой станции, как правило, ниже 100 кг в день, но для практических целей необходимо увеличение этой величины до 1000 кг в день. Доставку GH_2 следует осуществлять по трубам или использовать LNH_2 . Для малых производительностей (50–100 кг в день) предпочтительнее доставка сжатого водорода автомобилями. К 2027 г. планируется создание автомобилей с топливными баками жидкого водорода. Планируется разработка гибридных автобусов на водородном топливе с постоянно работающими топливными ячейками, при этом возможный избыток электрической энергии накапливается в аккумуляторах и используется для покрытия дефицита мощности при определенных режимах работы двигателя.

В странах Европы водородные заправочные станции, как правило, получают топливо от автомобильных заправщиков, затем газ компримируется до давления 35 МПа на площадке станции. Время заправки автомобиля составляет 5–7 мин. Может использоваться криосжатый водород (определение этого понятия приведено в [5]), получаемый из жидкого водорода.

В авиации водород может использоваться:

- для топливных ячеек, питающих дополнительные и/или аварийные потребители;
- в сжиженном виде для основных двигателей;
- для производства синтетического авиационного топлива.

При применении жидкого водорода для основных двигателей при его хранении на борту потребуется в 4 раза больший объем по сравнению с обычным авиационным топливом, поэтому использование для этой цели крыльев самолета неприемлемо, в связи с чем требуются альтернативные конструкторские решения. Такой самолет планируется создать к 2035 г. При этом потребуются разработка соответствующей заправочной инфраструктуры, включающей в себя производство жидкого водорода в аэропорту при подаче газообразного водорода по трубопроводу.

Морской транспорт в Великобритании дает только 5 % от всех вредных выбросов, вследствие чего применение водорода в качестве судового топлива в настоящее время неактуально. Перспективным представляется использование двигателей внутреннего сгорания с применением жидкого водорода, так как использование топливных ячеек потребует наличия отсеков большого объема. В Великобритании имеется только один паром на водородном топливе, расположен-

ный в Бристоле. Для бункеровки сжатым водородом доставка топлива на расстояние до 300 км может осуществляться автомобильным транспортом с дальнейшим получением жидкого водорода непосредственно в порту.

Для снижения вредных выбросов от железнодорожного транспорта в Великобритании к 2040 г. планируется отказаться от тепловозов на дизельном топливе, перейдя к локомотивам на жидком водороде. Как альтернатива рассматривается расположение резервуаров со сжатым водородом на крышах локомотива и вагонов. Возможны гибридные системы с применением топливных элементов и аккумуляторов, что экономически более выгодно по сравнению с электрификацией железнодорожных трасс. Кроме того, мощности чисто водородных локомотивов может быть недостаточно для грузовых и высокоскоростных пассажирских поездов дальнего следования, что повышает актуальность упомянутых выше гибридных систем. Важной задачей является повышение плотности топлива в резервуарах, для чего, помимо жидкого водорода, может применяться криосжатый водород. Одним из центральных вопросов является создание заправочной инфраструктуры. Использование жидкого водорода связано с необходимостью создания крупномасштабных (объем 20 000–100 000 м³) изотермических хранилищ топлива, хотя в настоящее время достаточно хорошо проработан проект хранилища объемом 6000 м³, а наибольший объем действующего хранилища составляет 3200 м³.

Перспективно применение одного типа заправочных станций для различных видов транспорта. При этом необходима разработка стандартов по следующим направлениям:

- физико-химические и пожароопасные свойства водорода в различных агрегатных состояниях;
- производство водорода;
- хранение и транспортировка водорода;
- датчики обнаружения утечек водорода.

Вопросы хранения водорода применительно к железнодорожному транспорту рассмотрены в работе [16]. Водородные локомотивы используют, как правило, сжатый водород, применение жидкого водорода встречается редко [17]. Отмечено отсутствие непосредственно применимых стандартов для водородных локомотивов и водородных заправочных станций. Рассмотрены следующие способы хранения водорода, применимые для железнодорожных локомотивов и соответствующей заправочной инфраструктуры:

- в виде сжатого газа (давление 35–70 МПа);
- в виде криосжатого газа (давление до 30 МПа);
- в виде жидкого газа (давление 0,4–1,6 МПа).

Для хранения GH_2 применяют резервуары из композитных материалов. Криосжатый водород

хранится в резервуарах с вакуумной теплоизоляцией диаметром 600–700 и длиной 2350–2650 мм при температурах от -240°C (33 К) до -73°C (200 К). При этом длительность хранения составляет 1–2 дня при заполнении резервуара на 100 % и 10–30 дней при заполнении на 50 %. Жидкий водород хранится в резервуарах с вакуумной или многослойной теплоизоляцией.

Во всем мире реализуется или планируется к реализации 47 проектов использования водорода на железнодорожном транспорте. В ряде случаев имеющиеся локомотивы на дизельном топливе переводят на водород. При этом применяются резервуары на давление 35 МПа (в отдельных случаях — на 70 МПа), расположенные на крышах. Обеспечивается дальность перевозок до 1000 км.

Указаны 4 возможных типа водородных заправочных станций:

- заправка газообразного водорода от автомобильного заправщика;
- заправка жидкого водорода от автоцистерны;
- подача водорода по трубопроводу от химического завода;
- подача водорода от электролизера.

Генеральный план водородных заправочных станций для железнодорожного транспорта определяется следующими факторами:

- видом локомотива и давлением водорода в топливных резервуарах;
- требуемой скоростью заправки;
- количеством одновременно заправляемых локомотивов;
- вариантом поставки водорода (расстояние до предприятия по производству водорода, требуемое количество топлива, предпочтительность использования «зеленого» водорода);
- параметрами площадки для размещения станции.

Характерное время заправки локомотива компримированным водородом составляет 35–70 мин, в будущем предполагается снизить это время до 15. Использование жидкого водорода повышает энергетическую плотность хранящегося топлива в 2 раза, но его применение ограничивается отсутствием соответствующих топливных транспортных резервуаров, которые в настоящее время находятся в стадии разработки.

Особенности водородной заправочной станции для железнодорожного транспорта с использованием электролизеров проанализированы в работе [18]. Локомотивы для надежности должны иметь, помимо водородного, еще и дизельное топливо. Одно из преимуществ водородного топлива — быстрая заправка локомотива, который после этого может двигаться в течение 18 ч.

Предлагается для водородных заправочных станций железнодорожного транспорта использовать электролизеры с дальнейшим компримированием водорода до давления 50 МПа и его раздачи через топливораздаточные колонки. Топливный бак должен вмещать до 200 кг водорода при давлении 35 МПа. Заправочная станция должна быть рассчитана на ежедневный расход водорода до 4000 кг. Чтобы обеспечить указанные параметры, станция должна иметь следующие элементы:

- электролизерную систему;
- хранилище водорода низкого давления (до 35 МПа);
- систему компримирования;
- хранилище водорода высокого давления (до 50 МПа);
- заправочные колонки.

Питание электролизера должно быть от источника «зеленой» энергии. Используется 15 л неподготовленной или 10 л очищенной воды на каждый килограмм произведенного водорода. При этом за 1 ч производится 200 кг водорода, что сопровождается расходом 8 МВт·час электроэнергии. Хранилище водорода низкого давления представляет собой резервуар длиной 22 и диаметром 3 м объемом 150 м^3 , вмещающий до 500 кг газа. Система компримирования сжимает водород до давления 52,5 МПа, для чего потребляется мощность 500 кВт «зеленой» энергии. Для заправки топливных баков локомотивов до давления 35 МПа используется подача газа из резервуаров высокого давления. Указанные выше параметры станции способны обеспечить заправку 20 поездов местной линии. При этом хранилище высокого давления состоит из 330 резервуаров с единичной вместимостью 16,5 кг при давлении 50 МПа.

В работе [19] проведены оценки риска водородной заправочной станции производительностью 600 кг в день, расположенной в городской черте, для случаев компримированного и жидкого водорода. В более ранних работах [20, 21] показано, что риск для станций с наличием жидкого водорода выше. В Корее рассматриваются станции с GH2 и LH2, при этом отмечено, что применение жидкого водорода экономически более выгодно.

В качестве примера рассмотрена заправочная станция компримированного водорода с топливными баками автомобилей на давление 70 МПа. Доставка газа осуществляется автомобильным транспортом с резервуарами при давлении 20 МПа. Водород компримируется до давления 87 МПа, хранится в отдельном резервуаре и подается на заправочную колонку под давлением 70 МПа. Жидкий водород хранится в криогенном резервуаре при давлении 0,4 МПа, затем подается на испаритель. Остальная часть станции для заправки LH2 аналогична объекту с GH2.

Объект имеет длину 100 и ширину 65 м и включает в себя операторную и необходимое технологическое оборудование. Автомобиль-заправщик для доставки водорода имеет два резервуара с массой газа 350 кг в каждом. Производительность топливозаправочной колонки 25 кг/час. Для станции с GH2 в качестве инициирующих аварию событий рассматриваются утечки из отверстий диаметром 0,11, 1,11 и 11,1 мм. Приведены частоты инициирующих аварию событий.

Проведена оценка индивидуального и социального рисков, величины которых сравниваются с критериями допустимого риска⁴. Следует отметить, что используемое в данной работе понятие индивидуального риска отличается от принятого в Российской Федерации, так как не учитывает долю времени, проводимого человеком вблизи опасного объекта. В российских нормативных документах⁵ такая величина называется потенциальным риском. Согласно упомянутому выше руководству⁴ максимально допустимая величина индивидуального риска для работников объекта составляет 10^{-3} год⁻¹, для населения вблизи него — 10^{-4} год⁻¹.

Найдено, что для рассматриваемого объекта размеры зон поражения тепловым излучением при максимальной проектной аварии составляют:

- для интенсивности теплового излучения $q = 4$ кВт/м² — 182 м (случай станции с GH2) и 210 м (случай станции с LH2);
- для $q = 12,5$ кВт/м² — 120 м (GH2) и 110 м (LH2);
- для $q = 37,5$ кВт/м² — 70 м (GH2) и 62 м (LH2).

Размеры зон поражения ударной волной при максимальной проектной аварии для уровня избыточного давления 20 кПа составляют 95 м (GH2) и 118 м (LH2).

Расчеты риска показали, что необходимы дополнительные мероприятия по его снижению, из которых наиболее существенны повышение надежности заправочных рукавов и топливораздаточных колонок, оснащение территории станции датчиками на водород и применение систем автоматического аварийного отключения оборудования. Сделан вывод, что по уровню риска станции с наличием сжатого и жидкого водорода близки друг к другу. Для обоих типов станций наиболее опасной операцией, дающей наибольший вклад в величину риска, является перекачка топлива из автомобильного заправщика в стационарные резервуары хранения.

В работе [22] исследовано применение вертикальных противопожарных экранов для снижения

опасности водородных заправочных станций. Проанализированы следующие вопросы:

- каковы безопасные расстояния для незащищенного человека и пожарного в боевой одежде для воздействия водородного газового факела;
- насколько эти расстояния могут быть уменьшены при использовании противопожарных экранов.

Для решения указанных задач разработана модель горизонтального водородного факела с учетом наличия противопожарных экранов. Найдено, что если высота экрана меньше или равна высоте точки истечения водорода, то пламя вблизи экрана становится вертикальным. Доля энергии сгоревшего водорода, переходящей в излучение, находится в диапазоне 13,6–23,1 %. Поверхностная плотность теплового излучения составляет 22,4–24,7 кВт/м². Безопасные расстояния составляют 23,1 м при $\Delta H = 0$ и 7,3 м при $\Delta H = 1$ м, где ΔH — разность высот верха экрана и точки истечения водорода. Сделан вывод, что увеличение величины ΔH до значения более 1 м не приводит к заметному снижению размеров опасных зон.

Вопросы применения водорода в качестве судового топлива рассмотрены в работах [23, 24]. В работе [23] проведена оценка риска для пассажирского паром на водородном топливе. В апреле 2018 г. Международная организация по судоходству (International Maritime Organization-IMO) приняла новую стратегию снижения вредных выбросов от судов: к 2050 г. эти выбросы должны быть снижены на 50 %. В Норвегии к 2026 г. планируется перевести на нулевые выбросы круизные и туристические суда, используемые во фьордах. При этом перевод на электрические батареи вряд ли возможен. Альтернатива — применение водородного топлива, полученного от «чистых» источников энергии. Производство водорода в объеме 500–1000 кг в день путем электролиза конкурентоспособно с производством другого «чистого» топлива — биодизельного.

В работе [23] проведена оценка риска для водородного паром на 100 пассажиров. Судно курсирует по фиксированному дневному маршруту с одним пунктом заправки. Хранение газообразного топлива на судне предусмотрено в 3 резервуарах из композитных материалов общим объемом 8300 л при давлении 25 МПа (полное количество водорода 450 кг). Имеется 16 топливных ячеек с электрической мощностью 50–100 Вт каждая.

Основное требование к парому на водородном топливе — его безопасность должна быть не ниже аналогичного паром на жидком моторном топливе. В Норвегии уровень безопасности паромов и скоростных пассажирских судов определяется следующим условием: должно быть не более 1 смертельного случая на 10^9 пассажиро-километров. При работе паром в течение 30 ч в неделю это условие соответ-

⁴ Health and Safety Executive. Guidance of ALARP decisions in COMAH. Ver. 3.

⁵ Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утв. Приказом МЧС России от 26.06.2024 г. № 533.

стствует уровню индивидуального риска $7 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹ при уровне потенциального риска $4 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹. К этому условию следует добавить требование, чтобы риск, связанный с пребыванием парама в порту (включая заправку топливом), был допустимым с учетом регламентированных опасных зон.

Выделены следующие опасные зоны в порту при наличии в нем водородного парама и соответствующей инфраструктуры:

- внутренняя зона — внутри контуров риска по уровню 10^{-5} год⁻¹. Деятельность в этой зоне ограничена, допускается временное пребывание пассажиров;
- средняя зона — между контурами риска с уровнями 10^{-6} и 10^{-5} год⁻¹. В этой зоне допускаются офисные здания, промышленные объекты, причалы, железнодорожные товарные станции;
- внешняя зона — между контурами риска 10^{-7} и 10^{-6} год⁻¹;
- за внешней зоной — вне контуров риска по уровню 10^{-7} год⁻¹. В этой зоне могут быть расположены отели, больницы, школы и т.п.

Бункеровка водородом должна иметь место на отдельном участке причала, где не допускается присутствие пассажиров. Предлагается меры безопасности при бункеровке принимать аналогично случаю бункеровки СПГ⁶.

Рассчитаны значения потенциального риска на различных расстояниях от судна. Найдено, что значения риска на малых расстояниях (менее 10 м) могут быть существенно снижены путем организации аварийного сброса водорода из заправочного трубопровода. Определены радиусы контуров риска для различных его значений: 10^{-5} год⁻¹ — 11 м; 10^{-6} год⁻¹ — 22 м; 10^{-7} год⁻¹ — 38 м. Основной вклад в риск дают сценарии, связанные с разгерметизацией заправочного рукава при бункеровке парама.

Предложены следующие мероприятия по снижению риска:

- раннее обнаружение пожара с активацией сброса водорода из резервуаров хранения;
- применение противопожарных экранов для предотвращения воздействия водородного факела на строительные конструкции и оборудование;
- огнезащита строительных конструкций и резервуаров хранения водорода;
- применение легкобросаемых конструкций во взрывоопасных помещениях;
- минимизация длин и диаметров технологических трубопроводов и количества запорной арматуры на них;
- применение сбросных труб для обеспечения расхода водорода при его аварийном сбросе

400–800 г/с. Эти трубы должны иметь достаточно большую высоту для предотвращения опасного воздействия факела на окружающие объекты.

В работе [24] проведено численное моделирование возможности подавления водородного факела (как горизонтального, так и вертикального) с помощью тонкораспыленной воды применительно к судам на водородном топливе. Показано, что наибольшую эффективность дает применение капель воды диаметром 30 мкм. С увеличением размеров капель эффективность тонкораспыленной воды снижается. Чем выше скорость капель, тем выше их гасящий эффект за счет их большей проникающей способности во фронт пламени за счет преодоления конвективных потоков. Показано, что боковые потоки воздуха, имеющие скорость 4 м/с, заметно снижают эффективность тонкораспыленной воды за счет уноса капель. Отмечено при этом, что гашения факела не происходит, реализуется лишь снижение температуры пламени и продуктов сгорания.

В работе [25] рассматривается концепция создания самолета на водородном топливе. Благодаря высокой удельной теплоте сгорания водорода такой самолет может иметь меньшую массу по сравнению с воздушными судами, использующими керосин в качестве топлива. В США компании Universal Hydrogen и ZeroAvia независимо одна от другой планируют выпустить региональные водородные самолеты. О создании такого воздушного судна объявила также компания Airbus. В Европе компанией FlyZero реализуется проект создания водородного самолета. В нашей стране был разработан самолет ТУ-155 на водородном топливе. Однако на существующих водородных самолетах были выполнены только демонстрационные полеты. Одна из проблем заключается в хранении водорода на борту самолета. В случае сжатого водорода его следует хранить при давлении 70 МПа, при этом резервуары не могут быть размещены из-за недостатка места в фюзеляже самолета, и необходимо использовать жидкий водород, который в данном случае имеет два преимущества по сравнению с сжатым газом:

- плотность хранящегося продукта в 2–3 раза выше;
- давление хранения существенно ниже (0,1–0,2 МПа). Основная проблема использования жидкого водорода — необходимость высокоэффективной теплоизоляции, работающей при температурах около 20 К. Рассмотрены технологические и конструктивные особенности водородного самолета.

Помимо водорода в качестве топлива, продукты сгорания которого не загрязняют окружающую среду, рассматривают аммиак как альтернативное судовое топливо, содержащее водород в связанном виде [26]. Достоинством аммиака является низкое давление хра-

⁶ ISO 20519: 2017. Ships and marine technology — specification for bunkering of liquefied natural gas fueled vessels.

нения продукта при комнатной температуре и более высокая объемная плотность энергии (11,4 ГДж/м³) даже по сравнению с жидким водородом (8,5 ГДж/м³). Однако нормативная база для применения аммиака в качестве топлива отсутствует. Имеющийся международный нормативный документ⁷, касающийся судов, использующих газовое топливо или топливо с низкой температурой вспышки, основан на опыте применения СПГ и не содержит специфических для аммиака требований. Отмечено, что основной риск применения аммиака в качестве судового топлива связан с его токсичностью и коррозионной активностью при сравнительно низком уровне пожаровзрывоопасности.

Выводы

В настоящей работе проанализирована проблема обеспечения пожаровзрывобезопасности при применении водорода в качестве топлива для железнодорожного, водного и воздушного транспорта. Анализ

⁷ MSC 2015. Adoption of the International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF CODE). IMO Resolution MSC 391/95.

показал, что в указанной области проведенные исследования касаются в основном железнодорожного транспорта. Отмечено, что, хотя во многих странах ведутся работы по созданию локомотивов на водородном топливе и соответствующей заправочной инфраструктуры, только в Германии осуществляются регулярные пассажирские перевозки на местной линии с участием указанных локомотивов. В остальных странах имеются максимум демонстрационные водородные поезда. Развитие данного направления в существенной степени сдерживается отсутствием необходимой нормативной базы. Использование водородного топлива для водного транспорта в достаточно широких масштабах осуществляется только в Норвегии для пассажирских паромных перевозок. Применение водородного топлива в авиации не носит широкого характера, хотя работы в этом направлении ведутся различными компаниями. Подводя итог сделанному обзору, можно констатировать, что проводимые во всем мире исследования применения водорода в качестве топлива для различных видов транспорта носят, как правило, поисковый характер и требуют своего расширения в будущем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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. EDN FYZNQV.
2. Шебеко Ю.Н. Нормативные документы, регламентирующие вопросы пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // Пожарная безопасность. 2020. № 4. С. 36–42.
3. Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность 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. EDN UZHJGX.
4. 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. EDN FDSVEM.
5. 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. EDN JBMKKQ.
6. Hansen O.R. Hydrogen infrastructure — Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions // Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 141. Pp. 164–176. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.028
7. Royle M., Willoughby D. The safety of future hydrogen economy // Process Safety and Environmental Protection. 2011. Vol. 89 (6). Pp. 452–462. DOI: 10.1016/j.psep.2011.09.003
8. Pagliaro M., Iulianell A. Hydrogen refueling stations: safety and sustainability // General Chemistry. 2020. Vol. 6. P. 190029. DOI: 10.13140/RG.2.2.10338.48324
9. Piraino F., Genovese M., Fragiaco P. Towards a new mobility concept for regional trains and hydrogen infrastructure // Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 228. P. 113650. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113650
10. Chrysochioidis N., Escude M.R., van Wijk A.M.J. Technical potential of on-site wind powered hydrogen production refueling stations in the Netherlands // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45. Pp. 25096–25108. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.125
11. Tsuda K. Design proposal for hydrogen refueling infrastructure development in the Northeastern United States // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. Vol. 39 (14). Pp. 7449–7459. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.002
12. Farkas B., Koller L., Kovessdi I. Issues for introduction of hydrogen-powered rail vehicles on Hungarian regional railways lines through an example for Germany // Transportation Research Procedia. 2024. Vol. 77. Pp. 35–42. DOI: 10.1016/j.trpro.2024.01.005
13. Fu L., Chen X., Chen Yu., Jiang S., Shen B. Hydrogen-electricity hybrid energy pipelines for railway transportation: Design and economic evaluation // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 61. Pp. 251–264. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.299

14. Ding D., Wu X. Hydrogen fuel cell electric trains: Technologies, current status and future // *Applications in Energy and Combustion Science*. 2024. Vol. 17. P. 100255. DOI: 10.1016/j.jaecs.2024.100255
15. Ling-Chin J., Giampien A., Wilks M., Lau S.W., Bacon E., Sheppard I. et al. Technology roadmap for hydrogen-fueled transportation in UK // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 52. Pp. 705–733. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.131
16. Bohm M., Del Rey A.F., Pagenkopf J., Varela M., Herwatz-Polster S., Calderon B.N. Review and composition of worldwide hydrogen activities in rail sector with special focus on onboard storage and refueling technologies // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. Pp. 38003–38017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.279
17. Kang D., Yun S., Kim B. Review of liquid hydrogen storage tank and insulation system for the high-power locomotive // *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 4357. DOI: 10.3390/en15124357
18. Guerra C.F., Reyes-Bozo L., Vyhmeister E., Salazar J.L., Caparros M.J., Clemente-Jul C. et al. Sustainability of hydrogen refueling stations for trains using electrolyzers // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46 (26). Pp. 13748–13759. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.044
19. Yoo B.H., Wilailak S., Bae S.H., Gye H.R., Lee C.J. Comparison risk assessment of liquefied and gaseous hydrogen refueling stations // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46 (71). Pp. 35511–35524. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.073
20. Pasman H.J., Rogers W.J. Risk assessment by means of Bayesian networks: a comparative study of compressed and liquefied H₂ transportation and tank station risks // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. Pp. 17415–17425. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.051
21. Kim E., Lee K., Kim J., Lee Y., Park J., Moon I. Development of Korean hydrogen fueling station codes through risk analysis // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36. Pp. 13122–13131. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.053
22. Yu X., Yan W., Liu Y., Zhou P., Li B., Wang C. The flame mitigation effect of vertical barrier wall in hydrogen refueling stations // *Fuel*. 2022. Vol. 315. P. 123265. DOI: 10.1016/J.fuel.2022.123265
23. Aarskog F.G., Hansen O.R., Stromgren T., Ullebtrg O. Concept risk assessment of a hydrogen driven high speed passenger ferry // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45 (2). Pp. 1359–1372. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.128
24. Yuan Y., Wu S., Shen B. A numerical simulation of the suppression of a hydrogen jet fires on hydrogen fuel cell ships using a fine water mist // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. Pp. 13353–13364. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.130
25. Adler E.J., Martins R.R. Hydrogen-powered aircraft: Fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts // *Progress in Aerospace Sciences*. 2023. Vol. 141. P. 100922. DOI: 10.1016/j.paerosci.2023.100922
26. Jang H., Mujeeb M.P., Wang H., Park C., Hwang I., Jeong B. et al. Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fueled ships // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 287. P. 115751. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115751

REFERENCES

1. 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. EDN FYZNQV. (rus).
2. Shebeko Yu.N. Normative documents on fire safety of hydrogen energetics infrastructure. *Fire Safety*. 2020; 4:36-42. (rus).
3. Gordienko D.M., Shebeko Yu.N. Fire safety of infrastructure for transport on hydrogen fuel. *Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(2):41-51. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.02.41-51. EDN UZHJGX. (rus).
4. Shebeko Yu.N. Fire safety of hydrogen refueling stations. *Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(4):42-50. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50. EDN FDSVEM. (rus).
5. 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. EDN JBMKKQ. (rus).
6. Hansen O.R. Hydrogen infrastructure — Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020; 141:164-176. DOI: 10.1016/j.psep.2020.06.028
7. Royle M., Willoughby D. The safety of future hydrogen economy. *Process Safety and Environmental Protection*. 2011; 89(6):452-462. DOI: 10.1016/j.psep.2011.09.003
8. Pagliaro M., Iulianell A. Hydrogen refueling stations: safety and sustainability. *General Chemistry*. 2020; 6:190029. DOI: 10.13140/RG.2.2.10338.48324
9. Piraino F., Genovese M., Fragiaco P. Towards a new mobility concept for regional trains and hydrogen infrastructure. *Energy Conversion and Management*. 2021; 228:113650. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113650

10. Chrysoschioidis N., Escude M.R., van Wijn A.M.J. Technical potential of on-site wind powered hydrogen production refueling stations in the Netherlands. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45:25096-25108. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.125
11. Tsuda K. Design proposal for hydrogen refueling infrastructure development in the Northeastern United States. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014; 39(14):7449-7459. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.002
12. Farkas B., Koller L., Kovacs I. Issues for introduction of hydrogen-powered rail vehicles on Hungarian regional railways lines through an example for Germany. *Transportation Research Procedia*. 2024; 77:35-42. DOI: 10.1016/j.trpro.2024.01.005
13. Fu L., Chen X., Chen Yu., Jiang S., Shen B. Hydrogen-electricity hybrid energy pipelines for railway transportation: Design and economic evaluation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; 61:251-264. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.299
14. Ding D., Wu X. Hydrogen fuel cell electric trains: Technologies, current status and future. *Applications in Energy and Combustion Science*. 2024; 17:100255. DOI: 10.1016/j.jaecs.2024.100255
15. Ling-Chin J., Giampien A., Wilks M., Lau S.W., Bacon E., Sheppard I. et al. Technology roadmap for hydrogen-fueled transportation in UK. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; 52:705-733. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.131
16. Bohm M., Del Rey A.F., Pagenkopf J., Varela M., Herwatz-Polster S., Calderon B.N. Review and composition of worldwide hydrogen activities in rail sector with special focus on onboard storage and refueling technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022; 47:38003-38017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.279
17. Kang D., Yun S., Kim B. Review of liquid hydrogen storage tank and insulation system for the high-power locomotive. *Energies*. 2022; 15:4357. DOI: 10.3390/en15124357
18. Guerra C.F., Reyes-Bozo L., Vyhmeister E., Salazar J.L., Caparros M.J., Clemente-Jul C. et al. Sustainability of hydrogen refueling stations for trains using electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46(26):13748-13759. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.044
19. Yoo B.H., Wilailak S., Bae S.H., Gye H.R., Lee C.J. Comparison risk assessment of liquefied and gaseous hydrogen refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46(71):35511-35524. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.073
20. Pasman H.J., Rogers W.J. Risk assessment by means of Bayesian networks: a comparative study of compressed and liquefied H₂ transportation and tank station risks. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012; 37:17415-17425. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.051
21. Kim E., Lee K., Kim J., Lee Y., Park J., Moon I. Development of Korean hydrogen fueling station codes through risk analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011; 36:13122-13131. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.053
22. Yu X., Yan W., Liu Y., Zhou P., Li B., Wang C. The flame mitigation effect of vertical barrier wall in hydrogen refueling stations. *Fuel*. 2022; 315:123265. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123265
23. Aarskog F.G., Hansen O.R., Stromgren T., Ullebtrg O. Concept risk assessment of a hydrogen driven high speed passenger ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45(2):1359-1372. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.128
24. Yuan Y., Wu S., Shen B. A numerical simulation of the suppression of a hydrogen jet fires on hydrogen fuel cell ships using a fine water mist. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46:13353-13364. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.130
25. Adler E.J., Martins R.R. Hydrogen-powered aircraft: Fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts. *Progress in Aerospace Sciences*. 2023; 141:100922. DOI: 10.1016/j.paerosci.2023.100922
26. Jang H., Mujeeb M.P., Wang H., Park C., Hwang I., Jeong B. et al. Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fueled ships. *Ocean Engineering*. 2023; 287:115751. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115751

Поступила 14.11.2024, после доработки 03.12.2024;

принята к публикации 04.12.2024

Received November 14, 2024; Received in revised form December 3, 2024;

Accepted December 4, 2024

Информация об авторе

ШЕБЕКО Юрий Николаевич, д.т.н., 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: 0000000319162547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru

Information about the author

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 RSCI: 47042; Scopus AuthorID: 7006511704; ORCID: 0000000319162547; e-mail: yn_shebeko@mail.ru