



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГИИ В СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ

Чичиров А.А., Разакова Р.И., Гайнутдинов Ф.Р., Гайнутдинова Д.Ф.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
khimiya_kgeu@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Водород обладает невероятной способностью накапливать энергию. Безопасное и эффективное хранение водорода определяет практическое применение газа в качестве топлива и является актуальной проблемой, требующей подробного изучения. ЦЕЛЬ. Провести обзор современных стационарных технологий хранения водородной энергии, проанализировать последние мировые тенденции и разработки в этой области. Определить факторы, способствующие повышению эффективности и безопасности систем хранения водорода на водородных заправочных станциях. Исследовать термодинамику и кинетику стационарного хранения водородной энергии. МЕТОДЫ. Основаны на анализе литературных данных, термодинамических расчетах оценки энергоемкости и безопасности систем хранения водорода, а также кинетического анализа процессов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Систематизированы исследования в области хранения водородной энергии в стационарных системах, выявлены тенденции развития технологий. Описаны основные технические характеристики стационарного хранения водорода, проанализированы теплофизические свойства газа, осуществлены термодинамические расчеты с целью оценки эффективности технологий хранения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Выявлен значительный прогресс в области безопасного хранения водорода, обусловленный развитием водородных технологий, а также разработкой новых материалов для его хранения. Исследование термодинамических и кинетических аспектов показало, что оптимизация этих параметров существенно повышает эффективность и надежность стационарных систем хранения водорода.

Ключевые слова: водородная энергия; технологии хранения водорода; материалы для хранения водорода; композитные сосуды под давлением; безопасность хранения водорода.

Благодарности: Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки и Минцифры России в рамках исполнения условий соглашений № 075-15-2021-1087 и № 075-15-2021-1178 от 30.09.2021 в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Для цитирования: Чичиров А.А., Разакова Р.И., Гайнутдинов Ф.Р., Гайнутдинова Д.Ф. Современные технологии хранения водородной энергии в стационарных системах: эффективность и безопасность // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 135-155. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-135-155.

MODERN HYDROGEN ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES IN STATIONARY SYSTEMS: EFFICIENCY AND SAFETY

Chichirov A.A., Razakova R.I., Gainutdinov F.R., Gainutdinova D.F.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
khimiya_kgeu@mail.ru

Abstract: RELEVANCE. Hydrogen possesses an exceptional ability to store energy. Safe and efficient hydrogen storage determines the practical use of this gas as fuel and represents an urgent problem requiring detailed investigation. AIM. To review modern stationary hydrogen energy storage technologies, analyze recent global trends and developments in this field, identify factors contributing to improved efficiency and safety of hydrogen storage systems at

hydrogen refueling stations, and investigate thermodynamics and kinetics of stationary hydrogen energy storage. **METHODS.** Based on literature data analysis, thermodynamic calculations of energy capacity and safety assessment of hydrogen storage systems, as well as kinetic analysis of relevant processes. **RESULTS.** Research in the field of stationary hydrogen energy storage has been systematized, technology development trends identified, and main technical characteristics of stationary hydrogen storage described. Thermodynamic calculations have been performed to evaluate storage technology efficiency. **CONCLUSION.** Significant progress in safe hydrogen storage has been identified, driven by advancements in hydrogen technologies and the development of new hydrogen storage materials. Investigation of thermodynamic and kinetic aspects has shown that optimizing these parameters significantly improves efficiency and reliability of stationary hydrogen storage systems.

Keywords: hydrogen energy; hydrogen storage technologies; hydrogen storage materials; composite pressure vessels; hydrogen storage safety.

Acknowledgments: The results were obtained with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation in accordance with the terms of agreements No. 075-15-2021-1087 and No. 075-15-2021-1178 of September 30, 2021, as part of the implementation of the Priority 2030 strategic academic leadership program.

For citation: Chichirov A.A., Razakova R.I., Gainutdinov F.R., Gainutdinova D.F. Modern hydrogen energy storage technologies in stationary systems: efficiency and safety. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 135-155. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-135-155.

Введение (Introduction)

Уникальные физико-химические свойства водорода выделяют его среди других видов топлива. Способность водорода накапливать энергию продемонстрирована расчетами – 1 кг газа содержит около 120 МДж (1 кВт·ч = 3,6 МДж; или 33,33 кВт·ч) энергии, и в два раза превышает энергоемкость большинства традиционных видов топлива (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Содержание энергии в топливе*
Energy content in fuel*

Топливо	Энергетическое содержание, МДж/кг		Примечание (российские виды топлива)
	Qн	Qв	
Газообразный водород	120,0	141,9	проекты Росатома, НОВАТЭК
Природный газ (магистральный)	48,0-50,0	53,0-55,0	Основное топливо РФ (ГОСТ 5542-2017)
Сжиженный природный газ (СПГ)	50,0-52,0	55,0-58,0	Экспортный продукт («Ямал СПГ», «Арктик СПГ 2»)
Уголь (Кузбасс)	22,0-26,0	25,0-27,5	Основной энергетический уголь РФ
Дизельное топливо (ЕВРО-5)	42,78	45,76	ГОСТ 32511-2013, типичные марки
Бензин	42,5-44,0	45,0-46,5	Наиболее массовая марка, ГОСТ 32513-2013
Жидкий водород	120,04	141,77	Пилотные проекты (РЖД, «Ростех»)
Этанол	26,95	29,84	Ограниченнное применение – биотопливо, химия

*Значения Qн и Qв для природного газа, угля, бензина и дизельного топлива приведены в виде диапазонов, отражающих различия в составе и свойствах различных типов и сортов этих топлив. Значения для водорода и этанола приведены для условно чистых веществ

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Несмотря на высокую удельную энергию водорода на единицу массы, его низкая плотность энергии на единицу объема (около 10 МДж/м³) затрудняет создание компактных, экономичных и безопасных решений для хранения с высокой плотностью энергии. Будущая жизнеспособность технологических решений хранения водородной энергии зависит от множества факторов, включая безопасность, экологию, нормативные требования и экономические соображения. Безопасное внедрение этих технологий требует дополнительных исследований и разработок. Они варьируются от более глубокого количественного анализа утечек водорода, ограничений, связанных с хрупкостью материалов, хранения и транспортировки водорода в очень больших объемах до соображений, связанных с оборудованием и его использованием, как в случае с газовыми турбинами и электролизерами.

Всестороннее понимание этапа хранения энергии, включая связанные с ним энергетические потребности и соображения плотности, имеет решающее значение для успешной интеграции водорода в энергетические системы. Актуальность представленной работы связана с внедрением водородных заправочных станций (ВЗС), для которых важна разработка эффективных и безопасных систем хранения.

Целью настоящего исследования является анализ проблем хранения водорода на стационарных объектах (с акцентом на ВЗС) и сравнительная оценка технологических решений. Для достижения цели поставлены задачи: систематизировать технические и эксплуатационные проблемы при хранении водорода; провести сравнительный анализ технологий хранения (ёмкость, безопасность, применимость для ВЗС); определить факторы, способствующие повышению эффективности и безопасности систем хранения водорода на водородных заправочных станциях; выявить взаимосвязь конструктивных решений и рисков утечек/деградации материалов, а также сформулировать критерии выбора решений для разных секторов (транспорт, промышленность, энергосистемы).

В связи с этим, полезно рассмотреть вызовы и проблемы хранения водорода, а также возможные технологические решения, продемонстрированные на рисунке 1.

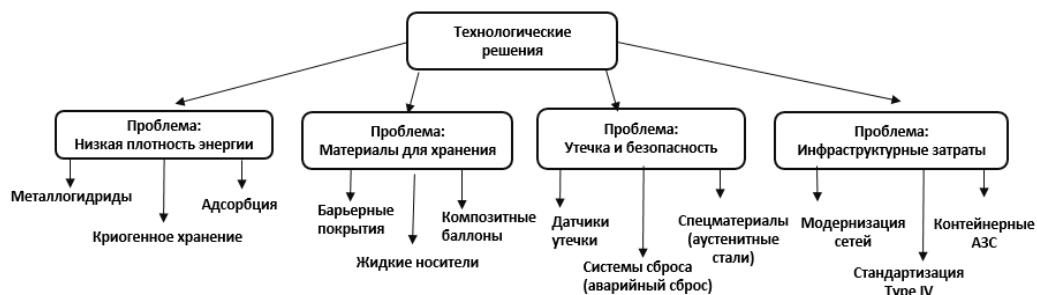


Рис. 1. Проблемы хранения водорода и возможные технологические решения
Fig. 1. Hydrogen storage challenges and possible technological solutions

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследователи работают над улучшением хранения водородной энергии, изучая условия хранения, конструкцию резервуара, изоляционный материал и потери газа, чтобы решить указанные проблемы [1, 2].

Следует отметить, что большинство исследовательских работ фокусируется на узких типах хранилищ, игнорируя сравнительный анализ их преимуществ, недостатков и применимости, кроме того отсутствует системный подход к оценке потенциала технологий для разных секторов (транспорт, промышленность, энергосети).

Литературный обзор (Literature Review)

На протяжении многих лет технологически развитые страны мира ставили хранение водорода во главу угла своих исследований [3]. Согласно литературным данным, исследователи обращают внимание на разнообразные подходы к хранению водорода, и классифицируют их на стационарные и нестационарные системы, каждая из которых имеет свои уникальные преимущества и области применения (рис. 2).



Рис. 2. Классификация методов хранения водорода *Fig. 2. Classification of hydrogen storage methods*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Авторы [4-6] рассматривают состояние крупномасштабного хранения водорода в мире с использованием физических и химических методов хранения. Физическое хранение водорода заключается в его удержании в сосудах в различных физических состояниях, таких как сжатый газ, криогенная и криогенно-сжатая формы. Сравнение методов хранения водорода для стационарных и нестационарных систем, их применение в различных контекстах, отображено в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Сравнение систем хранения водорода для различных приложений
Comparison of hydrogen storage systems for various applications

Типы системы хранения	Стационарные системы хранения	Нестационарные системы хранения
Сжатый водород	Большие баллоны или резервуары под высоким давлением до 700 бар на промышленных объектах и ВЭС	Легкие композитные баллоны в транспортных средствах
Жидкие криогенные системы (около 253°C)	Изолированные резервуары для хранения жидкого водорода на объектах, где требуется хранение больших объемов газа	Криогенные танки в специализированных транспортных средствах
Металлогидридные системы	Хранение в виде соединений с металлами на промышленных объектах, выделяют водород при нагревании	Металлогидридные картриджи для переносных устройств и небольших транспортных средств
Углеродные наноматериалы	Используются в исследовательских и промышленных установках	Разрабатываются для мобильных приложений
Химические соединения	Аммиак или жидкие водородные органические носители (LOHC) для стационарного хранения и переработки	LOHC и аммиак для мобильного хранения и использования в транспорте

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Водород можно хранить в течение длительного времени благодаря его стабильным химическим свойствам. Десятилетие интенсивных и масштабных исследований привело к выявлению нескольких потенциальных систем хранения водорода, хронология развития которых представлена в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Хронология разработки технологий хранения водорода
Chronology of hydrogen storage technology development

Технология	Описание достижений
Сжатие водорода (газообразное состояние)	Первые газгольдеры для хранения водорода в газообразном состоянии 2000-е г. Усовершенствование до 700 бар (компримированный газ) [7]
Криогенное хранение (сжиженный водород, -253°C)	1980-1990-е гг. Активные исследования и пилотные проекты по криогенному хранению водорода 1997-2010 гг. Оптимизация технологий, снижение энергозатрат (криогенные резервуары для аэрокосмической отрасли) [8, 9]

Металлогидриды	1980-1990-е гг. Первые попытки хранения газообразного топлива на основе металлоорганической каркасной структуры (МОК), базовые исследования (сплавы на основе Mg, Fe, Ti) [10-13] 2013-2015 гг. Разработка гибридных систем и улучшенных сплавов (нанокристаллические структуры) [14, 15]
Адсорбционные наноматериалы	2017-2018 гг. Прорыв в углеродных материалах (графен, активированный уголь) [16, 17]
Жидкие органические водородные носители (ЛОHC) и аммиак	2010 г. Активные исследования LOHC (носители на основе толуола, пергидрола) [18, 19] 2015-2020 гг. исследование каталитического разложения аммиака ($\text{NH}_3 \rightarrow \text{H}_2 + \text{N}_2$) [20]
Подземные хранилища	1970 г. – соляные каверны 2020 г. эксперименты с жидким водородом в нанопорах и подземными резервуарами для промышленных масштабов [21, 22]
Гибридные системы хранения водорода	2017-2018 гг. Пилотные проекты гибридных систем (комбинация сжатия и охлаждения), повышение плотности хранения и снижение энергозатрат за счёт синергии двух методов [23]

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Хранение сжатого водорода.

Сжатый газообразный водород для хранения является наиболее популярным и широко используемым методом из-за его технической простоты и быстрой кинетики заполнения и высвобождения. Объёмная плотность водорода при использовании этого метода очень низкая, если давление при хранении водорода ниже 20 МПа. Повышение давления при хранении может увеличить плотность водорода, но, в свою очередь, значительно увеличит стоимость резервуара и потребление энергии для сжатия, что описано в статье исследователей [24].

В зависимости от применения, газообразный водород сжимают до 200-1000 бар. Для стационарных установок, где весовая и объёмная энергоёмкость не критичны, обычно используют 200-400 бар. При нормальных условиях водород имеет низкую массовую плотность (0.089 кг/m^3) и низкую объёмную плотность энергии ($10,68 \text{ МДж/m}^3$). При повышении давления до 700 бар объёмная плотность массы (концентрация) возрастает до $\sim 42 \text{ кг/m}^3$, объёмная плотность энергии достигает $\sim 5020 \text{ МДж/m}^3$. На рисунке 3 представлена массовая плотность водорода при хранении в газообразном при разном давлении, а также жидким и твердом состояниях.

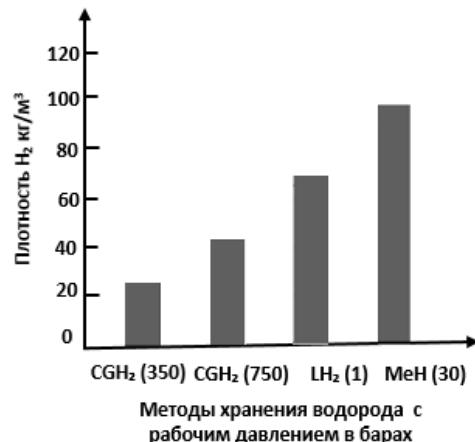


Рис. 3. Плотность водородной энергии: Fig. 3. Hydrogen energy density: CGH₂ – compressed CGH₂ – сжатый газ; LH₂ – криогенная жидкость; gas; LH₂ – cryogenic liquid; MeH – metal hydrides MeH – металлогидриды

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Энергозатраты на сжатие водорода составляют примерно 3% от его низшей теплоты сгорания при сжатии до 350 бар и 10% при сжатии до 700 бар [25]. Кроме того, при повышении уровня давления при хранении, исследователи отмечают возникающие проблемы с безопасностью [26, 27].

В литературе обсуждаются преимущества и ограничения технологий сжатия водорода: механических, электрохимических, гидравлических и сжатие на основе сорбции [28] (рис. 4).

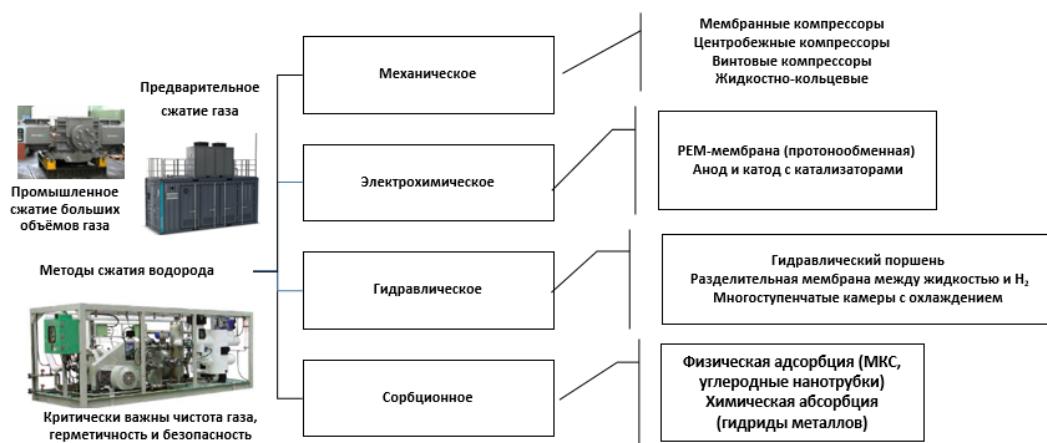


Рис. 4. Технологии сжатия водорода

Fig. 4. Hydrogen Compression Technologies

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Резервуар газообразного хранения водорода – прочный металлический контейнер из стали или композитных материалов, оборудованный системами контроля давления и температуры, а также предохранительными клапанами обеспечения безопасности. Внутри резервуара находятся изоляционные материалы минимизации теплопередачи (рис. 5). Для промышленного применения, где используется или регулируется большое количество водорода, применяется резервуар типа I. Этот тип может выдерживать давление от 150 до 300 бар и является самым дешёвым на рынке. Резервуары типа II в основном используются для стационарного применения благодаря их высокой прочности, которая позволяет хранить газ при очень высоком давлении. Резервуары типов III и IV предназначены для переносного применения, где важна экономия веса [29].

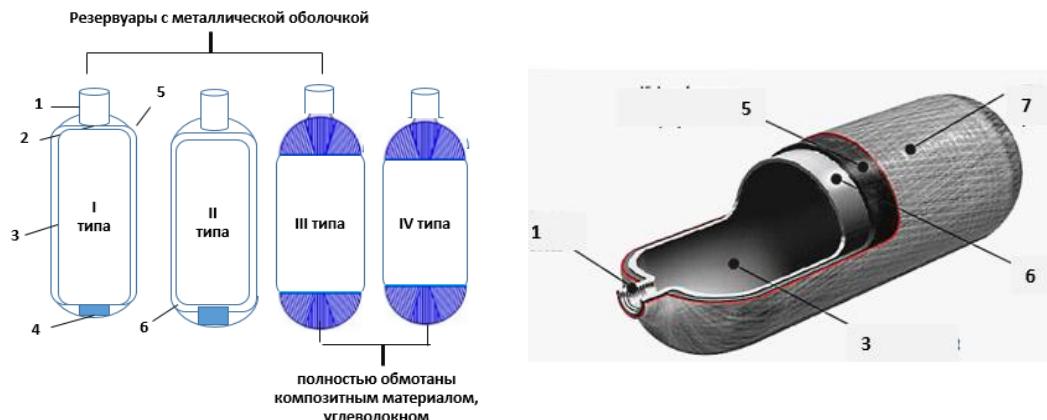


Рис. 5. Резервуары газообразного хранения водорода: 1 – клапан; 2 – горловина; 3 – область для размещения водорода; 4 – заглушка; 5 – внешняя оболочка; 6 – внутренняя оболочка

Fig. 5. Gaseous hydrogen storage tanks: 1 – valve; 2 – neck; 3 – area for placing hydrogen; 4 – plug; 5 – outer shell; 6 – inner shell

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полимеры являются важнейшими материалами для систем хранения водорода под высоким давлением, особенно в резервуарах для хранения водорода типа IV и V. Авторы [29] указывают на серьёзные проблемы для полимерных материалов в экстремальных условиях эксплуатации при давлении до 875 бар и температурах от -40°C до 85°C.

Хранение жидкого водорода.

Водород сжижают, а затем хранят в криогенных резервуарах при температуре 20 К (-253,15°C). Метод обеспечивает более высокий уровень безопасности, чем хранение в сжатом виде, благодаря более низкому давлению при хранении (атмосферному) и более высокой плотности хранения и энергии, 70,9 кг/м³ и 8508 МДж/м³ соответственно. Авторы [30] отмечают, что требуемая энергия для процесса сжижения является существенным недостатком технологии, так как на него приходится 35% энергозатрат H₂.

Эффективность криогенного хранения имеет некоторые трудности. Поддерживать температуру водорода на уровне 20 К сложно, и потери при испарении являются одним из

существенных недостатков технологии. В статье [31] показано, что для небольших резервуаров потери водорода могут составлять около 4% в день. Использование резервуаров для хранения жидкого гелия уменьшит потери до 0,04% в день, что сделает технологию жизнеспособной [32]. Резервуары для хранения жидкого гелия обладают невероятно низкими теплопотерями, благодаря многослойной изоляции и азотному охлаждению, которое в них используется.

Из-за высокой сложности системы стоимость технологии является ещё одним препятствием для внедрения. Жидкий водород является хорошо вариантом, но в основном для крупномасштабных применений, например, в космической отрасли [33].

Так как основные риски, связанные с безопасностью этой технологии, обусловлены высоким уровнем испарения, ведутся исследования направленные на улучшение теплоизоляции резервуаров для снижения потерь от испарения. Наиболее интересным методом изоляции является пассивная тепловая защита, включающая использование различных типов композитных материалов, многослойных изоляционных материалов, экранов с паровым охлаждением и вакуума [34]. Изоляционная конструкция резервуара для хранения жидкого водорода параллельного типа представлена на рисунке 6.

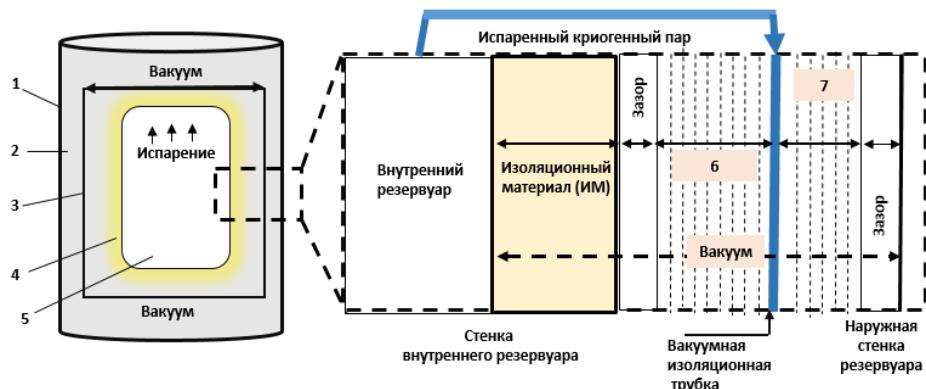


Рис. 6. Многослойная конструкция резервуара *Fig. 6. Multilayer hydrogen tank structure*
для водорода

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Описание слоев: 1 – внешний слой из алюминиевой оболочки (защита от механических повреждений); 2 – многослойная изоляция с использованием аэрогеля; 3 – барьерный слой из углеволокна; 4 – изоляционный материал; 5 – внутренний слой из полимерной подложки; 6 – внутренний многослойный изоляционный материал; 7 – внешний многослойный изоляционный материал.

Размер, форма и теплоизоляция резервуара влияют на скорость испарения водорода из резервуара для хранения жидкого водорода из-за утечки тепла. Сферическая форма теоретически является идеальной, поскольку у неё наименьшее соотношение площади поверхности к объёму, а напряжение и деформация могут равномерно распределяться по стенкам резервуара. Однако из-за сложностей в производстве таких резервуаров они стоят дорого [35]. При такой конструкции, обладающей высокой вместимостью, скорость испарения значительно снижается. Потери при кипении из-за утечек тепла зависят от соотношения площади поверхности к объёму.

Хранение водорода в твёрдом состоянии.

Хранение водорода в твёрдом состоянии – это метод, при котором атомы или молекулы водорода прочно связываются с материалами. Хранение водорода на основе материалов – перспективный метод, так как объёмная плотность водорода в материалах обычно превышает 100 кг $\text{H}_2 \text{ m}^{-3}$ [36]. Таким образом, можно использовать относительно небольшой резервуар для хранения большого количества водорода.

В литературе широко обсуждаются многие виды материалов для хранения водорода, включая обычные гидриды металлов (МН) или сплавы, комплексные гидриды, материалы на основе углерода, металлоорганические каркасы (МОК) и др. Разрабатываются передовые методы образования газовых гидратов в статистических условиях хранения водорода [37]. Авторы [38] вносят свой вклад в дискуссию исследуя кинетику образования гидратов водорода в статических системах без использования дополнительных механических методов.

В настоящее время практическое применение нашли лишь некоторые категории

материалов для хранения водорода, такие как сплавы AB5-типа на основе редкоземельных металлов, сплавы AB-типа или AB2-типа на основе титана [39]. Исследования по-прежнему направлены на изучение кинетики сорбции водорода в твердотельных системах хранения, так как этот процесс сильно зависит от скорости реакции гидрирования/дегидрирования материалов для хранения. По мнению авторов, [40] подача водорода с достаточной скоростью является технической проблемой для твердотельного метода хранения.

Ни один способ хранения в идеальных условиях не может считаться оптимальным для всех сфер применения, и каждый способ требует интенсивной работы, чтобы стать приемлемым для использования в энергетике. При оценке эффективных вариантов хранения водорода в стационарных условиях необходимо рассматривать целостную систему, объединяющую экономические, экологические, социальные и технические аспекты (рис. 7). Каждый критерий разбит на несколько подкriterиев, чтобы отразить многогранность устойчивых показателей, оценивающих различные технологии хранения водорода.

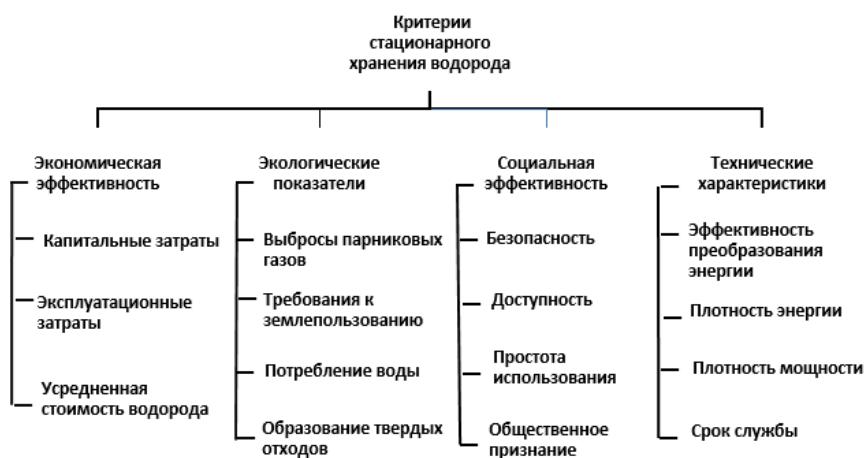


Рис. 7. Критерии эффективности стационарного хранения водородной энергии

Fig. 7. Efficiency criteria for stationary hydrogen energy storage

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Процесс принятия решений в отношении устойчивых стационарных систем хранения водорода требует баланса между этими многогранными критериями эффективности. Если разложить каждый критерий на конкретные, измеримые компоненты, процесс выбора технологии хранения водорода станет более прозрачным, всеобъемлющим и надёжным, что облегчит разработку и внедрение действительно устойчивых решений [41]. Методы хранения водорода с высокой плотностью (сжижение или сжатие под высоким давлением), требуют значительных энергетических затрат как на хранение, так и на транспортировку. Эти затраты следует учитывать при оценке общей эффективности и экологической устойчивости водорода в качестве энергоносителя. С учетом последних достижений и ожидаемого широкого применения водорода можно предположить, что сжатие газообразного водорода остается наиболее перспективным методом, особенно для средних и малых масштабов использования.

Исследования также направлены на решение проблем безопасности хранения водорода (табл. 4). Большинство авторов [42] указывают, что наиболее безопасным методом является хранение водорода в твердом виде.

Таблица 4
Table 4

Сравнительный анализ безопасности хранения водорода
Comparative Analysis of Hydrogen Storage Safety

Тип хранения	Риски, аспекты безопасности
Сжатый водород	H_2 находится под высоким давлением в резервуарах, случайное высвобождение газообразного водорода может привести к пожару или взрыву. Резервуары спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы выдерживать высокое давление, и их необходимо регулярно проверять на наличие утечек

Жидкий водород	Жидкий H_2 быстро испаряется, если сосуд для хранения повреждён; вызывает сильные холодовые ожоги и легко воспламеняется при взаимодействии с источником возгорания. Резервуары для жидкого водорода состоят из двух металлических резервуаров, разделённых вакуумной рубашкой, заполненной изоляционным материалом
Металлогидридные системы	Твердые вещества поглощают и выделяют H_2 . Металлогидриды вступают в бурную реакцию с влажным воздухом. Резервуары для хранения металлогидридов имеют вес от 250 до 300 кг, что в четыре раза больше, чем резервуары для бензина.
Химическое хранение гидридов	Химические гидриды легко воспламеняются или взрываются и могут выделять токсичные побочные продукты при разложении или взаимодействии с водой. Процесс высвобождения водорода из гидридов требует контроля температуры и давления, что добавляет потенциальные риски в эксплуатации таких систем
Хранение на основе углерода	Водород накапливается в порах углеродного материала, создавая потенциальную опасность взрыва при быстром высвобождении водорода. Опасности включают возможность утечек водорода из-за его высокой подвижности, риск воспламенения и взрывов при утечках, потенциальную деградацию адсорбционных свойств материалов, вред здоровью из-за возможного выделения частиц углерода

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Развитию и коммерциализации водородной энергетики в настоящее время препятствует проблема структурной целостности, связанная с резервуарами для хранения водорода. Вследствие этого значительный объём исследований посвящен материалам и конструкциям, минимизирующими риски, связанные с хранением водорода. Существенное технологическое препятствие разработки стационарных систем хранения водорода – отсутствие подходящих материалов для резервуаров хранения. В статьях авторов [43, 44] представлен всесторонний анализ текущих тенденций исследований и обсуждаются будущие направления в этой области. Продолжается изучение передовых материалов для хранения водорода, включая гидриды металлов, материалы на основе углерода, металлоорганические каркасы (МОК) и наноматериалы. В таблице 5 приведены характеристики материалов, используемых в различных стационарных методах хранения водородной энергии.

Таблица 5
Table 5

Сравнение материалов для хранения водорода
Comparison of materials for hydrogen storage

Материал конструкции	Характеристики
Композитные резервуары (углеволокно)	Хранение газообразного H_2 (высокое давление). Высокая прочность, малый вес, устойчивость к коррозии; высокая стоимость, сложность ремонта; применяются в транспорте, на водородных заправках
Аустенитная нержавеющая сталь	Хранение жидкого H_2 (криогенный). Устойчивость к низким температурам, прочность, риск водородного охрупчивания; промышленные хранилища
Металл-органические каркасы (МОК)	Адсорбционное хранение H_2 . Высокая плотность хранения, низкое давление, требуют охлаждения, дорогие материалы; лабораторные системы, малые объемы
Слоистые конструкции (Al/полимеры)	Газообразный/жидкий H_2 . Устойчивость к утечкам, гибкость; ограниченный срок службы при высоких температурах
Наноуглеродные структуры	Твердотельное (гидриды). Высокая безопасность, стабильность, низкая скорость загрузки/выгрузки; энергетические системы

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Более 60% рассмотренных исследований посвящены гидридам металлов и сплавам для хранения водорода [45]. Проблемы, с которыми сталкиваются в настоящее время при

хранении водорода, подчёркивают существующие ограничения в материалах для хранения водорода, а также необходимость повышения ёмкости и кинетики хранения.

В литературе мало данных об эффективности системы хранения водорода, утечек газа для сжатого водорода и металлического гидрида. Исследователи [46] используют для моделирования испарения, точного определения массового расхода и температуры отходящего газа в резервуарах – коммерческое программное обеспечение CFD ANSYS FLUENT (2020 R2). Исследователями разработаны комплексные модели резервуара для хранения жидкого водорода с различными параметрами изоляции и условиями эксплуатации. Модели имитируют поведение водорода в резервуаре в зависимости от времени, спрогнозировано время бездействия и скорость испарения. Важные результаты параметрического анализа заключаются в следующем. Во-первых, существует оптимальное количество слоев многослойной изоляции, во-вторых, распорки из шёлковой сетки обладают хорошими изоляционными свойствами, достигающими $1,01 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и наконец, многократное открытие и закрытие вентиляционного клапана в определённом диапазоне давления значительно сокращает потери водорода во время вентиляции, уменьшая массу испарения за 6 ч на 92,9%.

Существуют системы мониторинга технического состояния резервуаров для хранения водорода на основе гибкой сенсорной технологии для управления состоянием конструкций для хранения водорода [47]. Сначала обобщаются наиболее распространенные способы повреждения, вызванные различными факторами в течение срока службы для резервуаров для хранения водорода четырех типов. Ожидается, что гибкая сенсорная технология сыграет решающую роль в будущем при создании систем мониторинга технического состояния резервуаров для хранения водорода.

В России исследования в области утечек водорода при стационарном хранении актуальны, но крайне недостаточно освещены в литературе. Несмотря на то, что этот прогресс обнадеживает, существуют сложные проблемы, такие как неконтролируемые термодинамические изменения и низкая кинетика процессов сорбции/десорбции водорода при его хранении, которые необходимо тщательно изучить.

Для дальнейшего успешного развития этой области науки и техники необходимо, чтобы насущные потребности в прикладных исследованиях и глубокое понимание основных принципов находились в сбалансированном соотношении друг с другом. Обзор текущих исследований в области хранения водорода предоставил ценную информацию и способствует глубокому пониманию технологических вызовов и перспективных решений, необходимых для разработки эффективных и безопасных систем хранения, которые могут поддерживать переход к устойчивой энергетике и быть использованы на водородных заправочных станциях (ВЗС).

Материалы и методы (Materials and methods)

В настоящем исследовании рассматриваются хранение сжатого водорода с точки зрения эффективности применения на ВЗС. Данный вариант выбран после анализа литературы и многоаспектного сравнения альтернатив хранения водорода по следующим категориям: эффективность хранения, энергоёмкость, стоимость, безопасность, кинетика и долговечность. Анализ показывает, что сжатый водород является лучшей альтернативой для ВЗС.

Эффективность водородной системы зависит от термодинамических процессов, связанных с хранением и передачей топлива. Состояние работы установок для хранения газообразного водорода моделируется уровнем водорода в накопительном оборудовании

(HST (Hydrogen Storage Tank) – ёмкость для хранения водорода) S_t^{HST} (м^3) и количеством

водорода, закачиваемого $H_t^{\text{HST}-\text{CH}}$ или отбиаемого $H_t^{\text{HST}-\text{DIS}}$ за период, а также предельным диапазоном уровней хранения водорода, как показано в уравнениях 1 и 2:

$$S_{t-1}^{\text{HST}} = S_t^{\text{HST}} + H_t^{\text{HST}-\text{CH}} \eta^{\text{HST}-\text{CH}} \Delta t - \frac{H_t^{\text{HST}-\text{DIS}}}{\eta^{\text{HST}-\text{DIS}}} \Delta t \quad (1)$$

$$\underline{S_t^{\text{HST}}} \leq \overline{S_t^{\text{HST}}} \leq \overline{S_t^{\text{HST}}} \quad (2)$$

где $H_t^{\text{HST-CH}}$ и $H_t^{\text{HST-DIS}}$ – это скорости закачки и отбора водорода в установках хранения, $\text{м}^3/\text{ч}$, $\eta^{\text{HST-CH}}$ и $\eta_t^{\text{HST-DIS}}$ – коэффициенты эффективности закачки и отбора, S_t^{HST} и S_t^{HST} – минимальный и максимальный диапазон уровня хранения (м^3), а Δt – временной интервал (ч). Для резервуаров хранения водорода или других относительно небольших установок режимы закачки и отбора могут переключаться мгновенно, что обычно моделируется бинарными переменными и ограничениями-неравенствами с временным разрешением 30 мин или 1 час, как показано в уравнениях 3-5, где $\delta_t^{\text{HST-CH}}$ и $\delta_t^{\text{HST-DIS}}$ – бинарные переменные, обозначающие действия закачки/отбора, а $H_t^{\text{HST-CH}}$ и $H_t^{\text{HST-DIS}}$ – максимальные значения скоростей закачки/отбора ($\text{м}^3/\text{ч}$).

$$0 \leq H_t^{\text{HST-CH}} \leq \delta_t^{\text{HST-CH}} \overline{H_t^{\text{HST-CH}}} \quad (3)$$

$$0 \leq H_t^{\text{HST-DIS}} \leq \delta_t^{\text{HST-DIS}} \overline{H_t^{\text{HST-DIS}}} \quad (4)$$

$$\delta_t^{\text{HST-CH}} + \delta_t^{\text{HST-DIS}} \leq 1 \quad (5)$$

Модель (1)-(5) основана на стандартном подходе к управлению хранилищами энергии, где бинарные переменные исключают одновременную зарядку и разрядку, а ограничения по ёмкости и мощности соответствуют международной практике моделирования водородных систем (в том числе на ВЭС) [52]. Данная модель используются для управления энергосистемами, где водородные хранилища взаимодействуют с источниками (электролизерами) и потребителями (топливными элементами). Ограничения S_{\min}/S_{\max} предотвращают переполнение или опустошение резервуаров. Бинарные переменные отражают физическую невозможность одновременной зарядки и разрядки.

Термодинамические параметры хранения сжатого водорода.

Для повышения энергоэффективности хранения водорода применяется многоступенчатое сжатие. В большинстве работ [48] предлагается трёхступенчатая система, моделирующая хранение газообразного водорода в три этапа:

1. Адиабатическое дросселирование при заполнении резервуара. При поступлении водорода из магистрали высокого давления в резервуар происходит падение давления (дросселирование). Так как, для водорода при комнатной температуре коэффициент Джоуля-Томсона отрицателен, температура газа снижается.

2. Теплопередача – выравнивание температуры газа с температурой стенок резервуара.

3. Изотермическое сжатие – повышение давления за счет подачи дополнительных порций газа. Процесс дросселирования считается мгновенным и адиабатическим (без теплообмена с внешней средой), а работа расширения/сжатия не передается внешним устройствам. Параметр, определяющий изменение температуры при расширении, – это коэффициент Джоуля-Томсона, зависящий от температуры и давления. С помощью коэффициента Джоуля-Томсона определяется температура сжатого водорода после его поступления в резервуары.

На рисунке 8 представлена Т- S диаграмма трехступенчатого сжатия газообразного водорода от 1 бар до 360 бар с промежуточным охлаждением. Обозначены термодинамические точки процесса: 1 – исходное состояние (1 бар); 2 – состояние после первой ступени изоэнтропического сжатия (температура определяется по таблицам [49]); 3 – состояние после промежуточного охлаждения (процесс 2-3 при $p=\text{const}$). Точки 4, 5, 6, 7 – аналогично для последующих ступеней сжатия и охлаждения (процессы 4-5, 6-7 при $p=\text{const}$). Конечная точка – состояние после последней ступени сжатия (360 бар).

Линии изоэнтропического сжатия (1-2, 3-4, 5-6) позволяют сравнить реальный процесс с идеальным.

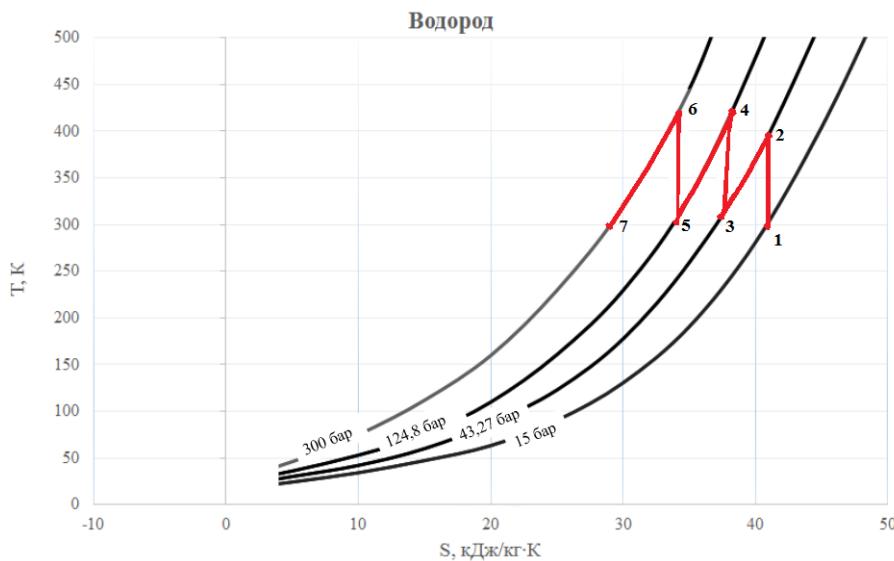


Рис. 8. T-S диаграмма сжатия газообразного водорода от 1 бар до 360 бар. Термодинамические точки на диаграмме T-S

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

T-S диаграмма используется для оценки термодинамической эффективности и потерь при сжатии [49].

Эффективность хранения водорода при разных давлениях – это показатель, отражающий соотношение полезной энергии, получаемой из накопленного водорода, к энергии, затраченной на его сжатие и хранение при различных уровнях давления. Чем выше эффективность, тем меньше потерь энергии при хранении и последующем использовании водорода. Энергия, затрачиваемая на повышение давления, зависит от начального уровня. Сжать от 350 до 700 бар проще, чем от 1 до 350 бар, если водород сразу производить под давлением, можно снизить энергозатраты на последующее сжатие до 700 бар. Для снижения энергозатрат важно: использовать компрессоры с высоким КПД, оптимизировать диапазоны давлений, применять материалы, устойчивые к водородной хрупкости, так как эффективность хранения водорода под давлением ограничена его физико-химическими свойствами.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Для водородной заправочной станции контейнерного типа, производительностью 8,5 кг Н₂/сутки [50] предложен стационарный комплекс для хранения, сжатия и распределения водорода.

Комплекс выполняет полный цикл работы: заправка баллонов → сжатие газа → хранение → подача потребителю. Газ из внешнего источника (электролизера для водорода) (рис. 9), под давлением на выходе 0,5 бар (что соответствует первой ступени сжатия), поступает в мембранный двухступенчатый компрессор для сжатия водорода Ковинт КСВД-М 1-5/5-400-Н2 (рис. 10).



Рис. 9. Генератор водорода HyClever Pro-2.0

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Хотя теоретическая модель предполагает трехступенчатое сжатие, для ВЗС малой производительности 8,5 Н₂ кг/сутки, выбран двухступенчатый мембранный компрессор Kovint KСВД-М. Его конструкция предотвращает утечки водорода и исключает контакт газа с маслом, что критично для безопасности. При сжатии от 0,5 до 400 бар учтен эффект Джоуля-Томсона: расчетное падение температуры на входе составляет ~12 К (расчет по [48]).



Рис. 10. Мембранный компрессор Kovint KСВД-М 1-5/5-400-H2 Fig. 10. Kovint KСВД-М 1-5/5-400-H2 diaphragm compressor

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Компрессор сжимает газ до нужного давления 400 бар. Сжатие газа осуществляется за счет колебаний гибкой мембранны (изготавливается из материалов, устойчивых к водороду, композитов). Газ находится в изолированной камере, что исключает загрязнение маслом и утечки. Водород – самый легкий и летучий газ, способный проникать через микротрещины и вызывать охрупчивание металлов. Поэтому в таких компрессорах используются: двойные мембранны с датчиками разрыва, вакуумная продувка для удаления остаточного Н₂ из камеры, системы охлаждения для предотвращения перегрева [51].

Сжатый газ через рампу распределяется по баллонам. Водород хранится в баллонах до момента использования. Используется система газовых баллонов БМКБ 4-80-40 80 л – 4 шт, комплект оборудования, предназначенный для хранения и подачи сжатого альтернативного топлива для транспортных средств (автомобилей, автобусов, спецтехники) (табл. 6). На основании расчетов по уравнениям (1)-(5) определено, что выбранный комплект баллонов (4×80 л при давлении до 400 бар) обеспечивает необходимый запас водорода для бесперебойной работы станции в течение суток, а также соответствует требованиям по безопасности и эксплуатационной гибкости. Управление скоростью отбора по уравнениям (3)-(4) гарантирует, что массовый расход не превысит 3,6 кг/мин. Применение данной модели позволило корректно подобрать объём и количество баллонов, и оптимально управлять процессами закачки и отбора водорода в реальном режиме времени, что важно для эффективной работы водородной заправочной станции.

Таблица 6
Table 6

Комплект газового оборудования для хранения водорода на ВЗС

Hydrogen storage gas equipment set for hydrogen refueling station (HRS)

Компоненты системы	Характеристики
Баллоны по 80 л (4 шт)	Емкости из прочного материала, рассчитанные на хранение БМКБ под высоким давлением (обычно 400 бар). Компактные и легкие, что важно для монтажа на транспортных средствах
Трубка стальная в оплётке	Гибкий, но прочный элемент для подключения баллонов к системе. Оплётка обеспечивает защиту от механических повреждений и перепадов давления
Заправочный вентиль	Устройство для подключения системы к заправочной станции. Через него баллоны заполняются сжатым газом

Комплект метизов	Крепежные элементы (болты, гайки, шайбы) для монтажа баллонов и других компонентов системы на раму или кузов транспортного средства
Баллонный вентиль	Управляет подачей газа из баллонов. Обычно оснащен предохранительным клапаном для сброса избыточного давления
Редуктор понижения давления	Снижает давление газа с 400 бар до рабочего уровня (например, 8-10 бар), необходимого для двигателя или оборудования
Шланг высокого давления с наконечником	Соединяет редуктор с двигателем или потребителем газа, обеспечивая герметичную подачу топлива

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Все компоненты системы рассчитаны на работу под высоким давлением и проходят строгие испытания. Стальные трубы в оплетке и предохранительные клапаны минимизируют риски утечек или разрывов.

При необходимости газ из баллонов через рампу подается к конечному оборудованию. Газовая рампа (наполнительно-разрядная) служит «узлом коммутации»: через нее происходит наполнение баллонов газом и его раздача потребителям. Основные компоненты газовой (наполнительной и разрядной) рампы отображены в таблице 7 и на рисунке 11.

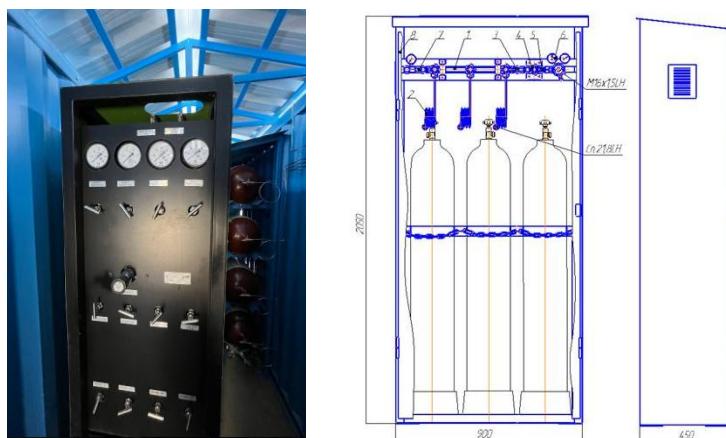


Рис. 11. Газовая рампа для водорода для ВЗС контейнерного типа (полигон КГЭУ)

Fig. 11. Hydrogen gas manifold for container-type hydrogen refueling station (KSPEU test site)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 7
Table 7

Назначение компонентов газовой (наполнительной и разрядной) рампы

Purpose of components of the gas manifold (filling and discharge)

Компоненты	Назначение
Стойка (рама)	Конструкция из металла, на которой закреплены баллоны, трубопроводы и арматура. Обеспечивает устойчивость и безопасное размещение оборудования
Баллоны для водорода	Высокопрочные емкости, рассчитанные на хранение водорода под высоким давлением (400 бар). Изготавливаются из композитных материалов с защитным
Трубопроводы (трубы)	Система труб из материалов, устойчивых к водороду (нержавеющая сталь марки 316L). Предназначены для транспортировки водорода между баллонами, заправочной станцией и потребителем
Наполнительная и разрядная арматура	Наполнительная часть: клапаны, соединители и редукторы для подключения к источнику водорода (электролизеру или заправочной станции). Разрядная часть: вентили, регуляторы давления и предохранительные клапаны для контролируемой подачи водорода к потребителю
Система безопасности	Датчики утечки водорода, аварийные клапаны, огнезащитные элементы. Водород крайне летуч и взрывоопасен, поэтому безопасность – важный аспект конструкции

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При эксплуатации системы строго соблюдаются нормативы (ISO 16111, ГОСТ Р 56352-2015) и проводится регулярная проверка герметичности, так как водород способен диффундировать через многие материалы и вызывать охрупчивание металлов. Все компоненты должны быть сертифицированы для H_2 из-за его летучести и взрывоопасности. Такая система требует профессионального проектирования и монтажа, особенно для взрывоопасных газов. Важные моменты при интеграции системы: совместимость компонентов. Материалы должны быть устойчивы к газу, давление на выходе компрессора должно соответствовать максимальному давлению баллонов.

Заключение (Conclusion)

Водород является носителем энергии и должен быть интегрирован в энергетическую цепочку с высоким уровнем эффективности. Проведенный анализ актуальных исследований и инженерных разработок в области стационарных систем хранения подчеркивает значимость исследований в области безопасности ВЗС для развития водородной экономики в транспортной индустрии.

Предложенная система хранения сжатого водорода превосходит криогенные и твердотельные методы по совокупности критерии для ВЗС малой мощности (8,5 кг/сутки): затраты на сжатие 8,9 кВт·ч/кг ниже, чем на сжижение (35% от энергии H_2); отсутствие рисков испарения (в отличие от LH_2) и медленной кинетики десорбции (в отличие от металлогидридов); простота интеграции с электролизером, минимальные требования к обслуживанию.

Система спроектирована в соответствии с требованиями к ВЗС контейнерного типа (полигон КГЭУ), включая: регулярный мониторинг герметичности; использование материалов, устойчивых к водородному охрупчиванию (нержавеющая сталь 316L, композиты); автоматическую блокировку при утечках. Безопасность обеспечена применением сертифицированных компонентов: баллонов БМКБ 4-80-40 (давление 400 бар), стальных трубок в оплётке, предохранительных клапанов и датчиков утечки, соответствующих ГОСТ Р 56352-2015 и ISO 16111.

Водород – перспективная замена ископаемому топливу, но его внедрение зависит от прорывов в технологиях хранения. Оптимальное решение должно быть экономичным и адаптивным под разные секторы экономики, а вопросы безопасности остаются важными при разработке и внедрении технологий хранения водорода. Надежные системы мониторинга и предотвращения утечек, а также создание стандартов безопасности, являются необходимыми шагами для обеспечения безопасной эксплуатации стационарных систем хранения водорода.

Литература

1. Bhandari R., Adhikari N. A comprehensive review on the role of hydrogen in renewable energy systems // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 82. P. 923–951. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.004.
2. Фатеев В.Н., Алексеева О.К., Коробцев С.В. и др. Проблемы аккумулирования и хранения водорода // Kimya Problemleri. 2018. №4(16). С. 453–483.
3. Rampai M.M., Mtshali C.B., Seroka N.S., Khotseng L. Hydrogen production, storage, and transportation: recent advances // RSC Advances. 2024. Vol. 14, №10. P. 6699–6718.
4. Хохонов А.А., Шайхатдинов Ф.А., Бобровский В.А., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Чичиров А.А., Рыбина Е.О. Технологии хранения водорода. Водородные накопители энергии // Успехи в химии и химической технологии. 2020. №12. С. 47–52.
5. Тарасов Б.П., Потоцкий М.В., Яртыс В.А. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулирования водорода // Российский химический журнал. Проблемы водородной энергетики. 2006. Т. 50, №6. С. 34–48.
6. Алексеева О.К., Козлов С.И., Самсонов Р.О., Фатеев В.Н. Системы хранения водорода // Транспорт на альтернативном топливе. 2009. №4(10). С. 68–74.
7. Hassan I.A., Ramadan H.S., Saleh M.A., Hissel D. Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 149. 111311. doi: 10.1016/j.rser.2021.111311.
8. Афанасьев Н.А., Оконский И.С., Трофимов В.В., Матвеев А.П. Создание и эксплуатация систем получения, хранения, транспортировки и использования жидкого водорода в промышленных масштабах // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 3(59). С. 127–132.
9. Agyekum E.B., Nutakor C., Khan T., Adegbeye O.R., Odoi-Yorke F., Okonkwo P.C. Analyzing the research trends in the direction of hydrogen storage – A look into the past, present and future for the various technologies // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 74. P. 259–275. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.004.

10.1016/j.ijhydene.2024.05.399.

10. AlZohbi G., Almoaikel A., AlShuhail L. An overview on the technologies used to store hydrogen // Energy Reports. 2023. Vol. 9, Suppl. 11. P. 28–34. doi: 10.1016/j.egyr.2023.08.072.

11. Тарасов Б.П., Бурнашева В.В., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. Методы хранения водорода и возможности использования металлогидридов // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2005. № 12(32). С. 14–37.

12. Дружинин П.В., Коричев А.А. К вопросу хранения водорода // Технико-технологические проблемы сервиса. 2009. № 3(9). С. 51–53.

13. Лотоцкий М.В., Дэвидс М.В., Фокин В.Н. и др. Водородаккумулирующие материалы на основе сплавов титана с железом (обзор) // Теплоэнергетика. 2024. № 3. С. 85–101. doi: 10.56304/S0040363624030032.

14. Mulky L., Srivastava S., Lakshmi T., Sandadi E.R., Gour S., Thomas N.A., Priya S.S., Sudhakar K. An overview of hydrogen storage technologies – Key challenges and opportunities // Materials Chemistry and Physics. 2024. Vol. 325. 129710. doi: 10.1016/j.matchemphys.2024.129710.

15. Kytömaa H., Wechsung A., Dimitrakopoulos G., Cook N., Jaimes D., Hur I.Y., Faraji S. Industry R&D needs in hydrogen safety // Applications in Energy and Combustion Science. 2024. Vol. 18. 100271. doi: 10.1016/j.jaecs.2024.100271.

16. Nagar R., Srivastava S., Hudson S.L., Amaya S.L., Tanna A., Sharma M., Achayalingam R., Sonkaria S., Khare V., Srinivasan S.S. Recent developments in state-of-the-art hydrogen energy technologies – Review of hydrogen storage materials // Solar Compass. 2023. Vol. 5. 100033. doi: 10.1016/j.solcom.2023.100033.

17. Ковалев В.Л., Якунчиков А.Н. Анализ адсорбции водорода массивами углеродных нанотрубок // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2009. № 6. С. 157–160.

18. Sun H., Wang Z., Meng Q., White S. Advancements in hydrogen storage technologies: Enhancing efficiency, safety, and economic viability for sustainable energy transition // International Journal of Hydrogen Energy. 2025. Vol. 105. P. 10–22. doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.176.

19. Preuster P., Papp C., Wasserscheid P. Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): toward a hydrogen-free hydrogen economy // Accounts of Chemical Research. 2017. Vol. 50. P. 74–85. doi: 10.1021/acs.accounts.6b00474.

20. Farazmand M., Saadat Z., Sameti M. Above-ground hydrogen storage: A state-of-the-art review // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 90. P. 1173–1205. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.319.

21. Saadat Z., Farazmand M., Sameti M. Integration of underground green hydrogen storage in hybrid energy generation // Fuel. 2024. Vol. 371, Pt. A. 131899. doi: 10.1016/j.fuel.2024.131899.

22. Amirthan T., Perera M.S.A. The role of storage systems in hydrogen economy: A review // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2022. Vol. 108. 104843. doi: 10.1016/j.jngse.2022.104843.

23. Sikiru S., Oladosu T.L., Amosa T.I., Olutoki J.O., Ansari M.N.M., Abioye K.J., Rehman Z.U., Soleimani H. Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 56. P. 1152–1182. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.186.

24. Алексин Е.Н. Хранение газообразного водорода в баллонах под давлением. Определение потерь водорода вследствие диффузии через стенки баллона // Перспективы науки. 2010. № 6(8). С. 63–70.

25. Федотов А.В., Ковалев Д.А. Способы хранения и аккумулирования водорода // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68, № 3(44). С. 78–85. doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-3-78-85.

26. Шарифов А., Мирсаидов У.М., Гайбуллаева З.Х., Гадоев Т.Х. Энергоёмкие способы хранения водорода // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 2024. № 1(194). С. 64–72.

27. Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность водородных автозаправочных станций // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29, № 4. С. 42–50. doi: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50.

28. Дресвянников А.Ф., Ситников С.Ю. Современные аспекты аккумулирования водорода. Обзор // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. № 3–4. С. 72–84.

29. Zhu X.Y., Lee J.H., Kim K.-H., Lim C.-H., Lee S.H. Coupled CFD modeling and thermal analysis of multi-layered insulation structures in liquid hydrogen storage tanks for various vapor-cooled shields // Case Studies in Thermal Engineering. 2024. Vol. 63. 105317.

30. Liu H., Xu L., Han Y., Chen X., Sheng P., Wang S., Huang X., Wang X., Lu C., Luo H., He S., Lan Z., Guo J. Development of a gaseous and solid-state hybrid system for stationary hydrogen energy storage // Green Energy & Environment. 2021. Vol. 6, № 4. P. 528–537.

31. Shoushtari S., Jafari A., Namdar H., Khoozan D. Modeling, qualification, and quantification of hydrogen leakage in multilayered reservoirs // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 91. P. 636–648. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.328.
32. Reddi K., Elgowainy A., Rustagi N. и др. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, № 34. P. 21855–21865.
33. Chi G., Xu S., Yu D., Wang Z., He Z., Wang K., Zhou Q. A brief review of structural health monitoring based on flexible sensing technology for hydrogen storage tank // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 80. P. 980–998.
34. Li D., Liu H., Zhang C., Chen Y. Insulation optimization of liquid hydrogen storage tank using dynamic analysis // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 110. P. 588–597. doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.263.
35. Hafner T., Macher J., Brandstätter S., Trattner A. Advancing hydrogen storage: Development and verification of a high-pressure permeation test setup for polymeric barrier materials // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 96. P. 882–891. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.215.
36. Osman A.I., Ayati A., Farrokhi M., Khadempir S., Rajabzadeh A.R., Farghali M., Krivoshapkin P., Tanhaei B., Rooney D.W., Yap P.-S. Innovations in hydrogen storage materials: Synthesis, applications, and prospects // Journal of Energy Storage. 2024. Vol. 95. 112376. doi: 10.1016/j.est.2024.112376.
37. Гошовский С.В., Зурьян А.В. Обзор технологий искусственного получения газогидратов // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2019. №1(55). С. 97–113.
38. Lee W., Kim K., Lee J., Yun-Ho A. et al. Perspectives on facilitating natural gas and hydrogen storage in clathrate hydrates under a static system // Green Chemistry. 2024. Vol. 26. P. 7552–7578.
39. Kamran M., Turzyński M. Exploring hydrogen energy systems: A comprehensive review of technologies, applications, prevailing trends, and associated challenges // Journal of Energy Storage. 2024. Vol. 96. 112601. doi: 10.1016/j.est.2024.112601.
40. Кустов Л.М., Каленчук А.Н., Богдан В.И. Системы аккумуляции, хранения и выделения водорода // Успехи химии. 2020. Т. 89, № 9. С. 897–916. doi: 10.1070/RCR4940.
41. Acar C., Haktanır E., Temur G.T., Beskese A. Sustainable stationary hydrogen storage application selection with interval-valued intuitionistic fuzzy AHP // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 49, Pt. D. P. 619–634. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.081.
42. Chizubem B., Subbiah A., Izuchukwu O.C., Musa K.S. Real-time monitoring using digital platforms for enhanced safety in hydrogen facilities – Current perspectives and future directions // International Journal of Hydrogen Energy. 2025. Vol. 98. P. 487–499. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.128.
43. Джепаров Д.В., Денисламова Е.С. Металлорганические каркасы на основе гетероциклических лиганд – новые материалы для хранения водорода // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2022. № 4. С. 76–92. doi: 10.15593/2224-9400/2022.4.06.
44. Яковлев А.И., Федоренко Г.М., Щекин А.Р. Некоторые аспекты на пути изучения металлического водорода как основного энергоносителя возобновляемого топлива XXI века // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 7(111). С. 24–29.
45. Al-Shetwi M., Mansur M., Muttaqi K.M., Dong Z.Y., Blaabjerg F. Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47, №39. P. 17285–17312. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.208.
46. Zhang T., Qadrdan M., Wu J., Couraud B., Stringer M., Walker S., Hawkes A., Allahham A., Flynn D., Pudjianto D., Dodds P., Strbac G. A systematic review of modelling methods for studying the integration of hydrogen into energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025. Vol. 208. 114964. doi: 10.1016/j.rser.2024.114964.
47. Quintanilla P., Elhalwagy A., Duan L., Soltani S.M., Lai C.S., Foroudi P., Huda M.N., Nandy M. Artificial intelligence and robotics in the hydrogen lifecycle: A systematic review // International Journal of Hydrogen Energy. 2025. Vol. 113. P. 801–817.
48. Beck H.-P., Klaas A.-K., Klaas C. Conception of a new 4-quadrant hydrogen compressed air energy storage power plant with an integrated electrolyzer // Energy Reviews. 2024. Vol. 3, № 3. 100074. doi: 10.1016/j.enrev.2024.100074.
49. Esposito L., van der Wiel M., Acar C. Hydrogen storage solutions for residential heating: A thermodynamic and economic analysis with scale-up potential // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 79. P. 579–593.
50. Чичиров А.А., Разакова Р.И., Гайнутдинов Ф.Р., Гайнутдинова Д.Ф. Водородная заправочная станция: обзор технологического состояния использования водородного топлива //

Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 2. С. 149–165. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-2-149-165.

51. Singh U.R., Bhogilla S.S., Sou H., Itoko S., Tolj I. Performance evaluation of hybrid compressors for hydrogen storage and refuelling stations // Journal of Energy Storage. 2025. Vol. 114, Pt. B. 115778.

52. Carrion, M., & Arroyo, J. M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem // IEEE Transactions on Power Systems. 2006. Vol. 21, №. 3. 1371–1378

Авторы публикации

Чичиров Андрей Александрович – д-р хим. наук, профессор кафедры «Автономная распределенная энергетика и химия» (АРЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: 0000-0002-9116-0370. khimiya_kgeu@mail.ru

Разакова Регина Иришатовна – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: 0009-0002-1732-3335. reginarazakova@yandex.ru

Гайнутдинов Фарит Ринатович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: 0009-0006-0381-1345. EBKKK@yandex.ru

Гайнутдинова Диляра Фаритовна – канд. хим. наук, доцент кафедры «Автономная распределенная энергетика и химия» (АРЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. ORCID: 0009-0000-7477-9860. gaynutdinova2018@bk.ru

References

1. Bhandari R, Adhikari N. A comprehensive review on the role of hydrogen in renewable energy systems. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;82:923–951. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.004.
2. Fateev VN, Alekseeva OK, Korobtsev SV, et al. Problemy akkumulirovaniya i khraneniya vodoroda. Kimya Problemleri. 2018;16(4):453–483. (In Russ).
3. Rampai MM, Mtshali CB, Seroka NS, Khotseng L. Hydrogen production, storage, and transportation: recent advances. RSC Advances. 2024;14(10):6699–6718.
4. Khokhonov AA, Shaikhatdinov FA, Bobrovskii VA, Agarkov DA, Bredikhin SI, Chichirov AA, Rybina EO. Tekhnologii khraneniya vodoroda. Vodorodnye nakopiteli energii. Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii. 2020;12:47–52. (In Russ).
5. Tarasov BP, Pototskii MV, Yartys VA. Problema khraneniya vodoroda i perspektivy ispol'zovaniya gidridov dlya akkumulirovaniya vodoroda. Rossiiskii khimicheskii zhurnal. Problemy vodorodnoi energetiki. 2006;50(6):34–48. (In Russ).
6. Alekseeva OK, Kozlov SI, Samsonov RO, Fateev VN. Sistemy khraneniya vodoroda. Transport na al'ternativnom toplive. 2009;10(4):68–74. (In Russ).
7. Hassan IA, Ramadan HS, Saleh MA, Hissel D. Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021;149:111311. doi: 10.1016/j.rser.2021.111311.
8. Afanas'ev NA, Okonskii IS, Trofimov VV, Matveev AP. Sozdanie i ekspluataciya sistem polucheniya, khraneniya, transportirovki i ispol'zovaniya zhidkogo vodoroda v promyshlennykh masshtabakh. Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2008;59(3):127–132. (In Russ).
9. Agyekum EB, Nutakor C, Khan T, Adegbeye OR, Odoi-Yorke F, Okonkwo PC. Analyzing the research trends in the direction of hydrogen storage – A look into the past, present and future for the various technologies. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;74:259–275. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.399..
10. AlZohbi G, Almoaike A, AlShuhail L. An overview on the technologies used to store hydrogen. Energy Reports. 2023;9(Suppl. 11):28–34. doi: 10.1016/j.egyr.2023.08.072.
11. Tarasov BP, Burnasheva VV, Lototskii MV, Yartys VA. Metody khraneniya vodoroda i vozmozhnosti ispol'zovaniya metallogidridov. Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2005;32(12):14–37. (In Russ).

12. Druzhinin PV, Korichev AA. K voprosu khraneniya vodoroda. Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa. 2009;9(3):51–53. (In Russ).
13. Lototskii MV, Devids MV, Fokin VN, et al. Vodorodakkumuliruyushchie materialy na osnove splavov titana s zhelezom (obzor). Thermal Engineering. 2024;(3):85–101. (In Russ). doi: 10.56304/S0040363624030032.
14. Mulky L, Srivastava S, Lakshmi T, Sandadi ER, Gour S, Thomas NA, Priya SS, Sudhakar K. An overview of hydrogen storage technologies – Key challenges and opportunities. Materials Chemistry and Physics. 2024;325:129710. doi: 10.1016/j.matchemphys.2024.129710.
15. Kytömaa H, Wechsung A, Dimitrakopoulos G, Cook N, Jaimes D, Hur IY, Faraji S. Industry R&D needs in hydrogen safety. Applications in Energy and Combustion Science. 2024;18:100271. doi: 10.1016/j.jaecs.2024.100271.
16. Nagar R, Srivastava S, Hudson SL, Amaya SL, Tanna A, Sharma M, Achayalingam R, Sonkaria S, Khare V, Srinivasan SS. Recent developments in state-of-the-art hydrogen energy technologies – Review of hydrogen storage materials. Solar Compass. 2023;5:100033. doi: 10.1016/j.solcom.2023.100033.
17. Kovalev VL, Yakunchikov AN. Analiz adsorbsii vodoroda massivami uglerodnykh nanotrubok. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza. 2009;(6):157–160. (In Russ).
18. Sun H, Wang Z, Meng Q, White S. Advancements in hydrogen storage technologies: Enhancing efficiency, safety, and economic viability for sustainable energy transition. International Journal of Hydrogen Energy. 2025;105:10–22. doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.176.
19. Preuster P, Papp C, Wasserscheid P. Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): toward a hydrogen-free hydrogen economy. Acc Chem Res. 2017;50:74–85. doi: 10.1021/acs.accounts.6b00474.
20. Farazmand M, Saadat Z, Sameti M. Above-ground hydrogen storage: A state-of-the-art review. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;90:1173–1205. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.319.
21. Saadat Z, Farazmand M, Sameti M. Integration of underground green hydrogen storage in hybrid energy generation. Fuel. 2024;371(Pt A):131899. doi: 10.1016/j.fuel.2024.131899.
22. Amirthan T, Perera MSA. The role of storage systems in hydrogen economy: A review. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2022;108:104843. doi: 10.1016/j.jngse.2022.104843.
23. Sikiru S, Oladosu TL, Amosa TI, Olutoki JO, Ansari MNM, Abioye KJ, Rehman ZU, Soleimani H. Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;56:1152–1182. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.186.
24. Aleksin EN. Khranenie gazoobraznogo vodoroda v ballonakh pod davleniem. Opredelenie poter' vodoroda vsledstvie diffuzii cherez stenki ballona. Perspektivy nauki. 2010;8(6):63–70. (In Russ).
25. Fedotov AV, Kovalev DA. Sposoby khraneniya i akkumulirovaniya vodoroda. Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK. 2021;68(3):78–85. (In Russ). doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-3-78-85.
26. Sharifov A, Mirsaidov UM, Gaibullaeva ZKh, Gadoev TKh. Energoemkie sposoby khraneniya vodoroda. Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Tadzhikistana. Otdelenie fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh i tekhnicheskikh nauk. 2024;194(1):64–72. (In Russ).
27. Shebeko YuN. Pozharnaya bezopasnost' vodorodnykh avtozapravochykh stantsii. Pozharovzryvobezopasnost'. 2020;29(4):42–50. (In Russ). doi: 10.22227/PVB.2020.29.04.42-50.
28. Dresvyannikov AF, Sitnikov SYu. Sovremennye aspeky akkumulyrovaniya vodoroda. Obzor. Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems. 2006;(3–4):72–84. (In Russ).
29. Zhu XY, Lee JH, Kim KH, Lim CH, Lee SH. Coupled CFD modeling and thermal analysis of multi-layered insulation structures in liquid hydrogen storage tanks for various vapor-cooled shields. Case Studies Therm Eng. 2024;63:105317.
30. Liu H, Xu L, Han Y, Chen X, Sheng P, Wang S, Huang X, Wang X, Lu C, Luo H, He S, Lan Z, Guo J. Development of a gaseous and solid-state hybrid system for stationary hydrogen energy storage. Green Energy Environ. 2021;6(4):528–537.
31. Shoushtari S, Jafari A, Namdar H, Khoozan D. Modeling, qualification, and quantification of hydrogen leakage in multilayered reservoirs. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;91:636–648. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.328.
32. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, et al. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. 2017;42(34):21855–21865.
33. Chi G, Xu S, Yu D, Wang Z, He Z, Wang K, Zhou Q. A brief review of structural health monitoring based on flexible sensing technology for hydrogen storage tank. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;80:980–998.
34. Li D, Liu H, Zhang C, Chen Y. Insulation optimization of liquid hydrogen storage tank using dynamic analysis. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;110:588–597. doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.263.

35. Hafner T, Macher J, Brandstätter S, Trattner A. Advancing hydrogen storage: Development and verification of a high-pressure permeation test setup for polymeric barrier materials. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;96:882–891. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.215.
36. Osman AI, Ayati A, Farrokhi M, Khadempir S, Rajabzadeh AR, Farghali M, Krivoshapkin P, Tanhaei B, Rooney DW, Yap PS. Innovations in hydrogen storage materials: Synthesis, applications, and prospects. *Journal of Energy Storage*. 2024;95:112376. doi: 10.1016/j.est.2024.112376.
37. Goshovskii SV, Zuryan AV. Obzor tekhnologii iskusstvennogo polucheniya gazogidratov. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*. 2019;55(1):97–113. (In Russ).
38. Lee W, Kim K, Lee J, Yun-Ho A, et al. Perspectives on facilitating natural gas and hydrogen storage in clathrate hydrates under a static system. *Green Chemistry*. 2024;26:7552–7578.
39. Kamran M, Turzyński M. Exploring hydrogen energy systems: A comprehensive review of technologies, applications, prevailing trends, and associated challenges. *Journal of Energy Storage*. 2024;96:112601. doi: 10.1016/j.est.2024.112601.
40. Kustov LM, Kalenchuk AN, Bogdan VI. Sistemy akkumulyatsii, khraneniya i vydeleniya vodoroda. *Russian Chemical Reviews*. 2020;89(9):897–916. (In Russ). doi: 10.1070/RCR4940.
41. Acar C, Haktanır E, Temur GT, Beskese A. Sustainable stationary hydrogen storage application selection with interval-valued intuitionistic fuzzy AHP. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;49(Pt D):619–634. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.081.
42. Chizubem B, Subbiah A, Izuchukwu OC, Musa KS. Real-time monitoring using digital platforms for enhanced safety in hydrogen facilities – Current perspectives and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025;98:487–499. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.128.
43. Dzheparov DV, Denislamova ES. Metallorganicheskie karkasy na osnove geterociklicheskih ligand – novye materialy dlya hraneniya vodoroda. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 2022;(4):76–92. (In Russ). doi: 10.15593/2224-9400/2022.4.06.
44. Yakovlev AI, Fedorenko GM, Shchekin AR. Nekotorye aspekty na puti izucheniya metallicheskogo vodoroda kak osnovnogo energonosatelya vozobnovlyaemogo topliva XXI veka. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2012;111(7):24–29. (In Russ).
45. Al-Shetwi M, Mansur M, Muttaqi KM, Dong ZY, Blaabjerg F. Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(39):17285–17312. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.208.
46. Zhang T, Qadrdan M, Wu J, Couraud B, Stringer M, Walker S, Hawkes A, Allahham A, Flynn D, Pudjianto D, Dodds P, Strbac G. A systematic review of modelling methods for studying the integration of hydrogen into energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025;208:114964. doi: 10.1016/j.rser.2024.114964.
47. Quintanilla P, Elhalwagy A, Duan L, Soltani SM, Lai CS, Foroudi P, Huda MN, Nandy M. Artificial intelligence and robotics in the hydrogen lifecycle: A systematic review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025;113:801–817.
48. Beck HP, Klaas AK, Klaas C. Conception of a new 4-quadrant hydrogen compressed air energy storage power plant with an integrated electrolyzer. *Energy Reviews*. 2024;3(3):100074. doi: 10.1016/j.enrev.2024.100074.
49. Esposito L, van der Wiel M, Acar C. Hydrogen storage solutions for residential heating: A thermodynamic and economic analysis with scale-up potential. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;79:579–593.
50. Chichirov AA, Razakova RI, Gainutdinov FR, Gainutdinova DF. Vodorodnaya zapravochnaya stantsiya: obzor tekhnologicheskogo sostoyaniya ispol'zovaniya vodorodnogo topliva. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2024;26(2):149–165. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-2-149-165.
51. Singh UR, Bhogilla SS, Sou H, Itoko S, Tolj I. Performance evaluation of hybrid compressors for hydrogen storage and refuelling stations. *Journal of Energy Storage*. 2025;114(Pt B):115778.
52. Carrion M, Arroyo JM. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006;21(3):1371–1378.

Authors of the publication

Andrey A. Chichirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: 0000-0002-9116-0370. khimiya_kgeu@mail.ru

Regina I. Razakova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: 0009-0002-1732-3335. reginaraarakova@yandex.ru

© Чичиров А.А., Разакова Р.И., Гайнутдинов Ф.Р., Гайнутдинова Д.Ф.

Farit R. Gainutdinov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID: 0009-0006-0381-1345. EBKKK@yandex.ru*

Dilyara F. Gainutdinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID: 0009-0000-7477-9860. gaynutdinova2018@bk.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено

27.03.2025 г.

Отредактировано

03.07.2025 г.

Принято

24.07.2025 г.