

УДК 620.9

ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Абрамова Д.А., аспирант, 4 курс;

Боярский М.А., студент, 4 курс;

Кравцова К.С., студент, 4 курс;

Трофимов К.Д., студент, 4 курс;

Юрасов А.А., студент, 4 курс;

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Аннотация: В статье рассматривается роль водорода как перспективного энергоносителя в контексте глобального энергетического перехода. Показано, что рост цен на ископаемое топливо и ужесточение экологических требований стимулируют развитие водородных технологий в ключевых секторах экономики — топливно-энергетическом комплексе, промышленности, транспорте и нефтехимии. Особое внимание уделено способам производства водорода, включая инновационные решения на базе высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР), которые способны существенно повысить КПД процесса за счёт высокотемпературного электролиза и термохимических циклов.

Ключевые слова: водород, водородная энергетика, ВИЭ, декарбонизация, топливно-энергетический комплекс, металлургия, транспорт, нефтехимия, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР), электролиз.

В условиях глобального энергетического перехода водород всё чаще рассматривается как ключевой энергоноситель будущего. Увеличение стоимости традиционных энергоресурсов, усиление климатической повестки и необходимость интеграции возобновляемых источников энергии формируют устойчивый спрос на низкоуглеродные водородные технологии. Их внедрение способно решить ряд системных задач — от снижения углеродного следа в энергоёмких отраслях до создания эффективных накопителей энергии. В этой связи особую значимость приобретает анализ перспективных направлений применения водорода и оценка потенциала инновационных технологий его производства, в том числе на базе высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов.

Выделим основные отрасли перспективного применения водорода на основе прогноза потребления по сегментам: топливно-энергетический комплекс (ТЭК), промышленность, транспорт и отрасль нефтехимии.

Топливо-энергетический комплекс

Согласно данным Международного энергетического агентства (IEA), в период с 2010 по 2021 год наблюдался рост цен на основные ископаемые ресурсы: нефть, уголь и природный газ (рис. 1). Рост обусловлен рядом факторов, включая геополитическую напряженность, восстановление спроса после пандемии COVID-19 и ограниченные инвестиции в новые проекты добычи. Особенно резкий скачок цен на природный газ был зафиксирован в 2021 году, что вызвало обеспокоенность по поводу энергетической безопасности во многих странах.

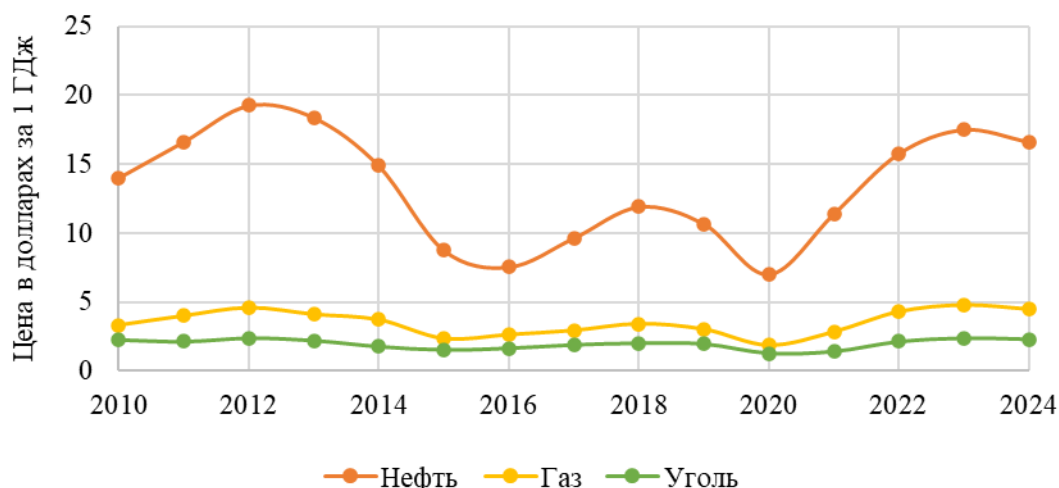


Рисунок 1 – Динамика мировых цен на нефть, уголь и природный газ (2010 – 2024 гг.)

Несмотря на усиления мер декарбонизации, мировое потребление угля продолжает расти (рис. 2). По данным IEA [1], в 2023 году потребление угля достигло рекордных уровней, особенно в странах Азии, где уголь остается основным источником энергии для металлургии и электроэнергетики.

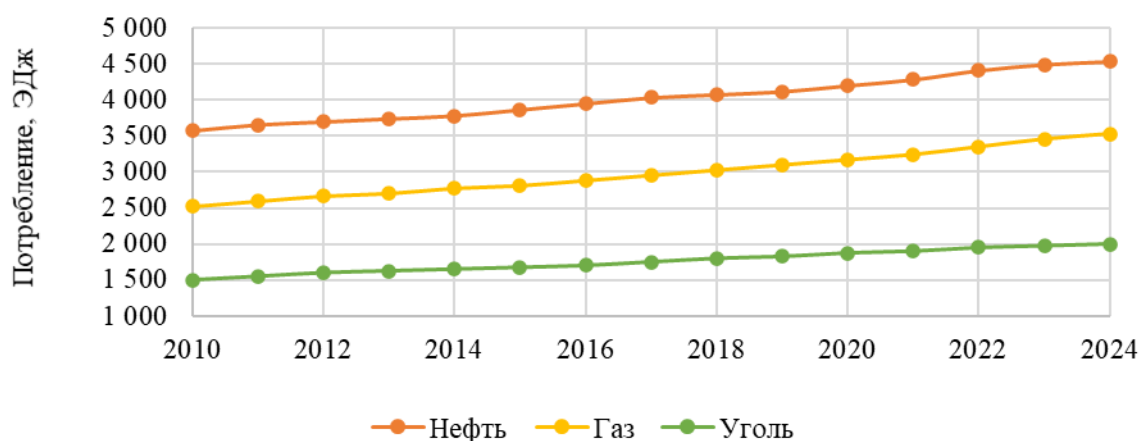


Рисунок 2 – Мировое потребление ископаемого топлива (2010 – 2024 гг.)

Рост цен и потребления ископаемых ресурсов подталкивает страны к ускоренному переходу на возобновляемые источники энергии (ВИЭ), такие как солнечная и ветровая энергетика. Именно поэтому в настоящее время наблюдается тенденция на увеличении доли ВИЭ в общей выработке электроэнергии.

В России сектор возобновляемых источников энергии (ВИЭ) демонстрирует устойчивый рост: к началу 2025 года установленная мощность ВИЭ-генерации достигла 6,52 ГВт (из них 2,57 ГВт — ветровые и 2,55 ГВт — солнечные электростанции), а объём выработки в 2024 году составил 14,2 млрд кВт·ч [2]. В глобальном масштабе динамика ещё масштабнее: по прогнозу Международного энергетического агентства, к 2030 году мировая мощность ВИЭ вырастет в 2,6 раза по сравнению с 2022 годом (до 4600 ГВт), а их доля в мировом энергопотреблении достигнет почти 30 % [1]. Основной вклад обеспечат солнечная и ветроэнергетика, при этом лидирующие позиции по приросту мощностей сохраняет Китай, за которым следует Индия с трёхкратным увеличением генерации за пятилетие.

Однако полная замена ископаемых ресурсов на ВИЭ невозможна в краткосрочной перспективе, так как возобновляемая энергетика имеет недостатки: малая маневренность, невозможность покрытия пиковой нагрузки, а также зависимость от времени года и суток.

Следовательно, формируется устойчивая тенденция, направленная на оптимизацию работы возобновляемых источников благодаря интеграции водородных технологий.

Промышленный сектор.

Коксующийся уголь – ключевой элемент традиционной металлургии, особенно в доменных процессах. Однако в последние годы отмечается устойчивая тенденция к сокращению добычи. Согласно международной статистике, с 2015 по 2023 год глобальное производство коксующегося угля снизилось с 1 150 до 1 005 млн тонн, что связано с истощением доступных запасов и ужесточением экологических требований (рис. 3).

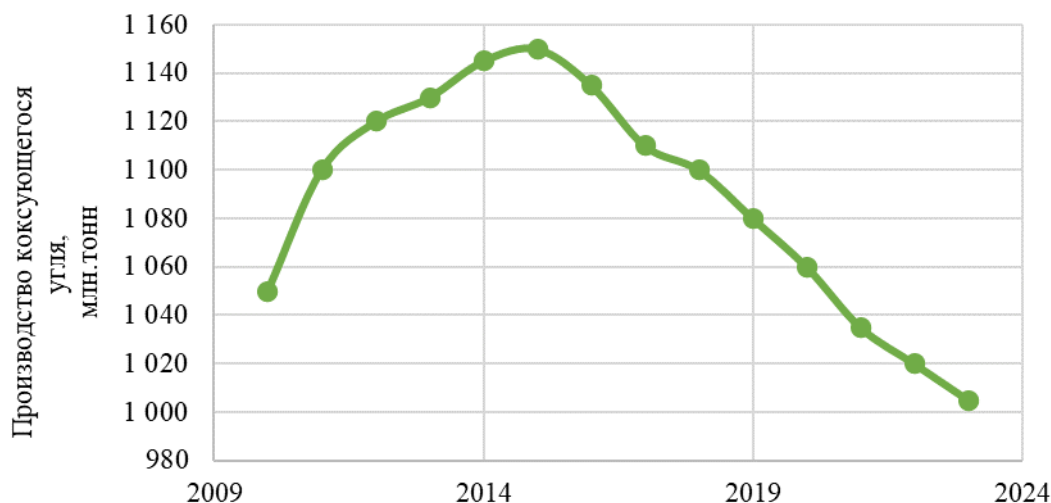


Рисунок 3 – Производство коксующегося угля на период 2010 – 2023 гг. в мире

Следовательно, возрастает стратегическая необходимость поиска альтернатив. Наиболее перспективным направлением является использование водорода в металлургии – прежде всего в технологии прямого восстановления железа (DRI). В таблице 1 представлено сравнение технологий. Технология прямого восстановления железа на водороде позволяет сократить выбросы CO₂ в 6 раз.

Таблица 1 – Сравнение технологий восстановления железа

Технология	Выбросы кг CO ₂ на тонну стали
Классическая доменная печь	1 800
Технология DRI на природном газе	1 200
DRI на водороде	300

Таким образом, сокращение запасов угля и экологические требования делают использование водорода не просто технологической альтернативой, но и экономическим приоритетом в условиях трансформации мировых рынков стали.

В химической промышленности водород уже давно является ключевым компонентом для производства аммиака и метанола. Для повышения экологичности продукции существует тенденция на замещение традиционного водорода на «зеленый» в производстве аммиака и метанола.

Транспорт.

Легковой и коммерческий автотранспорт остаётся одним из основных источников выбросов CO₂ в мире. В настоящее время ключевая тенденция – постепенный отказ от автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в пользу электромобилей и водородного транспорта.

Согласно статистике [3], за период с 2015 по 2024 год мировой автопарк автомобилей с ДВС установился на уровне около 1,3 млрд единиц, в то время как число электромобилей выросло с 1,2 млн до 34 млн, а водородных автомобилей – с 10 тыс. до 500 тыс (рис. 4). Рост отражает как государственную поддержку, так и изменение потребительских предпочтений в пользу экологичного транспорта.

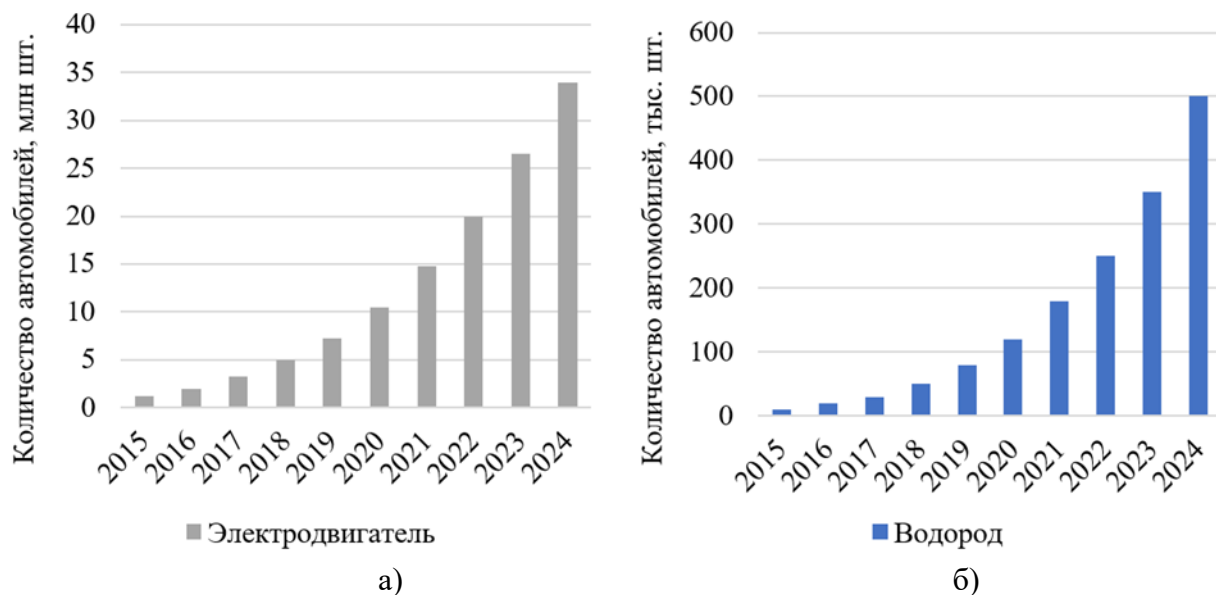


Рисунок 4 – Рост использования автомобилей на ВИЭ электродвигателем (а) и на водороде (б)

Водородный транспорт развивается медленнее из-за высокой стоимости топливных элементов и дефицита водородных заправок. Основные ниши — междугородные грузовики и общественный транспорт, где критична дальность пробега и время заправки. Пилотные проекты реализуются в Германии, Японии и Южной Корее; в ЕС действует программа H2Nodes по созданию сети водородных коридоров.

Ключевыми барьерами остаются:

- высокая начальная стоимость экологических автомобилей;
- недостаточная плотность зарядной/заправочной инфраструктуры;
- ограниченность сырьевой базы для аккумуляторов (литий, кобальт);
- вопросы утилизации батарей и водородных систем.

В то же время снижение себестоимости литий-ионных аккумуляторов (на 80 % за последнее десятилетие) и рост эффективности топливных элементов указывают на долгосрочную тенденцию к удешевлению «зелёного» транспорта. По прогнозам IEA, к 2030 году доля электромобилей и водородных машин в мировых продажах новых легковых автомобилей может достичь 40–50 %, что существенно сократит углеродный след транспортного сектора [3].

Отрасль нефтехимии.

Водород широко используется в нефтехимической отрасли, и одним из его основных применений является процесс гидрокрекинга — каталитическая переработка тяжёлых нефтепродуктов, позволяющая получать более высококачественные продукты (бензин, дизельное топливо и мазут). Процесс существенно улучшает качество и чистоту конечных продуктов, что особенно важно в условиях ужесточения экологических стандартов, таких как Евро-5, Евро-6 и требования ИМО для судовых топлив.

В современной нефтеперерабатывающей отрасли наблюдается активное развитие водородных технологий. Оптимизация использования водорода затрагивает ключевые процессы: гидроочистку нефтепродуктов, гидродесульфуризацию и производство

высокооктановых компонентов. Для производства одной тонны дизельного топлива с содержанием серы менее 10 ppm требуется от 100 до 150 нм³ водорода, а при гидрокрекинге вакуумного газойля расход водорода составляет 1,5–3% от массы сырья.

Нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) активно интегрируют водородные технологии в производственные процессы, модернизируя установки для повышения эффективности использования водорода. Внедряются решения по мембранной сепарации для рекуперации водорода из отходящих газов, что позволяет повысить извлечение на 15–25 %, а также используются адсорбционные установки короткоциклового очистки (PSA) для достижения чистоты водорода до 99,99 % [4]. Создаётся необходимая инфраструктура для хранения и транспортировки водорода, формируются замкнутые циклы производства.

Особое внимание уделяется снижению углеродного следа отрасли. Развиваются технологии перехода на «голубой» водород с улавливанием CO₂ при паровом риформинге, реализуются пилотные проекты по использованию «зелёного» водорода (полученного путём электролиза воды на ВИЭ) для критических процессов. Интеграция установок CCS (улавливание и хранение CO₂) с водородными блоками позволяет существенно сократить выбросы парниковых газов.

Экономическая эффективность такого перехода обеспечивается за счёт оптимизации производственных процессов и государственной поддержки водородных проектов. Несмотря на преимущества, масштабное внедрение сталкивается с рядом барьеров: высокой стоимостью «зелёного» водорода (в 2–3 раза дороже традиционного), значительными капитальными затратами на модернизацию установок (от 50 млн долларов для крупного НПЗ) и дефицитом инфраструктуры для транспортировки и хранения H₂.

Для стимулирования развития отрасли в ряде стран действуют налоговые льготы на инвестиции в водородные технологии, вводятся квоты на использование низкоуглеродного водорода в нефтепереработке, выделяются гранты на НИОКР в области электролиза и CCS. В России развитие водородной нефтепереработки включено в «Энергетическую стратегию до 2035 года». Реализуются проекты по модернизации гидрокрекингowych установок на заводах «Роснефти» и «Лукойла», создаются пилотные водородные кластеры в Татарстане и ХМАО, ведётся разработка отечественных технологий электролиза для интеграции с НПЗ.

К 2030 году ожидается рост доли низкоуглеродного водорода в нефтепереработке до 15–20 % (против менее 5 % в 2024 году), снижение удельных выбросов CO₂ на НПЗ на 20–30 % за счёт технологии улавливания и хранения углекислого газа и оптимизации водородных циклов, а также увеличение глубины переработки нефти на 5–7 процентных пунктов благодаря модернизации гидрокрекингowych блоков. Таким образом, водородные технологии становятся неотъемлемым элементом трансформации нефтепереработки, обеспечивая баланс между требованиями экологии, качеством продукции и экономической эффективностью.

Количество регламентирующих стратегий и объёмы инвестиций в водородную энергетику

По данным отчёта IEA 2024 [1], за последние годы наблюдался значительный, но неравномерный рост числа национальных стратегий по развитию водородной энергетики (рис. 5). Особенно активное развитие происходило в 2021 – 2022 гг., когда ведущие страны начали официально закреплять водород в национальных энергетических стратегиях.

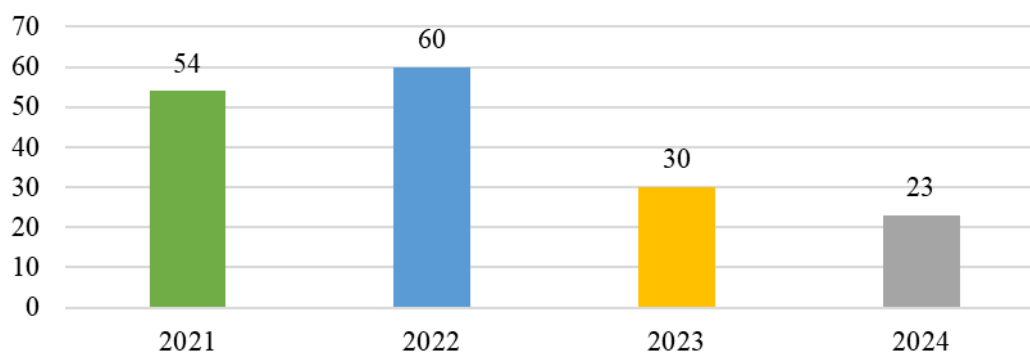


Рисунок 5 – Число национальных водородных стратегий

Пик числа активных стратегий пришёлся на 2022 год – водородные инициативы охватывали страны, потребляющие 82 % мирового энергоресурса. Однако в последующие годы число реально реализуемых или обновленных стратегий снизилось. В 2024 году доля энергосистем с действующими стратегиями составляет лишь 22 %, что, вероятно, связано с переоценкой ранее объявленных планов, задержками в реализации и переходом к конкретным проектам вместо декларативных документов.

IEA также отмечает, что глобальные расходы на строительные проекты в области водорода в 2023 году составили \$3,5 млрд, из которых около 80 % – на электролизеры (рис. 6). Данные по общим инвестициям в водородную энергетику (включающим хранение, транспортировку, переработку и потребление) доступны лишь частично, однако к 2030 – 2035 году ожидается резкий рост этого показателя.

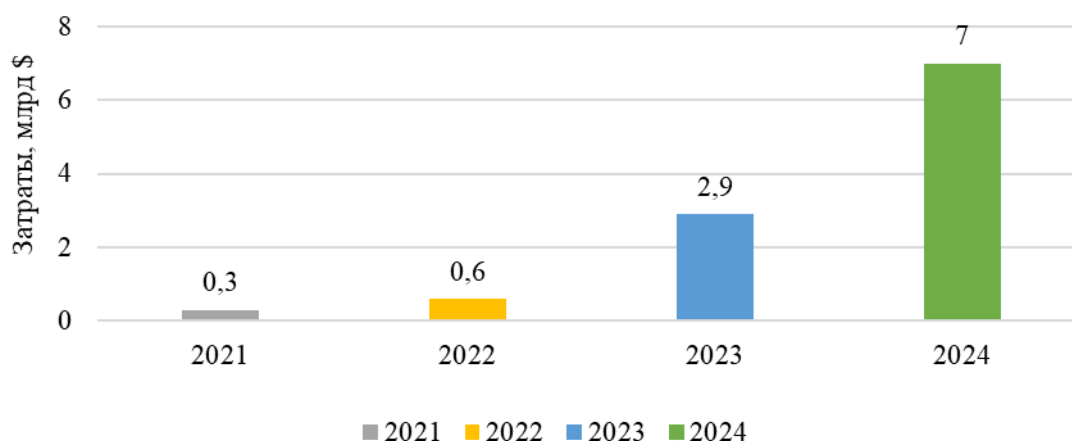


Рисунок 6 – Затраты на установку электролизеров

Ожидается, что общий объем глобальных инвестиций в водородную экономику до 2030 года может достичь \$320 млрд, из которых \$100 – 150 млрд уже анонсированы [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Таким образом, мировые инвестиции в ВЭ демонстрируют устойчивый рост, что подтверждается масштабными проектами ведущих компаний и государственными стратегиями, направленными на развитие производства и инфраструктуры «зелёного» водорода. Увеличение финансирования водородных технологий обусловлено стремлением создать конкурентоспособную низкоуглеродную экономику.

Производство электролизеров и топливных элементов

Развитие водородной энергетики зависит от двух ключевых технологий: топливных элементов и электролизеров. Электролизеры вырабатывают водород с помощью электричества, а топливные элементы имеют обратную функцию – преобразуют энергию водорода в электричество. В основе данного процесса лежит химическая реакция окисления водорода, в результате – электроэнергия.

Производство электролизеров для зеленого водорода демонстрирует стремительный рост: в 2023 году мировая установленная мощность электролизеров достигла 1,4 ГВт, а к концу 2024 года ожидается увеличение до 5 ГВт, причем Китай обеспечивает около 70% новых мощностей. Глобальная производственная мощность электролизеров в 2023 году удвоилась до 25 ГВт/год, из которых 60% приходится на Китай, но используется лишь 2,5 ГВт из-за низкого спроса. В Европе установленная мощность выросла с 85 МВт в 2019 году до 191–500 МВт к концу 2023 года, а к 2026 году планируется достичь 1,37 ГВт (рис. 7). К 2030 году, согласно прогнозам, глобальная мощность электролизеров может достичь 95–520 ГВт, хотя только 4% проектов имеют окончательное инвестиционное решение. Китай планирует установить 38–100 ГВт к 2030 году, что превышает внутренний спрос, а Европа нацелена на 140 ГВт для производства 10 млн тонн зеленого водорода. Рынок электролизеров растет с темпом 40,7% в год и, по прогнозам, к 2034 году достигнет 70 млрд долларов США благодаря инвестициям в декарбонизацию.

Мощность производства (ГВт/год)/год

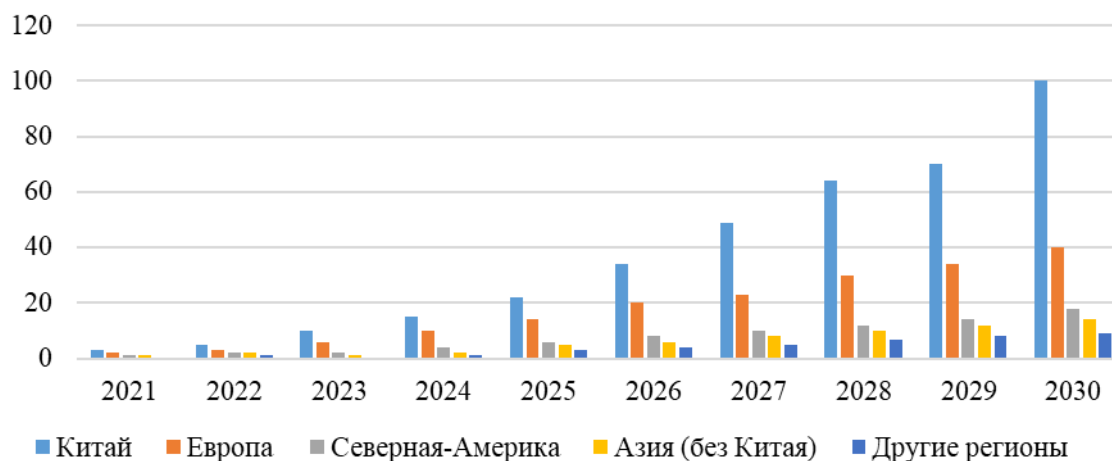


Рисунок 7 – Плановые мощности производства электролизеров по регионам на период 2021–2030 гг.

Технологии в области топливных элементов

В 2023 году мировая установленная мощность электролизеров для производства зеленого водорода достигла 1,4 ГВт, а в 2026 году ожидается рост до 5 ГВт, причем Китай обеспечивает около 70% новых мощностей.

Основные технологии электролизеров включают щелочные (AWE), которые составляют около 85% рынка благодаря низкой стоимости (CAPEX \$500–1000/кВт) и долговечности (до 100,000 часов), но имеют низкую плотность тока и медленный отклик. Протонообменные мембраны (PEM) занимают около 15% рынка, стоят дороже (\$1000–2000/кВт) из-за использования платины и иридия, но обеспечивают высокую плотность тока и гибкость, что делает их идеальными для интеграции с возобновляемыми источниками энергии, как в проекте NEOM в Саудовской Аравии (2,2 ГВт). Твердооксидные электролизеры (SOEC), работающие при 700–1000°C с КПД до 90%, пока составляют менее 1% рынка из-за высоких затрат (\$2000–3000/кВт), но перспективны для промышленных процессов с избыточным теплом. Анионообменные мембраны (AEM) находятся на

экспериментальной стадии, сочетая низкую стоимость щелочных электролизеров и гибкость протонообменных мембран, с потенциальным CAPEX \$300–500/кВт.

Топливные ячейки, преобразующие водород в электроэнергию с КПД 40–60% (до 90% с учетом тепла), активно развиваются для транспорта и стационарных систем. Лидирующую позицию занимают протонообменные мембранные элементы (PEMFC) с долей рынка 75% и КПД 45–60%, которые чаще всего используются для транспорта.

Твердоокисные элементы (SOFC) занимают 10% рынка. Они работают при температуре 600–1000°C и используются в стационарных установках мощностью от 5 кВт до 1 МВт для энергоснабжения зданий. Их общая мощность в 2023 году составила 0,2 ГВт.

Фосфорнокислые элементы (PAFC) с КПД 40–50% и стоимостью около \$4000 за киловатт применяются в системах мощностью 200–400 кВт, например, в больницах. Именно поэтому их доля составляет около 5%.

Прочие технологии, включая щелочные и карбонатные элементы, занимают менее 5% рынка и используются в специальных областях, таких как космические программы или угольные электростанции с улавливанием CO₂.

В 2023 году объем рынка топливных элементов достиг 5,9 млрд долларов. Прогнозируется рост до 28,3 млрд долларов к 2030 году при среднегодовом темпе роста 25%. В транспортном секторе насчитывается 80 000 водородных автомобилей, из которых 70% оснащены PEMFC. В стационарных системах установлено 1,5 ГВт мощностей, где 60% приходится на PEMFC и 25% на SOFC.

Китай лидирует с 50% мировых поставок, за ним следуют Южная Корея и Япония. Основные тенденции развития включают снижение зависимости от платины благодаря новым катализаторам, увеличение мощности модулей и интеграцию с зеленым водородом.

Таким образом, рынок оборудования для водородной энергетики, на примере топливных элементов и электролизеров, демонстрирует значительный рост: в настоящий момент объем рынка составляет \$5 – 7 млрд, то к 2050 году прогнозируемое значение \$200 – 225 млрд.

Водородная энергетика на базе АЭС

Атомные электростанции (АЭС) обладают значительным потенциалом для производства водорода — ключевого энергоносителя «зелёной» экономики. Сочетание ядерной генерации с технологиями водородной энергетики открывает возможности для создания устойчивых, масштабируемых и низкоэмиссионных производственных цепочек.

Основная идея заключается в использовании избыточной или базовой электроэнергии АЭС для электролиза воды — процесса, при котором вода расщепляется на водород и кислород под действием электрического тока. Поскольку АЭС работают в режиме постоянной мощности, они могут обеспечивать непрерывную загрузку электролизеров, что повышает эффективность и экономическую целесообразность производства водорода.

Преимущества интеграции водородных технологий на АЭС [6]:

1. Низкий углеродный след: водород, полученный от АЭС, относится к категории «жёлтого» или «оранжевого» (в зависимости от методологии классификации), что делает его сопоставимым с «зелёным» водородом по уровню выбросов CO₂.
2. Использование избыточной генерации: в периоды низкого спроса на электроэнергию АЭС могут перенаправлять энергию на производство водорода, снижая потери и повышая общую эффективность станции.
3. Энергетическая безопасность: водород может служить накопителем энергии, сглаживая колебания спроса и обеспечивая резервные мощности.

4. Многофункциональность: полученный водород применим в транспорте (топливные элементы), промышленности (сырьё для химии и металлургии) и энергетике (добавка к природному газу).

На практике такие проекты уже реализуются: например, в Японии и Франции проводятся пилотные программы по интеграции электролизеров с АЭС [7]. В России также рассматриваются возможности использования мощностей АЭС для производства водорода, особенно в регионах с высокой долей атомной генерации.

В России также рассматриваются возможности использования мощностей АЭС для производства водорода, особенно в регионах с высокой долей атомной генерации. Однако традиционные водо-водяные реакторы, преобладающие в отечественном атомном флоте, ограничены в эффективности водородной конверсии: их температурный потенциал (около 300–330 °С) позволяет применять лишь низкотемпературный электролиз, КПД которого не превышает 30–35 %.

На этом фоне особую актуальность приобретают разработки в области высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) — технологии, способной радикально изменить экономику водородного производства (рис. 8). В отличие от классических АЭС, ВТГР работают при температурах 750–950 °С, что открывает доступ к двум прорывным методам:

- высокотемпературному электролизу (КПД до 45–50 %);
- термохимическим циклам (например, серно-йодному процессу), где разложение воды происходит за счёт тепла без затрат электроэнергии.

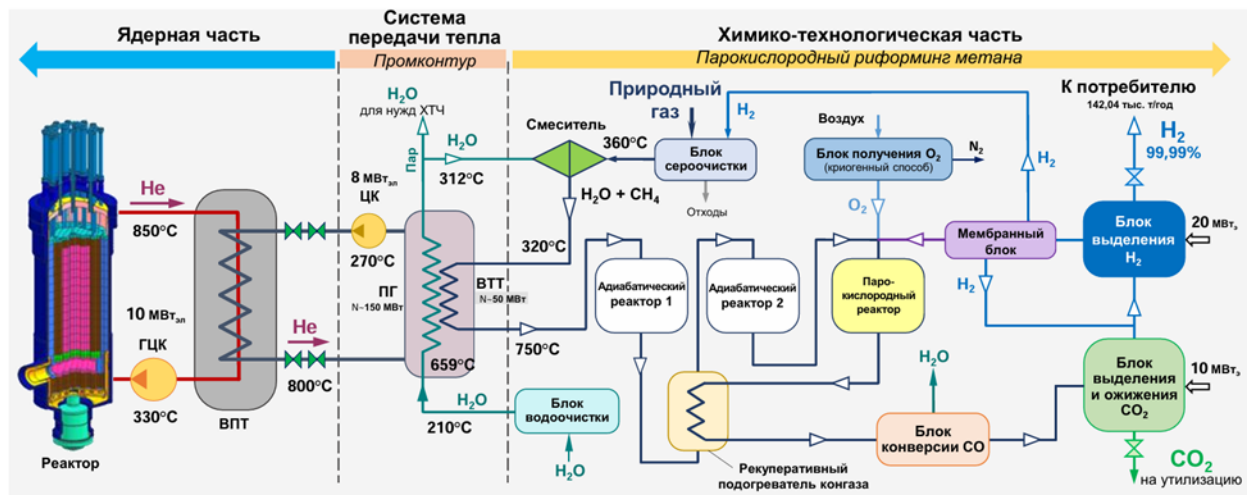


Рисунок 8 – Структурная схема атомной энерготехнологической Станции с реакторной установкой ВТГР

Для российской энергетики ВТГР могут стать ключевым элементом стратегии декарбонизации. Их внедрение позволит:

- снизить себестоимость водорода за счёт высокого теплового КПД (45–50 % против 33–37 % у ВВЭР);
- интегрировать производство водорода в технологические цепочки нефтехимии и металлургии через прямое теплоснабжение процессов;
- использовать существующие компетенции в ядерных технологиях, адаптируя их под новые задачи.

Уже ведутся исследования по реакторам типа ВТГР-М, ориентированным на комбинированную генерацию электроэнергии и водорода. Пилотные проекты могут быть развёрнуты в регионах с развитой атомной инфраструктурой — например, на площадках Ленинградской или Курской АЭС, где есть возможность создать водородные кластеры с замкнутым циклом использования тепла.

Таким образом, переход от традиционных АЭС к ВТГР — не просто техническая модернизация, а стратегический шаг к формированию в России конкурентоспособной низкоуглеродной водородной экономики.

Заключение

Проведённый анализ демонстрирует, что водород становится ключевым элементом глобальной энергетической трансформации, охватывая широкий спектр отраслей — от производства электроэнергии до транспорта и нефтехимии. Рост цен на ископаемое топливо, ужесточение экологических требований и развитие возобновляемых источников энергии формируют устойчивый спрос на низкоуглеродные водородные технологии.

Особую роль в этом процессе могут сыграть высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР), способные существенно повысить КПД производства водорода за счёт высокотемпературного электролиза и термохимических циклов. Таким образом, симбиоз атомной и водородной энергетики способен стать важным элементом энергетического перехода, сочетая надёжность базовой генерации с экологичностью низкоуглеродных технологий.

Список литературы

1. Международное энергетическое агентство (IEA) Электронный ресурс // Global Hydrogen Review 2024. — URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf> (дата обращения: 09.04.2025).
2. О перспективах развития экономики РФ [Электронный ресурс] // ТАСС : информационное агентство. — 2025. — URL: <https://tass.ru/ekonomika/23754097?ysclid=mhs7rovsob776725845> (дата обращения: 09.11.2025).
3. Международное энергетическое агентство (IEA) Электронный ресурс // Global EV Outlook 2024: Отчет о развитии электромобилей в мире. — URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> (дата обращения: 15.06.2025).
4. Производство водорода методом короткоциклового адсорбции (PSA) [Электронный ресурс] // ALLY HI-TECH CO., LTD : официальный сайт. — URL: <https://ru.ally-hydrogen.com/3-hydrogen-by-psa-product/> (дата обращения: 09.11.2025).
5. Hydrogen Council, McKinsey & Company // Hydrogen Insights 2023: Состояние глобальной водородной экономики с углубленным анализом эволюции затрат на производство возобновляемого водорода. — URL: <https://www.hydrogencouncil.com/> (дата обращения: 16.06.2025).
6. Вечер А. А., Чернякова К. В. Водородная энергетика-один из способов рационального использования энергии атомных электростанций //Альтернативная энергетика и экология. — 2007. — №. 12. — С. 78-81.
7. Попадьюко Н. В., Рожнятовский Г. И., Дауди Д. И. Водородная энергетика и мировой энергопереход //Инновации и инвестиции. — 2021. — №. 4. — С. 59-64.
8. Фатеев С. А. и др. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА //Атомная энергия. — 2024. — Т. 136. — №. 1-2. — С. 3-12.