Обзорная статья
УДК 620.93:662.769.21
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_99–104

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Саида Эриковна Гатиятова, Александр Сергеевич Черкасов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Российская Федерация

© Гатиятова С. Э., Черкасов А. С., 2026

Автор-корреспондент: С. Э. Гатиятова, e-mail: saida17122004@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В представленной статье проведено комплексное научное исследование перспектив внедрения водородных технологий в современные энергетические системы и генерирующие установки. Проанализированы ключевые физико-химические методы производства водорода, включая традиционную паровую конверсию углеводородов, электролиз воды на базе возобновляемых источников энергии и инновационные термохимические циклы атомно-водородной энергетики. Детально рассмотрены технико-экономические характеристики способов аккумулирования и транспортировки водородного топлива, такие как высоконапорное компримирование, криогенное сжижение, использование твердотельных металлогидридов и жидких органических носителей. Особое внимание уделено интеграции водорода в когенерационные и тригенерационные энергетические установки на базе топливных элементов различных типов, где оценена эффективность концепции «Power-to-Gas-to-Power» в парадигме балансировки стохастической генерации. Выявлены фундаментальные материаловедческие, инфраструктурные и нормативно-правовые барьеры, лимитирующие полномасштабную коммерциализацию отрасли. Обобщен передовой международный и отечественный опыт реализации водородных стратегий, подтверждающий необходимость системной государственной поддержки для достижения целевых показателей стоимости. Сделан обоснованный вывод о необратимости водородного энергоперехода как важнейшего инструмента достижения глобальной глубокой декарбонизации.

Ключевые слова: водородная энергетика, топливные элементы, электролиз воды, хранение водорода, энергетические установки, декарбонизация, энергопереход

Для цитирования: Гатиятова С. Э., Черкасов А. С. Перспективы использования водородных технологий в энергетических установках // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 99–104. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_99–104.

HYDROGEN TECHNOLOGIES IN POWER PLANTS: PROSPECTS AND APPLICATIONS

Saida Erikovna Gatiyatova, Alexander Sergeyevich Cherkasov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Corresponding author: S. E. Gatiyatova, e-mail: saida17122004@mail.ru

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive scientific study of the prospects for deploying hydrogen technologies in modern energy systems and generating facilities. The key physicochemical methods of hydrogen production were analyzed, including traditional steam reforming of hydrocarbons, water electrolysis powered by renewable energy sources, and innovative thermochemical cycles of nuclear-hydrogen power engineering. The study provides a detailed review of the technical and economic characteristics of hydrogen fuel storage and transportation methods, such as high-pressure compression, cryogenic liquefaction, solid-state metal hydrides, and liquid organic carriers. Special attention is given to integrating hydrogen into cogeneration and trigeneration energy systems based on various types of fuel cells, assessing the effectiveness of the "Power-to-Gas-to-Power" concept within the paradigm of balancing stochastic generation. The study identifies fundamental materials science, infrastructure, and regulatory-legal barriers that constrain the full-scale commercialization of the sector. Best practices in implementing hydrogen strategies both internationally and domestically have been summarized, confirming the need for systemic government support to achieve cost targets.

The study draws a substantiated conclusion that the hydrogen energy transition is irreversible and represents a key tool for achieving global deep decarbonization.

Keywords: hydrogen energy, fuel cells, water electrolysis, hydrogen storage, power plants, decarbonization, energy transition

For citation: Gatiyatova S. E., Cherkasov A. S. (2026) 'Prospects for the use of hydrogen technologies in power plants', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 99–104. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_99–104.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная трансформация мирового энергетического сектора, продиктованная беспрецедентным истощением легкоизвлекаемых запасов ископаемого топлива и необходимостью радикального снижения антропогенной эмиссии парниковых газов, требует внедрения принципиально новых, высокоэффективных и экологически чистых энергоносителей. В условиях стремительного наращивания доли возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая генерация, инженерно-научное сообщество сталкивается с острой проблемой их стохастичности и пространственно-временной неравномерности. Водород в данном контексте выделяется как наиболее перспективный вторичный энергоноситель: теплота его сгорания достигает 142 МДж/кг, что почти в три раза превосходит аналогичный показатель природного газа (около 50 МДж/кг), при этом продуктом его окисления является исключительно чистая вода [1, с. 71]. Интеграция водородного цикла в структуру современных энергетических установок позволяет создать гибкую систему долгосрочного аккумулирования энергии, способную демпфировать пиковые нагрузки и объединить секторы электроэнергетики, теплоснабжения и тяжелой промышленности. Развитие технологий генерации, безопасного хранения и конверсии водорода обратно в электрическую энергию формирует научно-технологический базис для перехода к устойчивой низкоуглеродной экономике.

Глубокий анализ перспектив использования водородных технологий в энергетических установках требует последовательного рассмотрения всей цепочки создания стоимости: от методов первичного синтеза водорода до способов его аккумулирования и конечного электрохимического преобразования. На сегодняшний день мировой спрос на водород оценивается приблизительно в 72 миллиона тонн в год, из которых на долю Российской Федерации приходится около 5 миллионов тонн, потребляемых преимущественно в процессах нефтепереработки и производства аммиака [1, с. 73]. Однако, согласно сценарию «Net Zero by 2050» Международного энергетического агентства (МЭА), для достижения углеродной нейтральности глобальное потребление водорода должно возрасти до 530 миллионов тонн к середине текущего столетия [2, с. 697], а по некоторым оптимистичным прогнозам макроэкономических моделей — вплоть до 1370 миллионов тонн [3, с. 629]. Доминирующими технологиями в настоящее время выступают паровая конверсия метана (SMR) и газификация угля, обеспечивающие низкую себестоимость (в диапазоне 1,20–2,50 долларов США за килограмм), но сопровождающиеся колоссальным углеродным следом, достигающим 10–12 кг CO2 на каждый килограмм произведенного газа [2, с. 708]. Переход к экологически чистой парадигме диктует необходимость масштабного внедрения методов электролиза воды на базе безуглеродной энергии.

Современные электролизные технологии для энергетических установок подразделяются на три основных класса, каждый из которых обладает специфическими эксплуатационными характеристиками. Наиболее коммерчески зрелыми являются щелочные электролизеры (AEL), использующие водные растворы гидроксида калия или натрия, обеспечивающие электрический КПД на уровне 60–70 % [4, с. 7]. Их ключевым недостатком выступает высокая инерционность, ограничивающая возможность эффективной работы в условиях резких перепадов мощности, характерных для ветровых и солнечных электростанций. Установки на основе протонообменных мембран (PEM), работающие в кислой среде с твердым полимерным электролитом, демонстрируют более высокую эффективность (70–85 %) и способны изменять нагрузку за доли секунды, что делает их идеальными для интеграции с возобновляемой генерацией [4, с. 7]. Тем не менее широкое внедрение технологии PEM лимитируется применением дорогостоящих катализаторов платиновой группы (иридия, рутения, платины), что требует фундаментальных материаловедческих прорывов для снижения удельного содержания благородных металлов [3, с. 631]. Третьим решением, наиболее термодинамически эффективным, является твердооксидный электролиз (SOEC), протекающий при температурах 700–1000 °C. За счет подвода части необходимой энергии в виде высокопотенциального тепла, эффективность таких систем достигает 85–90 % [4, с. 7].

Таблица. Технико-эксплуатационные характеристики топливных элементов
Table. Technical and operational characteristics of fuel cells

Тип топливного элемента	Рабочая температура	Электрический КПД	Особенности и применение
Протонообменные (PEMFC)	80–100 °C	50–60%	Высокая динамика: быстрый отклик и компактность. Подходят для резервного питания и микросетей. Требуют водород высокой чистоты.
Твердооксидные (SOFC)	800–1000 °C	60–80%	Максимальный КПД: работа на синтез-газе и аммиаке. Оптимальны для крупных ТЭЦ и промышленного пара.
Расплав-карбонатные (MCFC)	650–700 °C	60–80%	Устойчивость: не боятся примесей CO. Используются в мегаваттных установках для базовой генерации. Долгий запуск.
Фосфорнокислые (PAFC)	150–200 °C	40–50% (до 85% в режиме когенерации)	Надежность: ресурс >40 000 часов. Стандарт для коммерческого сектора (ЖКХ, офисы) при совместной генерации тепла и тока.

Именно твердооксидные технологии открывают колоссальные перспективы для развития атомно-водородной энергетики. Использование высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) с гелиевым теплоносителем позволяет напрямую передавать тепловую энергию реактора с температурой до 1000 °C в химико-технологическую часть установки. Российские разработки в этой области, координируемые ГК «Росатом», предполагают создание модульных ВТГР тепловой мощностью около 600 МВт, способных обеспечить крупномасштабное производство экологически чистого водорода (так называемого «желтого» или «розового» водорода) методами высокотемпературного электролиза или термохимических циклов, независимых от климатических условий [5, с. 492].

Решение задачи эффективного хранения и транспортировки синтезированного газа является критическим условием для надежного функционирования водородных энергетических установок. Водород обладает феноменальной гравиметрической плотностью энергии, однако его крайне низкая плотность в нормальных условиях (0,089 кг/м³) требует значительных энергозатрат на компактизацию. Традиционным методом является компримирование газа до давлений 350–700 бар с использованием композитных баллонов IV типа. Однако при таких давлениях возникает риск водородного охрупчивания: атомарный водород диффундирует в структуру металлической арматуры и сварных швов, снижая пределы прочности материалов и провоцируя зарождение микротрещин [7, с. 25]. Альтернативный метод криогенного хранения жидкого водорода реализуется при экстремально низкой температуре минус 253 °C, что обеспечивает плотность хранения около 71 кг/м³ [6, с. 11]. Главным барьером здесь выступают колоссальные затраты энергии на сжижение, поглощающие до 30% энергоемкости самого топлива, а также неизбежные потери на испарение (boil-off) в процессе хранения [7, с. 29]. В качестве прорывных альтернатив для стационарной энергетики научным сообществом активно исследуются системы твердотельного хранения на основе металлогидридов (например, гидридов магния, способных связывать до 7,6 масс. % водорода при умеренных давлениях), а также химические носители, такие как аммиак и жидкие органические водородные носители (LOHC) [7, с. 43]. Технология LOHC позволяет осуществлять обратимое гидрирование органических молекул (например, толуола или дибензилтолуола) и транспортировать водород в жидком виде при нормальных условиях, задействуя существующую инфраструктуру распределения нефтепродуктов.

Преобразование аккумулированного водорода обратно в электрическую и тепловую энергию осуществляется посредством топливных элементов, выступающих ядром современных водородных энергетических установок. В отличие от двигателей внутреннего сгорания, где эффективность ограничена циклом Карно, топливные элементы осуществляют прямое электрохимическое преобразование. Для систематизации данных о применяемых в стационарной энергетике технологиях целесообразно рассмотреть сравнительную таблицу основных типов топливных элементов (таблица).

В современных концепциях интеграции топливных элементов в энергосети (smart grids) особое место отводится системам тригенерации (CCHP — Combined Cooling, Heat and Power) (рисунок).

При использовании высокотемпературных топливных элементов сбросное тепло направляется не только на нужды отопления, но и в абсорбционные бромисто-литиевые холодильные машины для выработки холода. Подобная синергия позволяет довести общий коэффициент использования первичного топлива до 85–95%, радикально снижая энергоемкость зданий и промышленных объектов [8, с. 11]. Системы концепции «Power-to-Hydrogen-to-Power» (P2H2P)

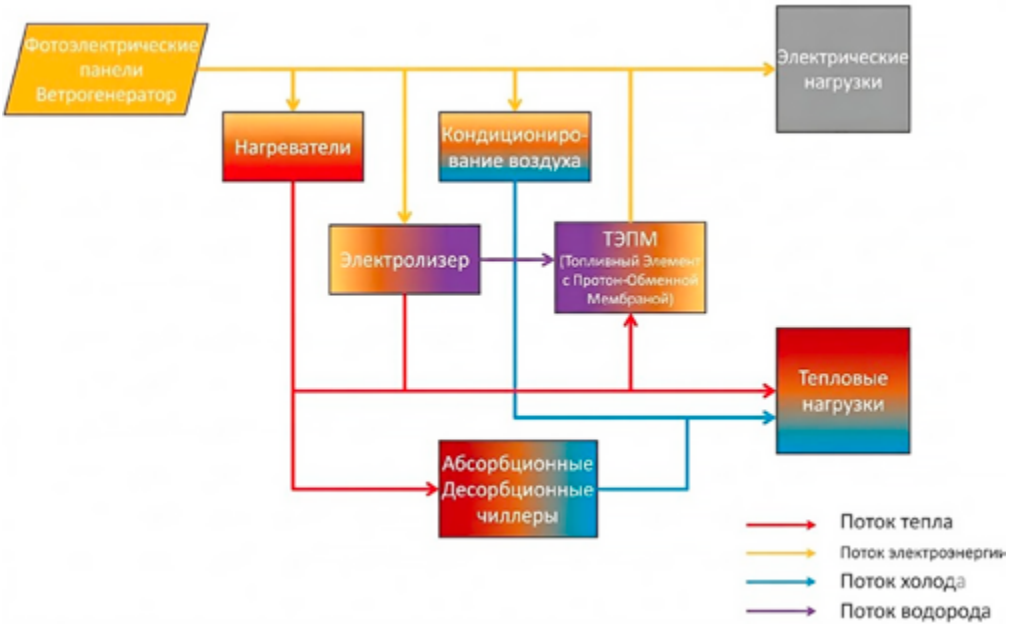


Рисунок. Демонстрация принципа работы системы тригенерации
Figure. Demonstration of the operational principle of a trigeneration system

рассматриваются сегодня как критически важный инструмент пространственно-временного арбитража энергии. Избыточная генерация ВИЭ конвертируется в водород, который при наступлении пиковых нагрузок или в периоды безветрия возвращается в сеть в виде электричества. И хотя круговой КПД таких систем пока ограничен физическими пределами термодинамики на уровне 35–50 %, именно водород обеспечивает уникальную возможность межсезонного запасания тераватт-часов энергии в подземных соляных кавернах, чего принципиально невозможно достичь с помощью классических электрохимических батарей [2, с. 722].

Переход водородных энергетических установок из статуса лабораторных и демонстрационных образцов в стадию коммерческой экспансии детерминирован государственным регулированием и инвестиционной активностью крупного бизнеса. На сегодняшний день более 40 государств утвердили национальные водородные стратегии, рассматривая данный ресурс не только как экологический императив, но и как фактор геополитической энергонезависимости [9, с. 355]. Катализатором глобального рынка выступают масштабные субсидии; так, в рамках Закона о снижении инфляции (IRA) в США введен беспрецедентный налоговый вычет (до 3 долларов за килограмм), что в перспективе до 2030 года способно обрушить приведенную стоимость (LCOH) зеленого водорода до уровня менее 1 доллара за килограмм, сделав его абсолютным конкурентом ископаемому топливу [2, с. 724]. В Российской Федерации, согласно утвержденной Концепции развития водородной энергетики, реализуется стратегия создания крупных территориальных кластеров. Ярким примером служит проект Госкорпорации «Росатом» по созданию водородного комплекса на базе мощностей Кольской АЭС (с резервом до 200 МВт) с плановой производительностью около 25 тысяч тонн водорода в год, а также масштабные проекты ПАО «Газпром» по мембранному выделению водорода из газотранспортных магистралей и производству бирюзового водорода методом пиролиза метана [10, с. 431]. Консолидация усилий государства, научного сектора и промышленных конгломератов формирует устойчивый вектор на полномасштабное внедрение водородных решений в энергетический ландшафт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Водородные технологии перестали быть исключительно футурологическим концептом, трансформировавшись в практически реализуемый инструмент для обеспечения макроэкономической стабильности и достижения глобальной углеродной нейтральности. Использование водорода в качестве вторичного энергоносителя в стационарных энергетических установках — от высокоманевренных электролизеров, интегрированных с ВИЭ, до мощных когенерационных систем на базе твердооксидных топливных элементов — открывает беспрецедентные возможности для долгосрочного аккумулирования энергии и глубокой декарбонизации

смежных отраслей. Безусловно, на пути к формированию полноценной водородной экономики стоят серьезные вызовы: необходимость снижения капитальных затрат на электролизное оборудование, поиск инновационных материалов, устойчивых к водородному охрупчиванию, а также создание рентабельных крупнотоннажных систем криогенного и твердотельного хранения. Однако экспоненциальный рост патентной активности, мультимиллиардные государственные дотации и реализация мегапроектов транснациональными корпорациями свидетельствуют о том, что этап концептуального становления пройден. В перспективе ближайших десятилетий именно водородные энергетические установки станут становым хребтом новой, экологически устойчивой, надежной и высокоэффективной архитектуры мировой энергетики.

Список литературы

1. Яруллин Р. С., Салихов И. З., Черезов Д. С., Нурисламова А. Р. Перспективы водородных технологий в энергетике и в химической промышленности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 70–83.
2. Boukhchina R., Hamdi M., El Alimi S. Power-to-hydrogen: A review of applications, market development, and policy landscape // AIMS Energy. 2025. Vol. 13 (3). P. 696–731.
3. Филиппов С. П., Ярославцев А. Б. Водородная энергетика: перспективы развития и материалы // Успехи химии. 2021. Т. 90 (6). С. 627–643.
4. Barba J., Cañas-Carretón M., Carrión M., Hernández-Labrado G. R., Merino C., Muñoz J. I., Zárate-Miñano R. Integrating Hydrogen into Power Systems: A Comprehensive Review // Sustainability. 2025. Vol. 17. Article 6117.
5. Пономарёв-Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91, № 5. С. 484–498.
6. Youssef M. M. M., Maghraby A., Abdel-Akher M., Hamdan I. Recent advances in hydrogen production technologies: environmental and economic perspectives // Journal of Engineering and Applied Science. 2026. Vol. 73:8.
7. Pan X., Zhou H., Baimbetov D., Syrlybekkyzy S., Akhmetov B. B., Abbas Q. Development Status and Future Prospects of Hydrogen Energy Technology: Production, Storage, and Cost Analysis // Advanced Energy and Sustainability Research. 2025. Vol. 6, 2400451.
8. Yue M., Lambert H., Pahon E., Roche R., Jemei S., Hissel D. Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 146, 111180.
9. Марчук Н. П., Туровец Ю. В. Перспективы развития рынка водородных технологий: приоритеты государства и бизнеса // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2024. Т. 40. Вып. 3. С. 355–386.
10. Саитова А. А., Ильинский А. А., Джемилёв Э. Р. Перспективы развития водородной энергетики Российской Федерации // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». 2023. Т. 18. № 4. С. 423–444.

References

1. Yarullin R. S., Salikhov I. Z., Cherezov D. S. and Nurislamova A. R. (2021) 'Prospects of hydrogen technologies in the energy sector and chemical industry', Proceedings of Higher Educational Institutions. ENERGY PROBLEMS, 23(2), pp. 70–83.
2. Boukhchina R., Hamdi M. and El Alimi S. (2025) 'Power-to-hydrogen: A review of applications, market development, and policy landscape', AIMS Energy, 13 (3), pp. 696–731.
3. Filippov S. P. and Yaroslavtsev A. B. (2021) 'Hydrogen energy: development prospects and materials', *Russian Chemical Reviews*, 90 (6), pp. 627–643.
4. Barba J., Cañas-Carretón M., Carrión M., Hernández-Labrado G. R., Merino C., Muñoz J. I. and Zárate-Miñano R. (2025) 'Integrating hydrogen into power systems: A comprehensive review', *Sustainability*, 17, Article 6117.
5. Ponomarev-Stepnoy N. N. (2021) 'Nuclear-hydrogen energy', *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 91 (5), pp. 484–498.
6. Youssef M. M. M., Maghraby A., Abdel-Akher M. and Hamdan I. (2026) 'Recent advances in hydrogen production technologies: environmental and economic perspectives', *Journal of Engineering and Applied Science*, 73:8.
7. Pan X., Zhou H., Baimbetov D., Syrlybekkyzy S., Akhmetov B. B. and Abbas, Q. (2025) 'Development status and future prospects of hydrogen energy technology: production, storage, and cost analysis', *Advanced Energy and Sustainability Research*, 6, 2400451.
8. Yue M., Lambert H., Pahon E., Roche R., Jemei S. and Hissel D. (2021) 'Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180.
9. Marchuk N. P. and Turovets Yu. V. (2024) 'Prospects for the development of the hydrogen technology market: priorities of the state and business', *Vestnik of Saint Petersburg University. Economics*, 40 (3), pp. 355–386.
10. Saitova A. A., Ilinsky A. A. and Dzhemilev E. R. (2023) 'Prospects for the development of hydrogen energy in the Russian Federation', *Bulletin of Perm University. Series «Economics»*, 18 (4), pp. 423–444.

Информация об авторах

Гатиятова Саида Эриковна, *студентка, Институт тепловой и атомной энергетики Казанского государственного энергетического университетаж 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51; e-mail: saida17122004@mail.ru.*

Черкасов Александр Сергеевич, *ассистент кафедры атомных и тепловых электрических станций, Институт тепловой и атомной энергетики Казанского государственного энергетического университета; 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51; e-mail: sanekpuer@mail.ru.*

Information about the authors

Gatiyatova Saida Erikovna, *student, Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering, Kazan State Power Engineering University; 51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia; e-mail: saida17122004@mail.ru.*

Cherkasov Alexander Sergeevich, *Assistant at the Department of Nuclear and Thermal Power Plants, Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering, Kazan State Power Engineering University; 51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia; e-mail: sanekpuer@mail.ru.*