

ВОДОРОДНАЯ ЗАПРАВОЧНАЯ СТАНЦИЯ: ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

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.* В современном мире, стоящем на пороге глобальных климатических изменений, актуальность поиска и внедрения альтернативных источников энергии обретает особую значимость. Водородная энергетика является одним из наиболее обнадеживающих направлений, предлагая революционный подход к декарбонизации различных отраслей промышленности. Развитие технологий, связанных с производством, хранением и использованием водорода, расширяет новые горизонты для создания устойчивой и экологически чистой энергетической инфраструктуры. *ЦЕЛЬ.* Провести обзор технологического состояния водородных заправочных станций (ВЗС), проанализировать последние мировые тенденции и разработки в этой области, выявить факторы, способствующие повышению эффективности функционирования компонентов ВЗС. Представить термодинамические принципы использования водородного топлива, обозначить основные проблемы, связанные с необходимостью широкого внедрения водородной инфраструктуры и определить потенциальные направления для их решения. Разработать предложения по созданию модульной компоновки водородной станции контейнерного типа, позволяющей гибко подходить к организации водородной инфраструктуры с возможностью быстрого масштабирования и адаптации под различные условия эксплуатации. *МЕТОДЫ.* Использован метод прототипирования автономной водородной заправочной станции, проведен анализ литературных данных, математические расчеты термодинамических процессов, протекающих в компонентах ВЗС. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Изучены и систематизированы исследования в области технологического состояния станций, выявлены тенденции развития. Описаны основные компоненты, участвующие в работе водородной станции. Исследованы термодинамические процессы использования водородного топлива, способствующие значительному уменьшению энергопотребления водородных станций. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Водородная станция сочетает эффективное преобразование водорода в электричество, минимизацию выбросов, энергонезависимость, гибкость хранения энергии. Сделаны выводы на основе термодинамики процессов с учетом специфики температурных режимов российских регионов, для снижения затрат и увеличения энергоэффективности использования водородных топливных систем. Оптимальной платформой для последующих модернизаций и инноваций в области водородных технологий является предложенная структура ВЗС контейнерного типа.

Ключевые слова: водородная заправочная станция; водородные технологии; термодинамические состояния водорода; макет водородной заправки; инфраструктура заправки; оборудование и компоненты.

Для цитирования: 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.

HYDROGEN FUELING STATION: REVIEW OF THE TECHNOLOGICAL STATE OF HYDROGEN FUEL USAGE

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.* In the modern world, on the verge of global climate change, the search and implementation of alternative energy sources become particularly significant. Hydrogen energy is one of the most promising directions, offering a revolutionary approach to the decarbonization of various industrial sectors. The development of technologies related to the production, storage, and use of hydrogen opens new horizons for creating a sustainable and environmentally friendly energy infrastructure. *OBJECTIVE.* To review the technological state of hydrogen refueling stations (HRS), analyze the latest global trends and developments in this area, identify factors contributing to the efficiency of HRS components, and present thermodynamic principles of hydrogen fuel use. To outline the main problems associated with the need for widespread implementation of hydrogen infrastructure and to identify potential directions for their resolution. To develop suggestions for creating a modular layout of a container-type hydrogen station, which will allow a flexible approach to organizing hydrogen infrastructure with the possibility of rapid scaling and adaptation under various operating conditions. *METHODS.* Based on the use of literature data. The method of prototyping an autonomous hydrogen refueling station was used, and mathematical calculations of thermodynamic processes occurring in the components of HRS were conducted. *RESULTS.* Studies in the field of technological state of stations have been examined and systematized, and development trends have been identified. The main components involved in the operation of a hydrogen station are described. Thermodynamic processes of hydrogen fuel use that contribute to a significant reduction in energy consumption of hydrogen stations have been investigated. *CONCLUSION.* The hydrogen station combines efficient conversion of hydrogen into electricity, minimization of emissions, energy independence, and flexibility in energy storage. Determining the optimal operating parameters of HRS equipment based on the thermodynamics of processes, considering the specifics of temperature regimes of Russian regions, is important for reducing costs and increasing the energy efficiency of hydrogen fuel systems. The proposed structure of the container-type HRS is an optimal platform for subsequent modernizations and innovations in the field of hydrogen technologies.

Keywords: hydrogen refueling station; hydrogen technologies; thermodynamic states of hydrogen; hydrogen refueling mock-up; refueling infrastructure; equipment and components.

For citation: Chichirov A.A., Razakova R.I., Gainutdinov F.R., Gainutdinova D.F. Hydrogen fueling station: review of the technological state of hydrogen fuel usage. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 149-165. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-149-165.

Введение (Introduction)

В последние годы, учитывая глобальный акцент на сокращение выбросов углерода, разработка и применение водородной энергии стали эффективным способом декарбонизации технологий [1-3]. Исследователями описывается потенциал водорода для сокращения выбросов углерода в секторах промышленности [4], транспорте [5], энергетике и домашнем хозяйстве [6]. Как часть стратегии водородной энергетики многих стран, разработка водородных заправочных станций (ВЗС) привлекает все больше внимания. Количество ВЗС по всему миру увеличивается с ускоренными темпами, что способствует более широкому использованию водородного транспорта. К 2021 году в мире функционировало около 550 водородных заправочных станций, 38% из них в Европе. Европа реализует дорожную карту, цель которой – достичь отметки в 1500 станций к 2025 г. [7]. В Европе и Китае количество станций высокоскоростной зарядки составляет примерно 140 и 52 соответственно. Для того чтобы преодолеть существующие трудности и обеспечить успешное внедрение топливо-элементных транспортных средств, Япония установила цель построить 320 станций к 2025 г. и 900 к 2030 г. В Соединённых Штатах функционирует всего около 50 станций высокоскоростной зарядки, большинство из которых находится в Калифорнии [8].

Современные проблемы водородных заправок включают высокую стоимость строительства и обслуживания, недостаточную инфраструктуру, трудности хранения и транспортировки водорода, а также ограниченный спрос из-за малого числа транспортных средств на водородных топливных элементах. Комплекс задач ВЗС, требующих технологических решений отображены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1Проблемы ВЗС
Problems of HRS

Высокая стоимость ВЗС	
Стоимость строительства	\$1-4 млн за станцию: за 1 млн.\$: небольшая или модульная, с ограниченной мощностью и функциональностью; за 4 млн.\$: крупная, полностью оснащенная, с высокой пропускной способностью и дополнительными функциями
Стоимость обслуживания	5-10% от стоимости строительства ВЗС в год
Проблемы хранения водорода	
Высокое давление	Водород хранится при давлении до 700 бар, что требует прочных емкостей
Необходимость охлаждения	Для хранения в жидком виде водород охлаждают до -253°C
Риск утечек	Водород имеет маленькие молекулы, склонные к просачиванию через микроскопические отверстия
Требование к материалам оборудования	Материалы должны выдерживать экстремальные условия и не вступать в реакцию с водородом
Транспортировка водорода	
Уникальные свойства газа	Очень низкая плотность в газообразном состоянии
Сжатие и сжижение газа	Сжатие водорода до высоких давлений и его сжижение при очень низких температурах требуют значительных энергозатрат и специализированного оборудования, что увеличивает стоимость топлива

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

Серьезные технологические и логистические проблемы и требуют разработки и интеграции новых технологий для производства водорода, хранения и выдачи продукта.

Водородные станции классифицируют по различным параметрам, включая источник водорода, метод его хранения и способ подачи к автомобилю (рис. 1).

1. По источнику водорода: производится непосредственно на ВЗС, обычно путем электролиза воды или реформинга природного газа (on-site); производится в другом месте и доставляется на ВЗС в сжатом или жидком виде (off-site) [9].

2. По методу хранения водорода: ВЗС на сжатом водороде, газ хранится при высоком давлении в специальных емкостях (350-700 бар) GH_2 ; ВЗС на жидком водороде, газ хранится в охлажденном до криогенных температур состоянии LH_2 ; гибридные системы ВЗС - сочетают в себе элементы обоих методов [10].

3. По способу подачи водорода: водители заправляют свои транспортные средства самостоятельно (self-service); обслуживание проводится персоналом станции (full-service).

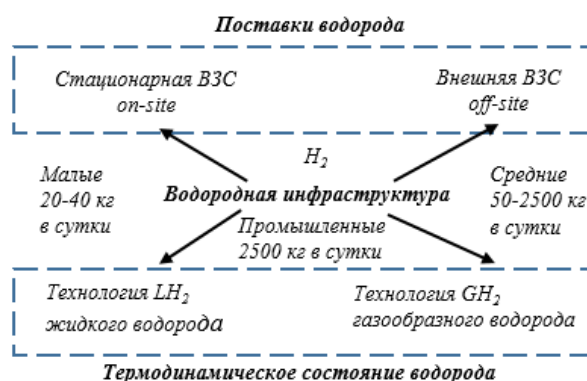


Рис.1. Классификация ВЗС

Fig.1. Classification of HRS

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

В соответствии основным режимом поставки топлива, позволяющие заправлять транспортные средства, оборудованные резервуарами для водородного газа под высоким давлением примерно 700 бар функционируют четыре типа заправочных станций [11]:

1. Станции, работающие с жидким водородом, оснащенные системами для его

газификации и компрессии.

2. Станции, принимающие сжатый водород под давлением в 200 бар, получаемый из трубных трейлеров, имеющие установки для увеличения давления до 400–700 бар.

3. Комплексы, получающие газообразный водород через трубопроводы, с оборудованием для повышения давления в диапазоне от 100 до 400–700 бар.

4. Станции, генерирующие водород на месте с использованием компактных электролизеров системами компрессии, способными достигать давления от 15 до 400–700 бар.

Станции могут представлять собой комбинацию различных типов, чтобы компенсировать нехватку водорода из-за малых количеств, произведенных с помощью производственных систем на месте [12].

Литературный обзор (Literature Review)

Для широкого внедрения водородного транспорта необходимо наличие достаточного количества ВЗС для их поддержки. Понимание текущего состояния водородной инфраструктуры важно для оценки осуществимости и масштабируемости транспорта, работающего на водороде. Анализ развития технологий ВЗС представлен в таблице 2.

Таблица 2

Tabl 2

Обзор технологического развития ВЗС
Review of Technological Development of HRS

Этапы развития ВЗС	Описание технологического состояния ВЗС
1988 г. Системы на жидком водороде	Устройство для заправки водородных автомобилей с системой хранения жидкого водорода, которая состояла из нескольких клапанов, двух шлангов и соединений с баком автомобиля [13]
1999 г. Системы с применением электрохимических технологий	Демонстрационная установка ВЗС, использующая водород в качестве энергоносителя, электролизер и топливный элемент [14]
2003 г. Предложены три способа подачи водорода на борт	Крупномасштабное производство водорода, а затем его распределение по трубам или грузовикам на заправочные станции; производство газа на многих рассредоточенных объектах, таких как станции технического обслуживания, и подача его в автомобили; внедрение бортового риформинга углеводородного топлива (бензин, метанол, природный газ) [15]
2007 г. Изучение мероприятий по безопасности использования водорода на ВЗС	Исследованы аспекты безопасности водородной инфраструктуры для транспортных средств [16, 17] проведена оценка рисков и принят кодекс «Программный инструмент анализа опасностей процессов» PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) [18, 19]
2012 г. Сбор данных о производительности ВЗС	Проанализировали данные о более чем 1000 процессах заправки, чтобы определить профили обслуживания, и сравнили их с бензиновыми заправочными станциями [20]
2017 г. Совершенствование технологий хранения водорода	Изучены пять технологий хранения водорода: сжатый газообразный водород при 350 и 700 бар [21], жидкий криосжатый водород [22], адсорбирующие материалы [23] и холодный водород под давлением [24, 25]
2018 г. Системы охлаждения водорода	Комплексный анализ систем предварительного охлаждения водорода для быстрой заправки топливом на 700 бар, включая эффект Джоуля-Томсона на станции [26, 27]
2019 г. Изучение способов снижения затрат на эксплуатацию ВЗС	Подход к управлению резервуарами-накопителями (метод двухуровневой консолидации давления), позволяющий снизить потребление энергии на 20 % за час работы [28, 29]

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

Согласно литературным данным, большинство ученых обращают внимание на следующие темы: расположение станции [30], технико-экономический анализ [31, 32], оптимизация уровня давления [33], исследование процессов заправки [34], оценка рисков, анализ, связанный с безопасностью [35, 36], и исследования конкретного оборудования, такого как компрессоры, системы хранения и дозирующие устройства [37]. В целом, исследователи проявляют все больший интерес к этим энергетическим системам, работая над широким спектром разнообразных областей исследований, включая инновации в

оборудовании и технологиях, схема станции, а также сбор данных для тестирования производительности.

Авторами [38] изучена инвестиционная целесообразность для потенциальных инвесторов, чтобы стимулировать их инвестиции в развитие водородных заправочных станций, что является ключевым для водородной промышленности.

Сравнение технологий газового и жидкого водорода отображено в таблице 3.

Таблица 3

Tabl 3

Сравнительный анализ технологий газообразного и жидкого водорода
Comparative Analysis of Gaseous and Liquid Hydrogen Technologies

Показатель станции	Заправочные станции с газообразным водородом Gaseous hydrogen, GH_2	Заправочные станции с жидким водородом Liquid hydrogen, LH_2
Хранение водорода	Для хранения 1 кг водорода при 1 бар и 25 °C требуется резервуар объемом 12,3 м ³ , что составляет 20 % энергоёмкости станции. Водород, сжатый при давлении 350 бар занимает менее 99,6 % объема. Более высокое давление в хранилищах, равное 700 бар, принесет преимущества с точки зрения скорости заправки и накопленных объемов [39]	Для хранения требуются низкие температуры, что, составляет около 40 % энергоёмкости станции. Жидкий водород, хранящийся при температуре -253 °C, используется, когда требуется высокая плотность хранения, Специальные резервуары при криогенных температурах должны обладать высокой изоляционной способностью, чтобы уменьшить выкипание водорода [40]
Компоненты станции	1. Электролизеры щелочные или протономембранные РЕМ, установки парового риформинга метана (on-site); трубчатые прицепы для подачи водорода на станцию при среднем давлении (200-500 бар), вмещают от 250 до 1000 кг водорода (off-site); 2. Компрессоры высокого давления; 3. Резервуары для хранения водорода в сжатом виде; 4. Система терморегулирования; 6. Оборудование безопасности для устранения взрывов и утечек; 7. Дозаторы для заправки транспорта (диспансер)	1. Секция начального хранения топлива. Криогенные автоцистерны для подачи водорода на станцию, специализированные резервуары; 2. Криогенные установки или криогенные насосы; 3. Изолированные резервуары для хранения при крайне низких температурах; 4. Система терморегулирования; 5. Оборудование безопасности для устранения взрывов и утечек; 6. Дозаторы для заправки транспорта (диспансер)
Схемы ВЗС	Схемы ВЗС с газохранилищами: каскадная заправка; прямая заправка топливом с использованием водородного компрессора	Схема ВЗС, когда газообразный водород, образуется в теплообменнике в результате испарения жидкого водорода; схема ВЗС с криогенным насосом

В дополнение к этим техническим аспектам, продолжают исследования в области мер водородной безопасности и правил [41, 42]. Разрабатываются протоколы реагирования на чрезвычайные ситуации, обучение лиц, оказывающих первую помощь, и готовность к чрезвычайным ситуациям из-за легковоспламеняющейся природы водорода [43, 44].

Научное сообщество исследовало различные схемы и конфигурации водородной инфраструктуры [45, 46].



Рис. 2 Схема ВЗС с каскадным процессом заправки (SMR –паровая конверсия метана; WE – электролиз воды)

Fig. 2 Schematic of HRS with Cascade Refueling Process

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

На рисунке 2 изображена схема ВЗС с каскадной системой заправки. На этой станции, водород подается в бак автомобиля, при разнице давлений между резервуарами на заправочной станции и баком автомобиля. Водород поступает на ВЗС различными способами: доставляется грузовыми автомобилями, по трубопроводам или производится непосредственно на месте с помощью электролизеров (WE) или реформеров (SMR). Важную роль в данной системе играет компрессор, сжимающий водород до высокого давления (950 бар) для его хранения и последующей заправки автомобилей. Даже если исходное давление газа от источника подачи невелико (например, 20 бар), компрессор способен повысить его до необходимого уровня. Каскадная система хранения включает несколько резервуаров, которые могут быть последовательно использованы для заправки транспортных средств. Когда давление в одном из резервуаров падает ниже определенного уровня, который может помешать эффективной заправке, компрессор включается для восстановления необходимого давления. Перед подачей в бак автомобиля, водород проходит через блок предварительного охлаждения, который снижает его температуру до около -40 °С.

Основной проблемой каскадной системы заправки является её ограниченная пропускная способность, которая зависит от количества и объема резервуаров высокого давления. После серии заливок, когда давление в резервуарах упадет до недостаточного уровня, потребуется время для их повторного наполнения до высокого давления, может привести к задержкам в обслуживании следующих клиентов.

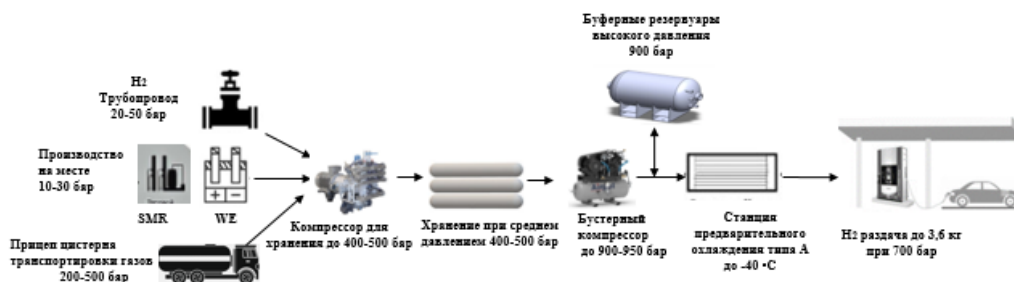


Рис. 3. Схема ВЗС с дожимным дозирующим компрессором (SMR –паровая конверсия метана; WE – электролиз воды)

Fig. 3. Schematic of HRS with Booster Dispensing Compressor

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

На рисунке 3 представлена схема ВЗС функционирующая по принципу прямого процесса заправки. Конфигурация включает использование двух компрессоров: накопительного и бустерного, для достижения необходимого высокого давления, требуемого для заправки топливом. Водород, хранящийся в системе под средним давлением, сначала подается в накопительный компрессор, где сжимается до промежуточного уровня давления. Затем бустерный компрессор дополнительно повышает давление водорода до 900 бар, что является оптимальным для заправки большинства современного водородного транспорта. После этапа сжатия водород направляется в буферные резервуары высокого давления, служащие для временного хранения газа перед

его подачи в топливную систему автомобиля. Резервуары обеспечивают наличие достаточного количества водорода под высоким давлением для обслуживания нескольких транспортных средств подряд без необходимости ожидания процесса компрессии. Далее, водород проходит через охладитель, который снижает его температуру для увеличения плотности и предотвращения нежелательного нагрева в баке автомобиля во время заправки. Охлажденный водород подается в бак автомобиля через дозатор, контролирующий объем и скорость заправки. Такой подход к конструкции ВЗС позволяет оптимизировать процесс заправки, уменьшая время ожидания для потребителей и повышая пропускную способность станции. Тем не менее требуется точный контроль за работой компрессоров и охладительных систем для обеспечения безопасности, и эффективности процесса заправки.

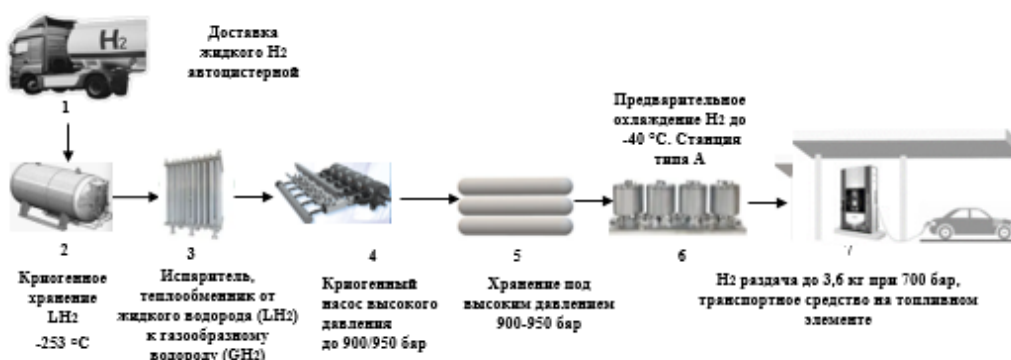


Рис. 4. Схема ВЗС с испарителем / Fig. 4. Schematic of HRS with Vaporizer / Heat Exchanger

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

Схема ВЗС, изображенная на рисунке 4, использует газообразный водород, который образуется в теплообменнике за счёт испарения жидкого водорода под воздействием тепла окружающей среды. Испарившийся водород собирается в верхней части криогенного резервуара, создавая запас газообразного водорода для дальнейшего использования. Далее жидкий водород сжимается до давления в 950 бар в резервуаре высокого давления с помощью компрессора. Процесс заправки включает в себя многократные циклы сжатия водорода до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое давление в баке автомобиля. Перед тем как водород будет подан в бак, он проходит через холодильный агрегат. Охлаждение водорода до -40°C увеличивает его плотность и снижает риск теплового расширения водорода в баке, что может возникнуть при более высоких температурах, улучшая тем самым безопасность и эффективность процесса заправки.

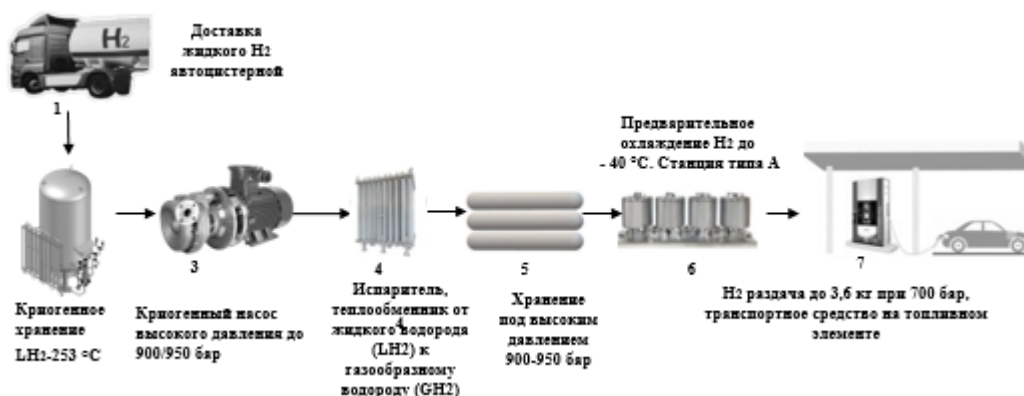


Рис. 5. Схема ВЗС с криогенным насосом / Fig. 5. Schematic of HRS with Cryogenic Pump

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

На рисунке 5 демонстрируется схема ВЗС с криогенным насосом. В этой системе водород поступает в жидком состоянии, что обеспечивает его плотное хранение и удобство транспортировки. Криогенный насос обеспечивает необходимое давление и температуру для перевода водорода из жидкого в сверхкритическое состояние. В этом состоянии водород (-240°C ; 13 бар) не имеет отдельных жидких и газообразных фаз и обладает

уникальными свойствами, такими как повышенная плотность энергии, что может улучшить его хранение и передачу. Перевод жидкого водорода в газообразное и достижение сверхкритического состояния – это разные аспекты процесса, и не все водородные заправочные станции используют сверхкритический водород. Большинство станций сегодня используют водород в газообразном состоянии под высоким давлением (700 бар) для заправки транспортных средств. Перед подачей в топливный бак, газ проходит через криогенный теплообменник, где охлаждается с использованием жидкого водорода.

Авторы [47] предлагают гибридные решения, когда станция функционирует с каждой конфигурацией дозаправки независимо, что позволяет ей выполнять операции дозаправки при любых обстоятельствах, даже если один из компонентов двух конфигураций выходит из строя.

В статье [48] анализируется инновационная энергетическая система, основанная на водородной станции, как ядре интеллектуального центра производства энергии, где полученный водород затем используется в различных водородных технологиях, принятых и установленных поблизости от станции.

Режим работы ВЗС зависит от множества факторов, включая тип станции, объем потребления водорода и логистику.

Международный опыт реализации водородных технологий показывает, что ключевыми проблемами при эксплуатации станций становятся энергоэффективность, экономичность и надежность использования водорода в экстремальных региональных температурных условиях. В связи с этим актуальны исследования в области термодинамики водородных систем, но они в малом объеме освещены в литературе.

Климатические условия влияют на эффективность хранения и дозаправки водорода, особенно при очень низких или высоких температурах учетом специфики температурных режимов российских регионов. При очень низких температурах водород может сжижаться или замерзать, что требует дополнительной энергии для его газификации перед заправкой. При высоких температурах может возрасти давление в хранилищах, что требует систем охлаждения. Эффективность и безопасность ВЗС могут быть нарушены вне диапазона -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ [49].

С точки зрения транспорта водорода наиболее перспективным маршрутом представляется маршрут газопроводов, который в настоящее время ограничен целым рядом проблем, в том числе опасностью водородного охрупчивания и высокими капиталовложениями, необходимыми для строительства крупномасштабной сети газопроводов. Такие затраты были бы оправданы только доминирующим выходом водорода на рынок альтернативного топлива.

Глобальная автоиндустрия, производители газа и оборудования достигли консенсуса относительно стандарта для заправки водородом легковых машин (SAE, 2016). Стандарт устанавливает параметры для температуры топлива при подаче, максимальной скорости его потока и давления при заправке [50]. Заправочные станции для легковых автомобилей работают со сжатым водородом под давлением 700 бар, автобусы заправляются сжатым водородом под давлением 350 бар (BMVI, 2016). Заправка легковых автомобилей занимает 3 мин с водородом, охлажденным до -33 до -40°C (H₂ME, 2016).

Общество автомобильных инженеров (SAE) разработало протоколы заправки для легковых транспортных средств на газообразном водороде (FCEV). Протокол заправки классифицирует ВЗС по температуре предварительного охлаждения и давлению заправки, и устанавливает среднюю скорость нарастания давления на основе температуры окружающей среды, которая поддерживается постоянной в течение периода заправки. Контролируются параметры различных категорий ВЗС, давление и температура процесса заправки водородом в пределах нормы, чтобы обеспечить быструю заправку транспортного средства [51].

Исследования в области ВЗС в России находятся на этапе разработки водородных технологий с применением отечественного оборудования [52, 53] и обсуждения затрат энергии, перспективности создания ВЗС [54, 55].

Таким образом, исследовано современное состояние и динамика развития водородных заправочных станций, выявлены наилучшие практики и накопленный опыт разработки ВЗС в России. Проанализированы различные конфигурации ВЗС и их комбинации с хранилищами жидкого водорода (LH₂) и газообразного водорода (GH₂), выявлены преимущества и недостатки каждой из них. Следует отметить, что идеального устройства водородной станции не существует. Кроме того, необходимо учитывать множество факторов, включая окружающие условия, геополитические реалии, развитие

местного рынка, объемы водородного транспорта, удаленность от центров производства водорода, логистические схемы, а также местные нормы и стандарты.

Будущие тенденции подразумевают производство водорода непосредственно на месте использования как способ сокращения энергопотребления и выбросов, связанных с его транспортировкой. Среди различных технологий локального производства электролиз воды выделяется как экологически чистый и легко адаптируемый метод.

Современные исследования в области водородных заправочных станций направлены на повышение эффективности и безопасности систем хранения и распределения водорода, а также на разработку новых устойчивых способов его производства.

Системы преобразования энергии в газ и установки для заправки водородом становятся все более значимыми как жизнеспособные альтернативы традиционной топливной инфраструктуре, так как они способствуют глубокой декарбонизации и обеспечивают долгосрочное хранение энергии.

Обзор текущих исследований, концепций и компоновок ВЗС предоставляет ценную информацию и способствует глубокому пониманию текущего состояния и будущего потенциала инфраструктуры заправки водородом, её воздействия на транспорт, энергетические системы и окружающую среду.

Материалы и методы (Materials and methods)

Методы исследования, применяемые в работе, включают в себя анализ литературных источников по использованию технологий на водородных автозаправочных станциях, математические расчеты.

Эффективность работы ВЗС зависит от термодинамических процессов хранения и передачи топлива. Предварительные термодинамические расчеты помогают понять энергетические процессы и эффективность водородной системы.

При хранении водорода в баллонах, газ должен быть предварительно сжат, когда на 1 моль затрачивается работа сжатия $W_{сж}$:

$$W_{сж} = \frac{1}{\eta_k} RT \ln \frac{P}{P_0}$$

где P_0 и P - начальные и конечные давления, R - универсальная газовая постоянная, T - абсолютная температура, η_k - КПД компрессора. Считаем процесс адиабатным, учитывая интегральный эффект Джоуля-Томсона:

$$W_{сж} = \frac{1}{0,86} 8,31 \cdot 293 \cdot \ln \frac{400}{5} = 58887,2 \text{ Дж/моль} = 58,88 \text{ кДж/моль}$$

В результате для разности температур газа получаем:

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{(C_v + R)} \left(\frac{RT_1 b}{V_1 - b} - \frac{2a}{V_1} \right)$$

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{(29,83 + 8,31)} \left(\frac{8,31 \cdot 293 \cdot 26,653}{0,04 - 26,653} - \frac{2 \cdot 0,0245}{0,04} \right) = -0,096 \text{ К}$$

При стандартных условиях V_1 значительно превышает b , следовательно, изменение знака эффекта Джоуля-Томсона происходит при определённой температуре, известной как температура инверсии. Подставляя параметры для определённого газа, можно вычислить температуру инверсии для водорода. Если эффект Джоуля-Томсона наблюдается при температурах выше температуры инверсии, то температура газа повышается: $\Delta T > 0$. В противном случае, при температурах ниже температуры инверсии, температура снижается: $\Delta T < 0$. Температура инверсии коррелирует с критической температурой:

$$T_i = \frac{2a}{Rb} = \frac{27}{4} T_{кр} = 6,75 \cdot T_{кр}$$

Максимальная температура инверсии для водорода составляет -57°C при нормальном атмосферном давлении. Это говорит о том, что адиабатическое расширение реального газа приводит к изменению его температуры

Изменение энтропии газа в этом процессе, учитывая известную молярную теплоёмкость водорода C_V :

$$\Delta S = C_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \ln\left(\frac{V_2 - b}{V_1 - b}\right)$$

$$\Delta S = 29,83 \cdot \ln\left(\frac{233}{293}\right) + 8,31 \cdot \ln\left(\frac{4 - 26,653}{0,04 - 26,653}\right) = -56,41 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

Работа, совершаемая водородом при изотермическом расширении его от объема V_1 до V_2 при температуре T :

$$A = RT \ln\left(\frac{V_2 - b}{V_1 - b}\right) + \frac{a}{V_2} - \frac{a}{V_1}$$

$$A = 8,31 \cdot 233 \ln\left(\frac{4 - 26,653}{0,04 - 26,653}\right) + \frac{0,0245}{4} - \frac{0,0245}{0,04} = 311,376 \text{ Дж/моль}.$$

Термодинамические расчеты являются важными при проектировании и эксплуатации водородных АЗС, определяя их эффективность, безопасность и экономичность. Исходя из понимания процессов преобразования и использования энергии на водородных заправочных станциях, можно использовать эту информацию для оптимизации системы. Такой подход способствует улучшению эффективности станций и снижению операционных издержек.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Результаты исследования демонстрируют, что международный опыт в области водородных технологий позволяет выделять наиболее успешные инженерные решения и практики эксплуатации ВЗС. Выполнено моделирование водородной станции, включающей процессы производства водорода на месте методом электролиза, его хранения и распределения при различных давлениях. С целью создания опытно-промышленной малой станции способной производить 30 кг H_2 /сутки, разработан макет ВЗС с мощностью 8,5 кг H_2 /сутки для тестирования технологии.

Представлена концепция архитектуры водородной заправочной станции, основанная на использовании оборудования российского производства, что представляет значительный интерес. В рамках исследования проведены маркетинговые исследования рынка, оценены доступные технологии и потенциал их интеграции. ВЗС контейнерного типа, демонстрирующий применение отечественных разработок в данной области.

Необходимо подчеркнуть, что ассортимент компактных водородных компрессоров, способных обеспечивать давление в 700 бар и выше для полной заправки транспортных средств, ограничен. Пользователи могут столкнуться с проблемами при подборе оборудования, достаточного для достижения давления в 900 бар, что необходимо для компенсации температурного расширения водорода. Дополнительно, во избежание водородного охрупчивания материалов в компрессорах требуется использование высокопрочных материалов и специальных покрытий, таких как алитирование, для предотвращения утечек и загрязнения водорода. Стандарты на максимально допустимую концентрацию водорода строго регламентированы и не должны превышать 2300 ppm в защищенной зоне станции и в помещениях.

Панельно-блочный контейнер ВЗС включает три отсека (модуля) с отдельными входами: отсек управления и силовой электроники; отсек генерации водорода; отсек компримирования водорода (рис. 6). Контейнер разделен непроницаемыми перегородками и оборудован климат-контролем (внешние условия от -40°C до $+45^\circ\text{C}$; внутренние условия от $+10^\circ\text{C}$ до $+45^\circ\text{C}$), принудительной проточно-вытяжной вентиляцией, контролем загазованности, пожарной сигнализацией, пожаротушением и другими важными компонентами.

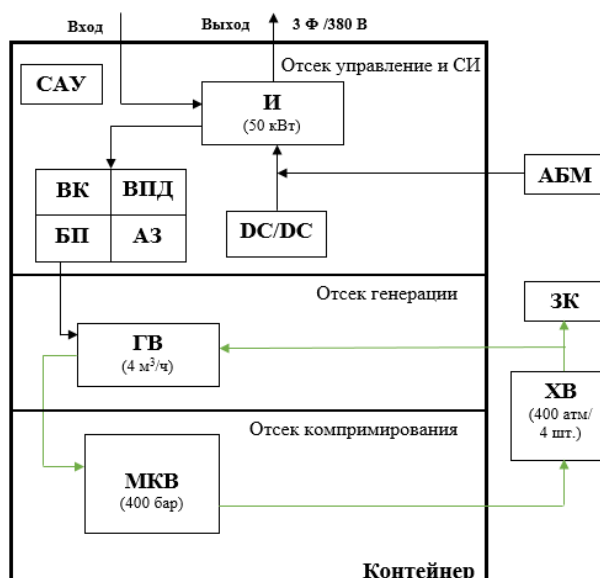


Рис. 6. Блок схема макета ВЗС

Fig. 6. Schematic of the multifunctional HRS prototype

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

САУ – система автоматического управления; И – инверторная подсистема преобразователей; ВК – воздушный компрессор; ВПД – блок водоподготовки; БП – блок питания; АЗ – система продувки азотом; DC/DC – преобразователи; ГВ - генератор водорода на основе электролизеров с твердополимерной мембраной МФ-4СК; МКВ – мембранный компрессор водорода; АБМ – аккумуляторная батарея; ХВ – хранилище водорода; ЗК – заправочная колонка (заправка водородом).

Содержание отсеков. Модуль автономной генерации водорода обеспечивает производство водорода объемом 4 м³/ч с чистотой 99,995%. Он включает в себя следующие компоненты: дистиллятор для очистки воды и получения деионизированной воды с удельной электропроводностью <0,1 мкСм/см, электрохимический генератор водорода для непосредственного производства газа, а также систему для дополнительной очистки и осушки газа до заданного уровня чистоты.

Модуль компримирования и хранения водорода предназначен для для его содержания при различных уровнях давления. В его состав входят ресиверы для хранения водорода под давлением 10 бар, компрессор для закачки водорода в баллоны высокого давления и металлкомпозитные баллоны, предназначенные для хранения водорода под давлением 400 бар.

Инверторная подсистема позволяет подключать герметичные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи (20 штук по 50 А·ч каждая при напряжении 12 В), общей емкостью энергии 12 кВт·ч.

Система автоматического управления обеспечивает дистанционное управление и мониторинг работы ВЗС, включая программное обеспечение станции и удаленного диспетчера. ВЗС спроектирована с возможностью масштабирования производительности до 100 кг водорода в сутки.

Хранилище водорода расположено вне контейнера с возможностью расширения емкости хранения.

Топливораздаточная колонка газообразного водорода включает водородный теплообменник для охлаждения газа перед заправкой транспортных средств и газораспределительную колонку для непосредственной раздачи топлива.

Для проведения тестовых испытаний оборудования макета предполагается применение стендов, позволяющих оценивать работу оборудования в различных климатических условиях, проверять соответствие нормам освещения, безопасности низковольтного оборудования, потреблению электроэнергии, электромагнитной совместимости, а также систем пожарной сигнализации и пожаротушения. Важным аспектом является анализ качества водорода, тестирование насосного оборудования и систем водоснабжения.

Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ актуальных исследований и инженерных разработок в области водородных заправочных станций подчеркивает значимость этих технологий для

развития водородной экономики в транспортной индустрии. ВЗС могут служить фундаментом для создания эффективных и экологически чистых энергетических систем, но для их успешной интеграции предстоит выполнить значительный объем работы.

Продуманная структура контейнерного типа ВЗС, предложенная в данной работе, обеспечивает безопасность и удобство в эксплуатации, представляя собой платформу для последующих модернизаций и инноваций. Важным аспектом является определение оптимального сочетания компонентов станции, что должно проводиться с учетом термодинамических свойств процессов и особенностей температурных режимов, что снизит затраты и увеличит эффективность использования водородных топливных систем.

Особое внимание стоит уделить адаптации технологий ВЗС к различным климатическим условиям, включая российские регионы, что позволит сократить затраты и повысить эффективность водородных топливных систем на новом уровне.

Предложенная структура ВЗС контейнерного типа обеспечивает четкое разделение функциональных зон и упрощает обслуживание. В дальнейшем стоит задача дальнейшего совершенствования ВЗС, включая улучшение материалов, технологий хранения и распределения водорода. Все это требует продолжения исследований, разработки новых инженерных решений и тесного взаимодействия научного сообщества с промышленностью и государственными органами для достижения целей устойчивого развития и перехода к низкоуглеродной экономике.

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».

Литература

1. Robles I.J.O., Almaraz S.D-L., Pantel C.A. Hydrogen as a Pillar of the Energy Transition // Hydrogen Supply Chains. Academic Press. 2018. Vol. 1, pp. 3-35.
2. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д. и др. Современные направления развития водородных энергетических технологий // Надежность и безопасность энергетики. 2019. №2(12). С. 89-96.
3. Филимонов А.Г., Филимонова А.А., Чичиров А.А. и др. Глобальное энергетическое объединение: новые возможности водородных технологий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 3-13.
4. Ahmeda A., Quasem Al-A. A., Ambrosea A.F. et al. Hydrogen fuel and transport system: A sustainable and environmental future // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. pp. 1369-1380.
5. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Разакова Р.И. Электрохимические технологии для автомобилей на водородном топливе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 104-115.
6. Joydev M. Chapter 7.2 - Overview on application of hydrogen // Towards Hydrogen Infrastructure. 2024. pp. 401-430.
7. Alazemiab I.J., Andrews J. Automotive hydrogen fuelling stations: An international review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 48. pp. 483-499.
8. Pang Y., Martinez Y.A., Hydrogen refueling stations/infrastructure // Fuel Cells for Transportation. 2023. Vol. 18. pp. 575-597.
9. Дудник А.Н., Мелак В.Г. Водородные заправочные станции // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2007. № 4. С. 3-12.
10. 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. Vol. 42, N34, pp. 21855–21865.
11. Rose P.K., Neumann F. Hydrogen refueling station networks for heavy-duty vehicles in future power systems // Environ. 2020. Vol. 83, pp. 102358.
12. Genovese I.M., Fragiaco P. Hydrogen refueling station: overview of the technological status and research enhancement // Energy Storage. 2023. Vol. 61, pp. 106758.
13. Fieseler H., Hettinger W., Kesten M. On-board fuel storage and supply system of a liquid hydrogen powered experimental passenger car // Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Engineering Conference Southampton, UK, 12–15 July 1988 (1988), 10.1016/b978-0-408-01259-1.50024-3.
14. Meurer C., Barthels H., Brocke W.A., et al. Phoebebus – an autonomous supply system with renewable energy: six years of operational experience and advanced concepts // Energy. 1999. Vol. 67, pp. 131-138.

15. Tanaka T., Azuma T., Evans J.A., et al.. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model // *Energy*. 2007. Vol. 32, pp. 2162-2170.
16. Rosyid O.A., Jablonski D., Hauptmanns U. Risk analysis for the infrastructure of a hydrogen economy // *Energy*. 2007. Vol. 32, pp. 3194-3200.
17. Molkov V., Kashkarov S. Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks // *Energy*. 2015. Vol. 40, pp. 12581-12603.
18. Шебеко Ю.Н. Болодьян И.А. Международный опыт обеспечения пожарной безопасности водородных автозаправочных станций // *Вести газовой науки*. 2022. №2 (51). С. 151-158.
19. Pagliaro M., Iulianelli A. Hydrogen Refueling Stations: Safety and Sustainability // *Energy*. 2019. N9. pp. 8-13.
20. Dodds P.E., McDowall W. Review of hydrogen delivery technologies for energy system models // *Uk Shc* (2012), pp. 3-35.
21. Striednig M., Brandstätter S., Sartory M., et al. Thermodynamic analysis of the real gas refueling process // *Energy*. 2014. Vol. 39, pp. 8495-8509.
- Li Z, Pan X, Sun K, et al. Development of safety standard for mobile hydrogen refueling facilities in China // *Energy*. 2014. Vol 39, pp. 13935-13939.
23. Elgowainy A., Wang M., Joseck F., et al. Life-cycle analysis of fuels and vehicle technologies // *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, Elsevier, Oxford. 2017. pp. 317-327.
24. Kurtza J, Sprika S, Bradleyb TH. Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability // *Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability*. 2019. Vol. 44, N23. pp. 12010-12023.
25. Brown T., Kisting H. Analysis of customer queuing at hydrogen stations // *Energy*. 2022. Vol. 47, pp. 17107-17120.
26. Sinigaglia T, Lewiski F, Santos Martins ME, et al. Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review. // *Energy*. 2017. Vol. 42, pp. 24597-24611.
27. Dagdougui H., Sacile R., Bersani C., et al. Hydrogen storage and distribution: implementation scenarios // *Hydrogen Infrastructure for Energy Applications*. 2018. N1. pp. 37-52.
28. New Argonne technology could reduce the cost of hydrogen refueling / *Fuel Cells Bull.*, 2018 (2018), pp. 14-15, 10.1016/S1464-2859(18)30223-2.
29. Mayer T., Semmel M., Guerrero Morales M.A., et al Techno-economic assessment of liquid or gaseous hydrogen refueling stations // *Energy*. 2019. pp.1-25. 10.1016/j.ijhydene.2019.08.051.
30. Алексеева О. К., Козлов С.И., Фатеев В. Н. Транспортировка водорода // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2011. №3 (21). С. 18 -24.
31. Григорьев С.А., Коробцев С.В. Электрохимические водородные компрессоры/концентраторы на основе твердополимерного электролита // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2011. №5 (23). С. 57-59.
32. Алексеева О.К., Козлов С.И., Фатеев В.Н. Транспортировка водорода // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2011. №3 (21). С. 18-24.
33. Лосев О.Г., Марусева И.В., Пушкарев А.С., и др. Заправочная станция на возобновляемых источниках энергии для водородного и электрического транспорта // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2013. №3 (33). С. 15-18.
34. Wen S., He G. Review of hydrogen station technology development through patent analysis // *Clean Energy*. 2018. Vol. 2, pp. 29-36.
35. Чикунов, Г.В., Гайнутдинов Ф.Р. Водородные АЗС - режим функционирования // *Энергия-2022. Теплоэнергетика: Семнадцатая всероссийская (девятая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых*. В 6 т., Иваново, 11–13 мая 2022 г. Иваново: ИГЭУ, 2022. С. 87.
36. Ali MS, Khan M. SH, Tuhin RA, et al. Challenges of hydrogen storage and transportation: A review of recent advancements. // *Hydrogen Energy Conversion and Management* 2024. pp. 255-287.
37. Abidin Z, Tang C, Liu Y, et al. Catchpole Current status and challenges of hydrogen storage technologies. // *Towards Hydrogen Infrastructure*, Elsevier. 2024. pp. 101-132.
38. Zhao T., Liu Z. Investment in hydrogen refueling station based on compound real options // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 57, Pp. 198-209.
39. Макуева, Д.А., Разакова Р.И. Состояние и перспективы внедрения водородных заправочных станций // *Тинчуринские чтения - 2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции*. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 г. Казань: КГЭУ, 2023. С. 118-120.
40. Paster M.D., Ahluwalia R.K., Berry G., et al. Hydrogen storage technology options for fuel cell vehicles: well-to-wheel costs, energy efficiency, and greenhouse gas emissions // *Energy*. 2011. Vol. 36,

pp. 14534-14551.

41. Раменский А.Ю. Водород в качестве топлива: предмет и цели стандартизации. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2015. № 1. С. 33-44.

42. Закиров Р.Н Чичирова Н.Д., Филимонова А.А. др. Нормативно-техническая документация по промышленной безопасности при производстве водорода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. №5). С. 91-100.

43. San Marchi C., Hecht E.S, Ekoto I.W., et al. James Overview of the DOE hydrogen safety, codes and standards program, part 3: Advances in research and development to enhance the scientific basis for hydrogen regulations, codes and standards // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, N11, pp. 7263-7274.

44. Pique S., Weinberger B., De-Dianous V., et al. Comparative study of regulations, codes and standards and practices on hydrogen fuelling stations // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, N11. pp. 7429-7439.

45. Rothausen E., Rokni M. Optimization of total energy consumption at cascade refueling stations for hydrogen vehicles // Energy. 20014. Vol. 39, pp. 582-592.

46. Архаров И.А., Архаров А.М., Навасардян Е.С. Сравнение удельных затрат энергии в циклах реконденсации паров водорода для криогенных систем заправочных станций. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2018. Т.4. №6. С. 57-69.

47. Zhua L., Leia G., Gaob J. Research on key influencing factors for site selection of DC microgrid-based hydrogen-electric hybrid refueling stations. // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, N100. pp. 39759-39779.

48. Genovese M., Fragiaco P. Evolution of the hydrogen station towards a polygenerative energy system // Energy. 2022. Vol. 47, pp. 12264-12280.

49. Serdaroglu G., Huz M., Gillott M., et al. The impact of environmental conditions on the operation of a hydrogen refueling station // Energy. 2015. Vol. 40, pp. 17153-17162.

50. Reddy K., Elgowainy A., Rustagi N., et al. Impact of hydrogen refueling methods SAE J2601 on the refueling time of fuel cell passenger vehicles. // Energy. 2017. Vol. 42, pp. 16675-16685.

51. Gye H-R., Seo S-K., Bach Q-V., et al. Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station. // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44, N2. pp. 1288-1298.

52. Егоров А.А., Фомин А.В. Сравнительный анализ **водородных заправочных станций** и автомобильных газовых заправочных станций // Материалы Международной XXXIV научно-практической конференции, посвященной 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России «Актуальные проблемы пожарной безопасности», Балашиха, 23–24 августа 2022 г. Москва: 2022. С. 708-713.

53. Дмитриев А.Л., Иконников В.К. Водородная заправочная станция на основе установки получения водорода гидротермальным методом окисления промышленных порошков алюминия. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2017. Т. 10. №12. С. 75-85.

54. Архаров И.А., Архаров А.М., Навасардян Е.С. Сравнение удельных затрат энергии в циклах реконденсации паров водорода для криогенных систем заправочных станций. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2018. Т.4. №6. С.57-69.

55. Гайнутдинова Д. Ф. Перспективы создания водородных заправочных станций // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ Нацразвитие, 28–30 марта 2022 г. Санкт-Петербург. Санкт-Петербург: «Нацразвитие», 2022. С. 144-146.

Авторы публикации

Чичиров Андрей Александрович – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и водородная энергетика» (ХВ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), ORCID 0000-0002-9116-0370, khimiya_kgeu@mail.ru.

Разакова Регина Иршатовна – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), ORCID 0009-0002-1732-3335, reginarazakova@yandex.ru

Гайнутдинов Фарит Ринатович – магистрант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), ORCID 0009-0006-0381-1345, EBKKK@yandex.ru.

Гайнутдинова Диляра Фаритовна – канд.хим.наук, доцент кафедры «Химия и водородная энергетика» (ХВ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), ORCID 0009-0000-7477-9860, gaynutdinova2018@bk.ru

References

- 1 Robles I.J.O, Almaraz S.D-L, Pantel CA Hydrogen as a Pillar of the Energy Transition. *Hydrogen Supply Chains. Academic Press.* 2018; (1): 3-35. doi: 10.1016/B978-0-12-811197-0.00001-4.
2. Filimonova AA, Chichirov AA, Chichirova ND, et al. Sovremennye napravleniya razvitiya vodorodnyh jenergeticheskikh tehnologij. *Nadezhnost' i bezopasnost' jenergetiki.* 2019; 12(2): 89-96. (In Russ).
3. Filimonov AG, Filimonova AA, Chichirova ND, et al Global energy association: new opportunities of hydrogen technologies. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(2): 3-13. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-2-3-1. (In Russ).
4. Ahmeda Adeel, QuasemAl-Aminb Abul, Ambrosea Angelina F., Saidurc R. Hydrogen fuel and transport system: A sustainable and environmental future. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2016; (41):1369-1380.
5. Filimonova AA, Chichirov AA, Chichirova ND, et al Electrochemical Technologies for Hydrogen Fuel Vehicles. *News of Higher Educational Institutions. Energy Issues.* 2021; 23(2):104-115. (In Russ).
6. Joydev M. Chapter 7.2 - Overview on application of hydrogen. *Towards Hydrogen Infrastructure.* 2024; 401-430. doi: 10.1016/b978-0-323-95553-9.00006-6.
7. Alazemiab IJ, Andrews J. Automotive hydrogen fuelling stations: An international review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2015; (48): 483-499.
8. Pang Y, Martinez YA, Hydrogen refueling stations/infrastructure. *Fuel Cells for Transportation.* 2023; 18:575-597.
9. Dudnik AN., Melakh VG. Hydrogen Filling Stations. *Ecotechnologies and Resource Saving.* 2007; (4): 3-12.
10. 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. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.122
11. Rose PK, Neumann F. Hydrogen refueling station networks for heavy-duty vehicles in future power systems. *Environ.* 2020; (83): 102358. doi: 10.1016/j.trd.2020.102358.
12. Genovese I.M, Fragiaco P. Hydrogen refueling station: overview of the technological status and research enhancement. *Energy Storage.* 2023; 61:106758.
13. Fieseler H, Hettinger W, Kesten M. On-board fuel storage and supply system of a liquid hydrogen powered experimental passenger car. *Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Engineering Conference Southampton.* UK, 12–15 July 1988(1988). doi: 10.1016/b978-0-408-01259-1.50024-3.
14. Meurer C, Barthels H, Brocke WA. et al. Phoebus – an autonomous supply system with renewable energy: six years of operational experience and advanced concepts. *Energy.* 1999; (67):131-138, doi: 10.1016/S0038-092X(00)00043-8.
15. Tanaka T, Azuma T, Evans JA, et a. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model. *Energy.* 2007; (32):2162-2170. doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.019.
16. Rosyid OA, Jablonski D, Hauptmanns U. Risk analysis for the infrastructure of a hydrogen economy. *Energy.* 2007; (32):3194-3200. doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.02.012.
17. Molkov V, Kashkarov S. Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks. *Energy.* 2015; (40):12581-12603. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.001.
18. Shebeko YuN., Bolodyan IA. International Experience in Ensuring Fire Safety of Hydrogen Fueling Stations. *News of Gas Science.* 2022; 2(51):151-158.
19. Pagliaro M, Iulianelli A. Hydrogen Refueling Stations: Safety and Sustainability. *Energy.* 2019; 8-13. doi: 10.13140/RG.2.2.10338.48324.
20. Dodds PE, McDowall W. Review of hydrogen delivery technologies for energy system models. *Uk Shc* 2012; 3-35.
21. Striednig M., Brandstätter S., Sartory M. et al. Thermodynamic analysis of the real gas refueling process. *Energy.* 2014;(39): 8495-8509.
22. Li Z, Pan X, Sun K, et al. Development of safety standard for mobile hydrogen refueling facilities in China. *Energy.* 2014;(39):13935-13939. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.02.017.
23. Elgowainy A, Wang M, Joseck F, et al. Life-cycle analysis of fuels and vehicle technologies. *Encyclopedia of Sustainable Technologies, Elsevier, Oxford.* 2017;317-327.
24. Kurtza J, Sprika S, Bradleyb TH. Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability. *Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability.* 2019; 44(23):12010-12023.

25. Brown T, Kisting H. Analysis of customer queuing at hydrogen stations. *Energy*. 2022;(47):17107-17120. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.21.
26. Sinigaglia T, Lewiski F, Santos Martins ME, et al. Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review. *Energy*. 2017;(42):24597-24611. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.063.
27. Dagdougui H, Sacile R, Bersani C, et al. Hydrogen storage and distribution: implementation scenarios. *Hydrogen Infrastructure for Energy Applications*. 2018; doi: 10.1016/b978-0-12-812036-1.00004-4.
28. New Argonne technology could reduce the cost of hydrogen refueling. *Fuel Cells Bull*. 2018; 14-15. doi: 10.1016/S1464-2859(18)30223-2.
29. Mayer T, Semmel M, Guerrero Morales MA, et al. Techno-economic assessment of liquid or gaseous hydrogen refueling stations. *Energy*. 2019; doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.051.
30. Alexeyeva OK., Kozlov SI, Fateev VN. Hydrogen Transportation. *Transport on Alternative Fuel*. 2011;21(3): 18-24. (In Russ).
31. Grigoriev SA, Korobtsev SV. Electrochemical Hydrogen Compressors/Concentrators Based on Solid Polymer Electrolyte. *Transport on Alternative Fuel*. 2011; 23(5):57-59. (In Russ).
32. Alexeyeva OK., Kozlov SI, Fateev VN. Hydrogen Transportation. *Transport on Alternative Fuel*. 2011; 21(3):18-24. . (In Russ).
33. Losev OG., Maruseva IV., Pushkaryov AS, et al Filling Station on Renewable Energy Sources for Hydrogen and Electric Transport. *Transport on Alternative Fuel*. 2013; 33(3):15-18. (In Russ).
34. Wen S, He G. Review of hydrogen station technology development through patent analysis. *Clean Energy*. 2018; (2):29-36, doi: 10.1093/ce/zky006.
35. Chikunov GV, Gaynutdinov FR. Hydrogen Fueling Stations - Operating Mode. *Energy-2022. Thermal Power Engineering: The Seventeenth All-Russian (Ninth International) Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. 11–13 May 2022; Ivanovo, Russia*. Ivanovo: ISPU, 2022. p. 87 (In Russ).
36. Ali MS, Khan M. SH, Tuhin RA, et al. Challenges of hydrogen storage and transportation: A review of recent advancements. *Hydrogen Energy Conversion and Management*. 2024; 255-287.
37. Abdin Z, Tang C, Liu Y, et al. Catchpole Current status and challenges of hydrogen storage technologies. *Towards Hydrogen Infrastructure. Elsevier*. 2024;101-132.
38. Zhao T, Liu Z. Investment in hydrogen refueling station based on compound real options. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;(57):198-209.
39. Makuieva DA, Razakova RI. The State and Prospects of Hydrogen Filling Stations Implementation. *Tinchurin Readings - 2023 "Energy and Digital Transformation": Proceedings of the International Youth Scientific Conference. In 3 volumes, 26–28 April 202, Kazan, Russia*. Kazan: KGEU, 2023. pp. 118-120. (In Russ).
40. Paster MD., Ahluwalia RK., Berry G, et al. Hydrogen storage technology options for fuel cell vehicles: well-to-wheel costs, energy efficiency, and greenhouse gas emissions. *Energy*. 2011;(36): 14534-14551, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.056.
41. Ramensky AYU. Hydrogen as a Fuel: The Subject and Objectives of Standardization. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2015;(1):33-44.
42. Zakirov RN., Chichirova ND., Filimonova AA, et al. Regulatory and Technical Documentation on Industrial Safety in Hydrogen Production // *News of Higher Educational Institutions. Energy Issues*. 2023; 25(5):91-100.
43. Marchi CS, Hecht ES, Ekoto IW, et al. Overview of the DOE hydrogen safety, codes and standards program, part 3: Advances in research and development to enhance the scientific basis for hydrogen regulations, codes and standards. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017; 42(11):7263-7274.
44. Pique S, Weinberger B, De-Dianous V. Comparative study of regulations, codes and standards and practices on hydrogen fuelling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(11):7429-7439.
45. Rothausen E., Rokni M. Optimization of total energy consumption at cascade refueling stations for hydrogen vehicles. *Energy*.2014;(39):582-592. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.066.
46. Arkharov I.A., Arkharov A.M., Navasardyan E.S. Comparison of Specific Energy Costs in Hydrogen Vapor Recondensation Cycles for Cryogenic Systems of Filling Stations. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2018;(4-6):57-69. (In Russ).
47. Zhua L, Leia G, Gaob J. Research on key influencing factors for site selection of DC microgrid-based hydrogen-electric hybrid refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023; 48(100):39759-39779. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.141.

48. Genovese M, Fragiaco P. Evolution of the hydrogen station towards a polygenerative energy system. *Energy*. 2022; (47):12264-12280. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.110.
49. Serdaroglu G, Huz M, Gillott M, et al. The impact of environmental conditions on the operation of a hydrogen refueling station. *Energy*. 2015;(40):17153-17162, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.003.
50. Reddy K, Elgowainy A, Rustagi N, et al. Impact of hydrogen refueling methods SAE J2601 on the refueling time of fuel cell passenger vehicles. *Energy*. 2017;(42):16675-16685. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.04.233.
51. Gye H-R, Seo S-K, Bach Q-V, et al. Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(2):1288-1298.
52. Yegorov AA, Fomin AV. Comparative Analysis of Hydrogen Filling Stations and Automotive Gas Filling Stations. *Current Problems of Fire Safety: Proceedings of the International XXXIV Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of the formation of the FGBU VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Balashikha, 23–24 August 2022*. Moscow: 2022. pp. 708-713. (In Russ).
53. Dmitriev AL, Ikonnikov VK. Hydrogen Filling Station Based on the Installation for Hydrogen Production by Hydrothermal Oxidation of Industrial Aluminum Powders. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2017;(10-12):75-85.
54. Arkharov IA, Arkharov AM, Navasardyan ES. Comparison of Specific Energy Costs in Hydrogen Vapor Recondensation Cycles for Cryogenic Systems of Filling Stations. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2018;(4-6):57-69.
55. Gainutdinova DF. Prospects for the Creation of Hydrogen Filling Stations. *Collection of Selected Articles Based on the Materials of Scientific Conferences of the GNI National Development, 28–30 March 2022, St. Petersburg, Russia*, St. Petersburg: National Development, 2022. pp. 144-146. (In Russ).

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, reginarazakova@yandex.ru

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 15.02.2024 г.

Отредактировано 27.02.2024 г.

Принято 07.03.2024 г.