

**Куценко Никита Антонович**

студент, кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский  
государственный университет аэрокосмического приборостроения, РФ, г.

Санкт-Петербург

**Безгодов Алексей Арнольдович**

канд. воен. наук, Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, РФ, г. Санкт-Петербург

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И**

## **ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА: ТЕХНИКОЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

**Аннотация:** Статья содержит краткий технико-экономический анализ перспектив водородной энергетики и управляемого термоядерного синтеза как ключевых технологий глобального энергоперехода. Рассмотрены текущие достижения, основные барьеры и сроки внедрения обеих технологий. Показано, что водородная энергетика может существенно способствовать декарбонизации уже в ближайшие десятилетия, тогда как термоядерный синтез представляет собой долгосрочное решение, обеспечивающее неисчерпаемые энергетические ресурсы в отдалённом будущем.

**Abstract:** The article provides a concise techno-economic analysis of the prospects for hydrogen energy and controlled nuclear fusion as key technologies for the global energy transition. It examines current achievements, main challenges, and projected timelines for the implementation of both technologies. The analysis demonstrates that hydrogen energy can significantly contribute to decarbonization in the coming decades, whereas nuclear fusion represents a long-term solution offering nearly inexhaustible energy resources in the distant future.

**Ключевые слова:** водородная энергетика, термоядерный синтез, энергопереход, декарбонизация, зеленый водород, топливные элементы, ITER, термоядерный реактор, энергетическая безопасность, возобновляемые источники энергии.

**Keywords:** hydrogen energy, nuclear fusion, energy transition, decarbonization, green hydrogen, fuel cells, ITER, fusion reactor, energy security, renewable energy sources.

Глобальный энергетический переход диктует необходимость развития новых низкоуглеродных источников энергии. Водородная энергетика и управляемый термоядерный синтез рассматриваются как перспективные направления, способные в будущем обеспечить массовое энергоснабжение с минимальными выбросами парниковых газов. Эти технологии различаются по степени зрелости: водород уже используется в промышленности и энергетике, тогда как термоядерный синтез остается на экспериментальной стадии. Настоящая работа представляет сжатый технико-экономический анализ перспектив водородной энергетике и термоядерного синтеза, включая текущие достижения, потенциальные выгоды и основные проблемы каждой технологии.

Водородная энергетика: достижения, перспективы и проблемы Текущие достижения. Водород давно применяется в промышленности (например, в производстве аммиака и нефтепереработке), а в последние годы активно исследуется его использование в энергетике. Созданы топливные элементы на водороде для транспорта и стационарных энергетических установок, испытаны водородные автомобили, автобусы и поезда. В некоторых странах развивается инфраструктура: построены сотни водородных заправочных станций, реализуются пилотные проекты по смеси водорода с природным газом в газовых сетях. Технологически водород может сгорать в турбинах или вырабатывать электричество в топливных элементах с КПД ~50–60%. Современные электролизеры способны эффективно производить «зеленый» водород из воды, достигая КПД около 70%. Тем не менее, подавляющая часть (~95%) мирового производства водорода (около 70 млн тонн в год) пока что осуществляется из ископаемого сырья (природного газа, угля), сопровождаясь значительными выбросами CO<sub>2</sub>.

Перспективы и экономический потенциал. Водородная энергетика обладает большим потенциалом для декарбонизации транспортного и промышленного

секторов, а также для аккумуляции энергии. Зеленый водород, полученный электролизом воды с помощью возобновляемой энергии, рассматривается как экологически чистое топливо будущего. По прогнозам Международного энергетического агентства, к 2050 году себестоимость производства водорода из воды может снизиться до ~\$2 за кг (против нынешних \$5–10 за кг для зеленого водорода), благодаря масштабированию производства электролизеров, удешевлению возобновляемой энергии и развитию технологий хранения. Множество стран (ЕС, Япония, США, Китай и др.) приняли водородные стратегии, предусматривающие массовое внедрение водородных технологий и миллиардные инвестиции в научно-исследовательские и демонстрационные проекты. Потенциально к середине века водород может обеспечивать значительную долю мирового энергопотребления, выступая энергоносителем для транспорта (особенно тяжелого – грузовики, морские суда), металлургии (замена кокса водородом в производстве стали) и долгосрочного хранения избыточной возобновляемой энергии.

Основные проблемы и ограничения. Несмотря на достижения, широкомасштабное внедрение водородной энергетики сталкивается с рядом вызовов. Во-первых, производство зеленого водорода все еще дорого и энергозатратно: на выработку 1 кг  $H_2$  требуется около 50–55 кВт·ч электроэнергии, и при последующем использовании водорода в топливном элементе значительная часть исходной энергии теряется (суммарный цикл «электричество–водород–электричество» имеет эффективность порядка 30–40%). Во-вторых, хранение и транспортировка водорода сложны: газообразный  $H_2$  обладает низкой плотностью энергии на единицу объема, поэтому его приходится сжимать до 700 бар или сжижать при  $-253$  С, что требует дополнительных затрат энергии и специальных материалов. Проблемы безопасности также актуальны, учитывая высокую воспламеняемость водорода. Еще одно препятствие – отсутствие разветвленной инфраструктуры: требуется строительство новых трубопроводов, хранилищ, заправочных станций, переоборудование промышленных процессов. Наконец, переход на водород

эффективен с экологической точки зрения лишь при условии, что сам водород произведен безуглеродным способом; это означает необходимость радикального роста мощностей возобновляемой энергетики и развития технологий улавливания и хранения углерода (для «синего» водорода из природного газа). Решение этих проблем требует технологических прорывов, инвестиций и координации политики, но при их преодолении водородная энергетика способна занять важное место в энергосистеме будущего.

Управляемый термоядерный синтез: достижения, перспективы и проблемы

Текущие достижения. Управляемый термоядерный синтез (УТС) — процесс выделения энергии путем слияния легких атомных ядер — обещает практически неограниченный и экологически чистый источник энергии. За последние десятилетия учеными достигнут значительный прогресс в понимании и технической реализации термоядерных реакций. Созданы крупные экспериментальные установки, такие как токамаки (тороидальные камеры с магнитным удержанием плазмы) и стеллараторы, способные удерживать высокотемпературную плазму (свыше 100 миллионов °C) в течение коротких промежутков времени. В 2022 году в рамках лазерного эксперимента National Ignition Facility (США) впервые в истории удалось получить положительный выход энергии: при облучении мишени лазерами было высвобождено около 3,15 МДж термоядерной энергии против ~2 МДж, затраченных лазерами (коэффициент усиления реакции  $>1$ ). В области магнитного удержания достигнуты рекордные результаты по энергии слияния: европейский реактор JET в недавних испытаниях выработал порядка 59 МДж энергии за 5-секундный импульс (хотя затраты на нагрев плазмы все еще превышают выход). Продолжается сооружение международного проекта ITER – крупнейшего в мире экспериментального термоядерного реактора, который должен продемонстрировать возможность генерации 500 МВт термоядерной мощности в импульсе продолжительностью несколько сотен секунд. Одновременно набирают силу частные инициативы: десятки стартапов (TAE Technologies, Commonwealth Fusion Systems, General Fusion и др.) привлекли в совокупности

несколько миллиардов долларов инвестиций и исследуют альтернативные концепции (например, компактные сферические токамаки, магнитно-инерционный синтез, новые топливные циклы типа водород-бор).

Перспективы и ожидаемые преимущества. Если удастся реализовать коммерческий термоядерный реактор, энергетические выгоды будут колоссальны. Термоядерное топливо практически неистощимо: изотопы водорода (дейтерий содержится в морской воде, тритий может воспроизводиться из лития внутри реактора) доступны в огромных количествах. Выделяемая при синтезе энергия в миллион раз превосходит энергоотдачу химических реакций, что означает, например, что несколько десятков килограммов топлива в термоядерной электростанции могли бы обеспечить электричеством крупный город. При этом термоядерная энергетика экологически более безопасна по сравнению с традиционной атомной энергетикой: в реакторе отсутствует цепная делящаяся масса, а продукты реакции не включают долгоживущих высокорadioактивных отходов (основной радиационный эффект — активация конструкционных материалов нейтронами). Термоядерная электростанция не выбрасывает парниковых газов и не сопряжена с риском неконтролируемой аварии по типу чернобыльской. С технической точки зрения, будущие термоядерные электростанции могут работать в базовом режиме, обеспечивая стабильную выработку, дополняя переменные возобновляемые источники. Прогнозы по срокам появления промышленного термоядерного реактора разнятся: оптимистичные оценки предполагают создание демонстрационного реактора в 2040-х годах, а коммерческих установок — к середине XXI века. Международная кооперация (например, проекты ITER и последующего DEMO) и растущие частные инвестиции повышают вероятность того, что в течение нескольких десятилетий человечество все же преодолеет барьер на пути к практической термоядерной энергетике.

Основные проблемы и технические барьеры. На сегодняшний день управляемый термоядерный синтез остается одной из самых сложных научно-технических задач. Главная проблема — достичь устойчивой реакции с

положительным энерговыходом: все существующие установки либо потребляют больше энергии, чем вырабатывают, либо работают в импульсном режиме с короткой длительностью. Для промышленной электростанции необходимо удерживать многомиллионную температуру плазмы в стабильном состоянии в течение длительного времени, что требует совершенствования систем магнитного удержания и активного управления плазменными возмущениями. Серьезный вызов представляет материаловедение: стенки реактора и другие компоненты испытывают экстремальные нагрузки от потоков нейтронов и высоких температур. Необходимо создание новых материалов, способных выдерживать нейтронное облучение и тепловые потоки без быстрого разрушения; также разрабатываются технологии самовоспроизведения трития внутри реактора для поддержания топливного цикла. Экономические аспекты тоже вызывают вопросы: прототипы термоядерных реакторов крайне дороги (бюджет ITER превышает \$20 млрд), и даже при технологическом прорыве первые коммерческие установки будут требовать огромных капитальных вложений. Неясно, сможет ли стоимость термоядерной энергии конкурировать с дешевеющими возобновляемыми источниками и накопителями энергии, особенно с учётом десятилетий, необходимых для доведения синтеза до коммерческой реализации. Имеются и организационные риски: длительные сроки проектов требуют непрерывной политической и финансовой поддержки, иначе есть опасность задержек и технологического отставания. Таким образом, хотя фундаментальных физических препятствий для получения энергии слияния не выявлено, остаются значительные инженерные и экономические барьеры, которые предстоит преодолеть на пути к рабочей термоядерной электростанции.

Технико-экономический анализ показывает, что водородная энергетика и управляемый термоядерный синтез способны радикально изменить энергетический ландшафт, но по-разному и в разные сроки. Водородная энергетика уже в ближайшие десятилетия может занять нишу в мировой энергосистеме, особенно в тех отраслях, где трудно напрямую использовать электроэнергию (тяжелый транспорт, промышленность). При условии снижения

стоимости зеленого водорода и развития инфраструктуры, водород позволит сократить выбросы в традиционно углеродоемких секторах и послужит связующим звеном в интеграции возобновляемых источников. В то же время, необходимо решать вопросы эффективности и стандартизации, чтобы водородные технологии стали коммерчески жизнеспособными без субсидий. Термоядерный синтез, напротив, является долгосрочной ставкой: его главные преимущества (колоссальный ресурс топлива и экологическая чистота) раскроются лишь во второй половине XXI века, если мировое сообщество сумеет довести разработки от экспериментальных реакторов до промышленных. В краткосрочной перспективе термоядерная энергетика не сможет внести вклад в энергобаланс, но продолжение инвестиций и исследований оправдано потенциальным прорывом, который обеспечит практически неисчерпаемый источник энергии для будущих поколений. Таким образом, одновременно развивая водородные решения для достижения целей декарбонизации к 2030–2040 гг. и поддерживая программы по термоядерному синтезу на горизонте 2050 г. и далее, человечество формирует комплексную стратегию энергетической безопасности и устойчивости на XXI век.

### **Список литературы**

1. Global Hydrogen Review 2024 [Электронный ресурс]// Статья в интернете URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024#overview/> (дата обращения 20.05.25)
2. Перспективы и недостатки водородной энергетики [Электронный ресурс]// Статья в интернете URL: <https://t-j.ru/news/review-vodorod/> (дата обращения 20.05.25)
3. Эра термоядерного синтеза [Электронный ресурс]// Статья в интернете URL: [https://atomicexpert.com/era\\_of\\_thermonuclear\\_fusion](https://atomicexpert.com/era_of_thermonuclear_fusion) (дата обращения 20.05.25)
4. Под искусственным солнцем [Электронный ресурс]// Статья в интернете URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6715603> (дата обращения 20.05.25)