

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 5. С. 71–78
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(5):71-78

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ/REVIEW ARTICLE

УДК 514.841.12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.05.71-78>

Пожарная безопасность применения аммиака как безуглеродного топлива для автомобилей и судов

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 применения аммиака в качестве моторного топлива. Актуальность статьи обусловлена необходимостью анализа мирового опыта использования аммиака для автомобилей и судов. Целью работы является аналитический обзор исследований в области пожарной безопасности объектов с использованием аммиака как моторного топлива. При этом основной задачей является выявление пробелов в результатах уже проведенных исследований и разработка предложений по дальнейшим работам.

Анализ исследований в области обеспечения пожарной безопасности применения аммиака в качестве топлива. Проанализированы публикации в международных журналах, посвященные решению проблемы пожарной безопасности использования аммиака для автомобилей и судов. Исследования в этом направлении ведутся во многих странах мира, хотя пока нет широкой практической реализации их результатов. До сих пор нет общепринятых международных стандартов, регламентирующих безопасность применения аммиака в качестве автомобильного и судового топлива, несмотря на наличие нормативов для промышленного использования этого газа. Отмечены нерешенные проблемы в рассматриваемой области (безопасные расстояния, системы пожарной автоматики, конструктивные решения и т.п.).

Выводы. Аммиак является перспективным видом моторного топлива для автомобилей и судов. Однако результаты работ, опубликованных в научной печати, свидетельствуют о недостаточной для широкого практического использования проработанности вопросов пожарной безопасности, в связи с чем представляется необходимым проведение дополнительных исследований.

Ключевые слова: автомобильный транспорт; водный транспорт; заправочная станция; требования пожарной безопасности; нормативные документы

Для цитирования: Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность применения аммиака как безуглеродного топлива для автомобилей и судов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 71–78. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.71-78

✉ Шебеко Юрий Николаевич, e-mail: yn_shebeko1@mail.ru

Fire safety of ammonia as a carbon-free fuel for cars and ships

Yury N. Shebeko ✉

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper substantiates the necessity of research in the field of fire safety of ammonia use as motor fuel. The relevance of the paper is due to the need to analyze the world experience of using ammonia for cars and ships. The purpose of the work is an analytical review of research in the field of fire safety of objects using ammonia as a motor fuel. At the same time, the main task is to identify gaps in the results of already conducted research and to develop proposals for further work.

Analysis of investigations in the area of the fire safety of an application of ammonia for cars and ships. Papers in international journals devoted to solving the problem of fire safety of ammonia use for cars and ships were analyzed. Research in this direction is carried out in many countries of the world, although there is still no wide practical implementation of their results. There are still no generally accepted international standards regulating the safety of ammonia use as motor vehicle and marine fuel, despite the existence of regulations for the industrial use of this gas. Unresolved problems in this area (safety distances, fire automation systems, design solutions, etc.) are noted.

Conclusions. Ammonia is a promising type of motor fuel for cars and ships. However, the results of works published in scientific press show that the elaboration of fire safety issues is insufficient for wide practical use, therefore it seems necessary to carry out additional research.

Keywords: automobile transport; water transport; refueling station; fire safety requirements; normative documents

For citation: Shebeko Yu.N. Fire safety of ammonia as a carbon-free fuel for cars and ships. *Pozharovzryvobezopasnost, Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):71-78. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.71-78 (rus).

✉ Yury Nicolaevich Shebeko, e-mail: yn_shebeko1@mail.ru

Введение

В настоящее время во многих странах мира проводятся исследования в области предотвращения разрушения озонового слоя Земли, происходящего за счет выделения в атмосферу опасных газов различной природы в результате работы транспорта и промышленной деятельности. Особую опасность представляет применение ископаемого топлива, приводящее также в силу образования при горении диоксида углерода к потеплению климата. Одним из путей решения этой проблемы является переход к водородной энергетике. Возникающие при этом вопросы обеспечения пожарной безопасности и пути их решения рассмотрены в обзорах [1–3]. Однако водород как топливо имеет и недостатки, связанные с его хранением и транспортировкой в сжатом или сжиженном виде.

Будущие энергетические системы, помимо удовлетворения экологических требований, должны обладать эффективными и безопасными методами хранения и транспортировки энергии. На сегодняшний день существует ряд механических, электрических, тепловых и химических способов для осуществления технологических процессов хранения и транспортировки. Среди этих способов перспективным является применение аммиака, который может быть получен как из ископаемого топлива, так и с помощью возобновляемых источников энергии (ветровых и солнечных). Настоящая работа посвящена анализу публикаций, посвященных проблеме обеспечения пожарной безопасности применения аммиака как безуглеродного топлива для автомобилей и судов.

Анализ исследований в области обеспечения пожарной безопасности применения аммиака в качестве топлива

Общие вопросы применения аммиака как источника энергии рассмотрены в работе [4]. Преимущества аммиака по сравнению с другими видами топлива заключаются в следующем.

1. Аммиак NH_3 не содержит атомов углерода в молекуле, т.е. продукты его полного сгорания не влияют на озоновый слой Земли. Этот газ может быть синтезирован в безуглеродных процессах

с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

2. Достаточно высокая плотность запасенной энергии (22,5 МДж/кг), сравнимая со случаем ископаемого топлива (уголь — 20 МДж/кг, природный газ — 55 МДж/кг).

3. Легко сжигается при комнатной температуре и давлении 0,8 МПа.

4. Существуют развитые технологии и инфраструктура для хранения и транспортировки NH_3 (трубопроводы, железнодорожный, автомобильный и водный транспорт).

Работы по использованию аммиака в качестве топлива ведутся в различных странах мира. В Японии создан консорциум из 22 организаций под названием “Green ammonia” («Зеленый аммиак»), рассматривающий NH_3 как составную часть водородной энергетике. В США развивается программа “Renewable Energy to Fuels through Utilization of Energy-Dense Liquids” («Возобновляемая энергия, получаемая от жидкостей с высокой плотностью энергии»), направленная на поиск способов превращения электрической энергии от ВИЭ в энергию безуглеродных жидких продуктов с дальнейшим ее превращением обратно в электрическую энергию. Работы по аммиаку как перспективному носителю энергии ведутся в Великобритании и направлены на использование ветровой энергии для получения NH_3 как продукта для хранения энергии с дальнейшим ее использованием для двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Отмечена особая актуальность применения аммиака для островных территорий с дефицитом энергии. В Австралии планируется строительство завода для производства аммиака на основе получения водорода с помощью ВИЭ с дальнейшим синтезом NH_3 . В случае успеха этой программы окажется возможным отказаться от природного газа при производстве аммиака. Международное энергетическое агентство (International Energy Agency — IAE) изучает возможность синтеза аммиака с использованием водорода, полученного от ВИЭ, который гораздо дешевле хранить и транспортировать по сравнению с H_2 . Имеются потенциальные барьеры на пути применения аммиака, связанные с его токсичностью и необходимостью

предотвращения образования окислов азота при его горении.

Преимущества использования аммиака состоят в следующем.

1. Уменьшение выбросов диоксида углерода.

2. Снижение пожарной опасности в силу более низкой пожарной опасности аммиака.

3. Наличие развитой инфраструктуры хранения и транспортировки по сравнению с использованием водорода. Имеется опыт применения аммиака в качестве моторного топлива во время 2-й мировой войны — в 1942 г. в Бельгии из-за нехватки бензина около 100 автобусов работали на аммиаке.

Аммиак как моторное топливо может использоваться в двигателях внутреннего сгорания или в автомобилях с топливными ячейками, в которых в результате химических превращений на катализаторе генерируется химическая энергия. Работы [5–7] посвящены рассмотрению данного способа использования NH_3 . В случае применения аммиака в ДВС к нему следует добавлять более активные горючие для компенсации его низкой нормальной скорости горения (например, водород). При этом водород может быть получен непосредственно на борту транспортного средства за счет частичного каталитического разложения аммиака. Найдено, что добавка 10 % H_2 дает оптимальную эффективность двигателя [8].

Одной из целей «зеленой» энергетики является декарбонизация судоходства путем использования безуглеродного корабельного топлива, полученного с применением возобновляемых источников энергии [9–12]. В настоящее время пока не существует эксплуатируемых судов на аммиачном топливе, но многие судоходные компании на разных стадиях реализуют проекты по созданию таких судов и соответствующей портовой инфраструктуры. Так, например, японская компания Mitsubishi Heavy Industries завершила этап концептуального проектирования. Китайская компания China State Shipbuilding Corporation получила одобрение классификационного органа DNV на строительство до 7000 судов, работающих на аммиаке. Корейская компания Samsung Heavy Industries строит 2 больших судна на аммиачном топливе. Отсутствуют общепринятые нормативные документы по применению аммиака в качестве корабельного топлива, однако имеются документы классификационных обществ (ABS, 2020. Guidance Notes on Risk Assessment Applications for the Marine and Offshore Industries (USA); DNV GL, 2020. Ammonia as a Marine Fuel (Norway); KR, 2021. Guidelines for Ships Using Ammonia as a Fuel (Korea); RINA, 2021. Amendments to the “Rules for the Classification of Ships and Relevant New Additional Class Notations” (Italy)).

Дана характеристика аммиака по сравнению со сжиженными углеводородными газами (СУГ), близкими к NH_3 по физическим свойствам. Аммиак имеет относительно узкую концентрационную область распространения пламени с высоким нижним концентрационным пределом распространения пламени (15 % (об.)), высокую минимальную энергию зажигания (8,0 мДж, для сравнения — в случае СУГ 0,28 мДж), низкую нормальную скорость горения (0,07 м/с, для сравнения в случае СУГ — 0,43 м/с). Пожарная опасность аммиака существенно ниже по сравнению с другими альтернативными топливами. Однако аммиак имеет высокую токсичность паров, их максимально допустимая концентрация в воздухе 30 ppm. Аммиак коррозионно активен, особенно по отношению к меди, латуни и цинку.

Аварии с аммиаком на химических предприятиях являются нередким событием. Так, например, в Канаде в период с 2007 по 2017 г. зафиксировано 59 утечек NH_3 , 14 из которых привели к поражению людей. В США с 1984 г. имели место 306 случаев, из них 58 привели к человеческим жертвам. В частности, в штате Техас произошел инцидент с гибелью 15 человек в результате пожара на заводе по производству удобрений. В среднем каждую неделю было не менее 1 инцидента. В период с 1978 по 2021 г. было 12 аварий на судах, перевозящих аммиак. Одна из них в 1983 г. унесла 46 жизней при взрыве аммиачно-воздушной смеси в машинном отделении судна.

Изложены некоторые противопожарные мероприятия для аммиачных судовых систем. Минимальная интенсивность водяного орошения при пожаре составляет 10 л/(мин·м²) для горизонтальных и 4 л/(мин·м²) для вертикальных конструкций. Судно должно быть оснащено автоматической системой порошкового пожаротушения при расходе порошка 3,5 кг/с при длительности подачи не менее 45 с. В зоне заправки судна топливом следует предусмотреть наличие порошковых огнетушителей с массой порошка 5 кг, а также аварийные водяные завесы. Вентиляционные системы должны иметь производительность не менее 30 объемов в час. Бункеровочные станции должны располагаться на открытой палубе для обеспечения условий проветриваемости. Заправочные рукава должны быть рассчитаны на давление, превышающее рабочее давление при бункеровке не менее чем в 5 раз. Заправочная арматура должна располагаться на расстоянии не менее 10 м от воздухозаборов. Должно быть предусмотрено автоматическое перекрытие аммиачных магистралей в случае аварии за время не более 5 с при срабатывании системы обнаружения утечек газа.

Отмечено, что отсутствует официально одобренный международный нормативный документ, регламентирующий безопасность применения аммиака

в качестве судового топлива. Упомянутые выше документы различных обществ не всегда согласуются один с другим. Например, нормативные безопасные расстояния от предохранительных клапанов судовых хранилищ NH_3 находятся в диапазоне 10–25 м. Сформулированы основные направления дальнейших работ, среди которых одним из основных является создание бункеровочной инфраструктуры.

В работе [11] аммиак рассматривается как судовое топливо будущего. Проанализировано его использование для производства электроэнергии с помощью топливных ячеек (см. также [5–7, 13]). Отмечено, что около половины возобновляемых источников энергии локализовано в Азии и лишь 25 % в Европе. Около 52 % приходится на ветровые и солнечные системы, остальное — на гидростанции, приливные и геотермические источники. Годовой прирост ветровых и солнечных источников составляет 10 и 20 % соответственно.

Водород имеет высокую стоимость, кроме того, существуют проблемы его хранения и транспортировки. Потому неясно, станет ли он основным носителем «зеленой» энергии в транспортном секторе. Альтернативой является аммиак, который может быть использован в том числе и в качестве судового топлива. Компания DNV предполагает, что к 2050 г. по крайней мере 15 % морских перевозок на длинные расстояния будут осуществляться за счет аммиака или водорода¹. Технологии производства, хранения и транспортировки NH_3 хорошо разработаны. Хранения жидкого аммиака в 16 раз дешевле хранения жидкого водорода.

Для производства аммиака чаще всего используется процесс синтеза из водорода и азота на катализаторах при температуре 400–600 °С и давлении 20–40 МПа. Так называемый «коричневый» NH_3 получают с помощью энергии ископаемого топлива, «голубой» NH_3 — с помощью такого же процесса, но с утилизацией образующегося диоксида углерода, «зеленый» NH_3 — с использованием энергии от возобновляемых источников. В последние годы «зеленый» аммиак рассматривается для применения на транспорте в Норвегии, Австралии, Китае, Германии, Израиле и в Японии. При этом должны реализоваться следующие производственные цепочки: получение энергии от ВИЭ, электролиз воды с получением водорода, синтез аммиака, сжижение аммиака с дальнейшим хранением и транспортировкой, а также в двигателях внутреннего сгорания или топливных ячейках. Отмечено, что мощности 140 ГВт от ветровых и сол-

нечных источников достаточно для получения требуемого судового топлива. С экономической точки зрения применение жидкого аммиака в качестве топлива существенно дешевле по сравнению с жидким водородом, однако несколько дороже по сравнению с углеводородсодержащими продуктами (СПГ, диметиловый эфир, метанол), для которых в то же время требуется улавливание образующегося диоксида углерода.

Твердотопливные ячейки, служащие для генерации электроэнергии с использованием аммиака, имеют хорошую перспективу практического применения [14]. Эффективность превращения химической энергии аммиака в электрическую составляет около 50 %, что выше эффективности дизельных двигателей. Проведено сравнение жидкого аммиака с СПГ в качестве моторного топлива, результаты которого представлены ниже:

- для жидкого аммиака необходим удельный объем хранения, в 1,5 раза превышающий аналогичную величину для СПГ;
- аммиак менее пожароопасен по сравнению с СПГ;
- требуются изменения в нормативном регулировании с учетом использования аммиака в качестве топлива.

Аммиак может использоваться в дизельных двигателях, но при этом возникает проблема утилизации окислов азота в продуктах сгорания. Поскольку физические свойства жидкого аммиака близки к свойствам СУГ, может быть использован опыт хранения и транспортировки этого продукта.

Особенности технологий производства, хранения и транспортировки аммиака рассмотрены в работе [15]. Отмечена перспективность хранения и транспортировки «чистой» энергии с помощью веществ, молекулы которых содержат большое количество атомов Н (водород, аммиак, метанол, метилциклогексан). Применение аммиака в этом плане имеет экономические преимущества в силу следующих причин:

- молекула аммиака содержит достаточно относительно большое количество атомов водорода;
- аммиак легко разлагается на катализаторе с образованием водорода, который может быть использован в транспортных и энергетических установках;
- наличие развитой инфраструктуры производства, хранения и транспортировки аммиака, а также наличие соответствующей нормативной базы по упомянутым вопросам.

В силу этого аммиак все более часто рассматривается как ключевой носитель энергии в энергетических системах будущего. Аммиак, как правило, производится синтезом из H_2 и N_2 , при этом водород может быть получен из ископаемого топлива

¹ DNV. Energy transition outlook-2021 executive summary. A global and regional forecast to 2050. URL: <https://www.hotstart.com/assets/Blog-Images/Article07-Energy-Transition-Terry-Judge-Message/DNV-Energy-Transition-2021.pdf>

с утилизацией образующегося диоксида углерода («голубой» водород) или путем электролиза воды с применением возобновляемых источников энергии («зеленый» водород). В работе [15] излагаются предложения по необходимым исследованиям по использованию NH_3 как носителя энергии, фокусируясь на технологиях синтеза аммиака, его разложения для получения водорода и прямого использования для получения энергии.

Аммиак, помимо его использования в качестве агента для хранения и транспортировки энергии, может быть непосредственно применен для получения энергии в топливных ячейках, двигателях внутреннего сгорания и в газовых турбинах. При этом следует учитывать такие его недостатки, как высокую энергию зажигания, низкую плотность энергии по сравнению с углеводородами, низкую нормальную скорость горения и относительно узкую концентрационную область распространения пламени. В силу этого целесообразно использовать смеси NH_3 с более активными горючими (например, с водородом). Существенным недостатком аммиака является высокая эмиссия окислов азота NO_x при горении, который может быть устранен проведением горения при пониженных концентрациях кислорода. Несгоревший NH_3 и NO_x могут быть удалены из продуктов сгорания с помощью катализаторов, установленных на выхлопной трубе.

Сформулированы направления необходимых исследований, направленных на расширенное использование аммиака в качестве топлива.

1. Производство NH_3 с малым выделением углеродсодержащих веществ, для чего необходимо совершенствование способов удаления диоксида углерода из продуктов реакции или разработка процессов получения NH_3 с помощью ВИЭ.

2. Разработка эффективных крупнотоннажных методов получения водорода из аммиака с очисткой образующегося продукта.

3. Разработка эффективных и надежных методов генерации энергии с помощью аммиака.

4. Технико-экономический анализ применения аммиака в качестве топлива.

5. Общественное признание возможности использования аммиака в качестве топлива с учетом его токсичности.

В работе [16] рассмотрены вопросы хранения и транспортировки водорода в связанном виде с помощью аммиака, что связано с определенными сложностями хранения и транспортировки H_2 в чистом виде. Проводится сравнение физико-химических свойств газообразного (GH_2) водорода, жидкого (LH_2) водорода и аммиака, влияющих на применение этих продуктов. В рассматриваемом случае аммиак получают синтезом из азота и водорода,

полученного электролизом воды с использованием электроэнергии от гидроэлектростанции, расположенной на границе Бразилии и Парагвая и имеющей мощность 14 ГВт. Из этой мощности 15 % потребляется Бразилией и 85 % Парагваем, для которого эта мощность является избыточной. Этот избыток предложено использовать для получения аммиака.

Вопросы транспортировки «зеленой» энергии между странами с использованием аммиака рассмотрены в работе [17] на примере Норвегии, стран Евросоюза и Японии. Норвегия имеет большой потенциал стать значительным производителем и поставщиком «зеленой» энергии, полученной от ВИЭ, но она расположена относительно далеко от крупных рынков сбыта. В случае использования водорода как носителя энергии требуется его морская транспортировка в жидком виде или с помощью жидких органических носителей водорода. В данной работе проведен сравнительный анализ маршрутов доставки водорода из Норвегии на европейские рынки и в Японию. Анализируются такие носители энергии, как жидкий водород и аммиак. В качестве водородного носителя энергии рассмотрен «голубой» водород, произведенный с помощью реформинга природного газа с улавливанием и хранением образующегося диоксида углерода. Произведенный водород может транспортироваться в страны Европы или в Японию в сжиженном или связанном (в виде NH_3). Найдено, что при транспортировке в Японию через Суэцкий канал использование жидкого водорода энергетически выгоднее, чем аммиака с учетом затрат энергии на его разложение для получения водорода. При этом учитывается энергия, затрачиваемая на транспортировку.

В работе [18] дан обзор энергетических проектов, основанных на применении аммиака. Рассмотрены энергетические системы с использованием ветровой и солнечной энергии, размещенные на морских островах с повышенной ветровой и солнечной активностью. Проанализированы различные методы получения NH_3 , при этом удельные энергетические затраты составляют 6,9–11,7 кВт час на 1 кг аммиака в зависимости от метода его получения. Отмечено, что имеются первые экспериментальные предприятия по производству аммиака с помощью ветровых источников энергии в таких странах, как Япония, Великобритания, США, Аргентина, Китай, Швейцария. Использование NH_3 в целях производства энергии происходит либо с помощью сжигания аммиака, либо с помощью топливных ячеек.

Как следует из вышеизложенного, аммиак представляет интерес с точки зрения хранения и транспортировки энергии. Для автомобилей на водородном топливе представляет интерес разработка эффективных технологий получения H_2 из NH_3 с дальнейшей

его очисткой. Изучению этого вопроса посвящена работа [19], в которой дан обзор исследований способов каталитического разложения аммиака для получения водорода. Отмечена высокая эффективность катализатора на основе рутения при температурах около 500 °С.

Выводы

Проанализированы различные аспекты применения аммиака в качестве моторного топлива для различных видов транспорта (автомобильный, морской, речной). Работы в указанном направлении проводятся в различных странах мира, однако до сих пор нет международного нормативного документа, регламентирующего безопасность применения этого вида топлива. Имеются нормативные документы раз-

личных обществ, регулирующие хранение и транспортировку NH_3 , которые не всегда согласуются друг с другом. Регламентированный срок эксплуатации хранилища ограничен величиной 20–25 лет. Безопасные расстояния от мест сброса газа составляют 10–25 м. Спринклерные системы предлагается запускать не от датчиков пламени, а от газосигнализаторов. Системы вентиляции, предназначенные для удаления аварийных утечек аммиака, должны быть отделены от прочих вентиляционных систем. Результаты анализа опубликованных работ свидетельствуют о недостаточной проработанности вопросов пожаровзрывобезопасности. На основе проведенного анализа сформулированы направления дальнейших исследований применения аммиака в качестве моторного топлива для автомобильного и морского транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Шебеко Ю.Н.* Пожарная безопасность заправочной инфраструктуры транспорта на водородном топливе // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 33 (6). С. 56–66. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.56-66. EDN BWDUBB.
2. *Шебеко Ю.Н.* Пожарная безопасность хранения и транспортировки водорода // Пожарная безопасность. 2023. № 1 (100). С. 17–26. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.001. EDN JBMKKQ.
3. *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.
4. *Valera-Medina A., Xiao H., Bowen P.J., Owen-Jones M., David W.I.F.* Ammonia for power // Progress in Energy and Combustion Science. 2018. No. 69. Pp. 63–102. DOI: 10/1016/j.peccs.2018.07.001. EDN VJIYIV.
5. *Farhad S., Hamdullahpur F.* Conceptual design of a novel ammonia-fueled portable solid oxide fuel cell system // Journal of Power Sources. 2010. No. 195 (10). Pp. 3084–3090. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.115. EDN NWUPYF.
6. *Fournier G.G.M., Cumming I.W., Hellgardt K.* High performance direct ammonia solid oxide fuel cell // Journal of Power Sources. 2006. No. 162 (1). Pp. 198–206. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.06.047. EDN KKRTNF.
7. *Ma Q., Peng R., Lin Y., Gao J., Meng G.* A high-performance ammonia-fueled solid oxide fuel cell // Journal of Power Sources. 2006. No. 161 (1). Pp. 95–98. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.04.099. EDN KKRVSJ.
8. *Comotti M., Frigo S.* Hydrogen generation system for ammonia-hydrogen fueled internal combustion engines // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. No. 40 (33). Pp. 10673–10886. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.080
9. *Jang H., Mujeeb-Ahmed 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. No. 287 (2). P. 115751. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115751
10. *Egerer J., Grimm V., Niazmand K., Runge Ph.* The economics of global green ammonia trade — “Shipping Australian wine and sunshine to Germany” // Applied Energy. 2023. No. 334. P. 120662. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120662. EDN KVLQYV.
11. *Majaj K., Kupecki J., Malecha Z., Morawski A.W., Skrzypkiewicz M., Stanlic M. et al.* Ammonia as potential marine fuel : a review // Energy Strategy Reviews. 2022. No. 44. P. 100926. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100926. EDN YVIVAU.
12. *Hansson J., Mansson S., Brynolf S., Grahn M.* Alternative marine fuels: prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders // Biomass and Bioenergy. 2019. No. 126 (33). Pp. 159–173. DOI: 10.1016/biomd.2019.05.008
13. *Afif A., Radenahmad N., Cheok Q., Azad A.K., Shams S., Kim J.H.* Ammonia-fueled fuel cells : a comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. No. 60. Pp. 822–835. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.120. EDN WUWWAD.

14. Rathore S.S., Fini D., Kulkarni A.P., Giddey S., Bismas S. Direct ammonia solid-oxide fuel cells : a review of progress and prospects // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. No. 46 (71). Pp. 35365–35384. DOI: 10.1016.2021.08.092. EDN CIVXOK.
15. Morlanes N., Katikaneni S.P., Paglieri S.N., Harale A., Solami B., Sarathy S.M. et al. A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies // *Chemical Engineering Journal*. 2020. No. 408. P. 127310. DOI: 10.1016/cej.2020.127310. EDN QBPFXP.
16. Rivarolo M., Riveros-Godoy G., Magistri L., Massardo A.F. Clean hydrogen and ammonia synthesis in Paraguay from the Itaipu 14 GW hydroelectric plant // *Chemical Engineering*. 2019. No. 3 (4). P. 87. DOI: 10.3390/chemengineering3040087
17. Ishimoto Y., Voldsund M., Neksa P., Roussanaly S., Berstad D., Gardarsdottir S.O. Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. No. 45 (58). Pp. 32865–32883. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.017. EDN NMWFJF.
18. Rouwenhorst K.H.R., Van den Ham A.G.J., Mul G., Kersten S.R.A. Islanded ammonia power systems: Technology review & conceptual process design // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. No. 114. P. 109339. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109339
19. Lamb K.E., Dolan M.D., Kennedy D.F. Ammonia for hydrogen storage: A review of catalytic ammonia decomposition and hydrogen separation and purification // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. No. 44 (7). Pp. 3580–3593. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.024. EDN WVXWOF.

REFERENCES

1. Shebeko Yu.N. Fire safety of hydrogen fuel transport refueling infrastructure. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 34(6):56-66. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.56-66. EDN BWDUBB. (rus).
2. Shebeko Yu.N. Fire safety of hydrogen storage and transportation. *Fire Safety*. 2023; 1(100):17-26. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.001. EDN JBMKKQ. (rus).
3. Gordienko D.M., Shebeko Yu.N. Fire and explosion safety of hydrogen energetics facilities. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 2:7-12. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-2-7-12. EDN FYZNQV. (rus).
4. Valera-Medina A., Xiao H., Owen-Jones M., David W.I.F., Bowen P.J. Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2018; 69:63-102. DOI: 10/1016/j.peccs.2018.07.001. EDN VJIYIV.
5. Farhad S., Hamdullahpur F. Conceptual design of a novel ammonia-fueled portable solid oxide fuel cell system. *Journal of Power Sources*. 2010; 195(10):3084-3090. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.115. EDN NWUPYF.
6. Fournier G.G.M., Cumming I.W., Hellgardt K. High performance direct ammonia solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*. 2006; 162(1):198-206. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.06.047. EDN KKRNTF.
7. Ma Q., Peng R., Lin Y., Gao J., Meng G. A high-performance ammonia-fueled solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*. 2006; 161(1):95-98. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.04.099. EDN KKRVSJ.
8. Comotti M., Frigo S. Hydrogen generation system for ammonia-hydrogen fueled internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015; 40(33):10673-10886. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.080.
9. Jang H., Mujeeb-Ahmed 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(2):115751. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115751
10. Egerer J., Grimm V., Niazmand K., Runge P. The economics of global green ammonia trade — “Shipping Australian wind and sunshine to Germany”. *Applied Energy*. 2023; 334:120662. DOI: 10.1016/j.aplenergy.2023.120662. EDN KVLQV.
11. Majaj K., Kupecki J., Malecha Z., Morawski A.W., Skrzypekiewicz M., Stanclik M. et al. Ammonia as potential marine fuel : a review. *Energy Strategy Reviews*. 2022; 44:100926. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100926. EDN YVIVAU.
12. Hansson J., Mansson S., Brynolf S., Grahn M. Alternative marine fuels: prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass Bioenergy*. 2019; 126(33):159-173. DOI: 10.1016/biomdi-oe.2019.05.008
13. Afif A., Radenahmad N., Cheok Q., Azad A.K., Shams S., Kim J.H., Azad A.K. Ammonia-fed fuel cells : a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 60:822-835. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.120. EDN WUWAD.
14. Rathore S.S., Fini D., Kulkarni A.P., Giddey S., Bismas S. Direct ammonia solid-oxide fuel cells : a review of progress and prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46(71):35365-35384. DOI: 10.1016.2021.08.092. EDN CIVXOK.
15. Morlanes N., Katikaneni S.P., Paglieri S.N., Harale A., Solami B., Sarathy S.M. et al. A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies. *Chemical Engineering Journal*. 2020; 408:127310. DOI: 10.1016/cej.2020.127310. EDN QBPFXP.

16. Rivarolo M., Riveros-Godoy G., Magistri L., Massardo A.F. Clean hydrogen and ammonia synthesis in Paraguay from the Itaipu 14 GW hydroelectric plant. *Chemical Engineering*. 2019; 3(4):87. DOI: 10.3390/chemengineering3040087
17. Ishimoto Yu., Voldsund M., Neksa P., Roussanaly S., Berstad D., Gardarsdottir S.O. Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45(58):32865-32883. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.017. EDN NMWFJF.
18. Rouwenhorst K.H.R., Van den Ham A.G.J., Mul G., Kersten S.R.A. Islanded ammonia power systems: Technology review & conceptual process design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 114:109339. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109339
19. Lamb K.E., Dolan M.D., Kennedy D.F. Ammonia for hydrogen storage: A review of catalytic ammonia decomposition and hydrogen separation and purification. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019; 44(7):3580-3593. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.024. EDN WVXWOF.

Поступила 19.08.2025, после доработки 20.08.2025;

принята к публикации 21.08.2025

Received August 19, 2025; Received in revised form August 20, 2025;

Accepted August 21, 2025

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_shebeko1@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_shebeko1@mail.ru