

Перспективы водородной энергетики

Институт статистических исследований и экономики знаний (ИСИЭЗ) НИУ ВШЭ с помощью системы анализа больших данных iFORA определил десятку наиболее перспективных направлений развития и применения водородных технологий в мире в текущем десятилетии.

Справочно: Система интеллектуального анализа больших данных iFORA разработана ИСИЭЗ НИУ ВШЭ с применением передовых технологий искусственного интеллекта и включает более 750 млн документов (научные публикации, патенты, нормативная правовая база, рыночная аналитика, отраслевые медиа, материалы международных организаций, вакансии и другие виды источников). В 2020 г. iFORA отмечена в журнале *Nature* в качестве эффективного инструмента поддержки принятия решений в интересах бизнеса и органов власти. ОЭСР относит систему к успешным инициативам в области цифровизации науки.

На фоне нестабильной ситуации на мировых энергетических рынках последних лет наблюдается новый всплеск интереса к водороду. Сегодня он рассматривается как перспективный энергоноситель, способный обеспечить получение надежной, доступной, стабильной и более экологичной энергии. Во многих странах разработаны стратегии развития и запущены новые инициативы в области водородной энергетики (Китай, Индия, Республика Корея и др.). Большая часть из них направлена на поддержку исследований и разработок, результаты которых смогли бы стать основой для создания жизнеспособных решений в отраслях.

Таблица 1. Топ-10 перспективных водородных технологий

Ранг	Технологии	Индекс значимости	Этап цепочки создания стоимости
1	Топливные элементы (ячейки) на основе водорода (электрохимические генераторы)	1.00	
2	Материалы для водородных компонентов	0.85	
3	Производство водорода на основе солнечной энергии	0.47	
4	Паровая конверсия метана (на основе природного газа)	0.38	
5	Крупные промышленные установки для производства водорода	0.35	
6	Подземная газификация угля	0.33	
7	Системы и методы хранения водорода (в газообразном, жидком виде, гибридные системы и др.)	0.28	
8	Автотранспорт на водородных топливных элементах	0.17	
9	Электрохимический метод получения водорода (электролиз)	0.17	
10	Технологии производства «зеленого» водорода	0.16	

Легенда:



Производство



Хранение



Потребление

Рассчитано на основе высокоцитируемых зарубежных научных публикаций, представленных на платформе Microsoft Academic Graph в 2018–2022 гг. (более 4.9 тыс. источников). **Индекс значимости** технологии показывает ее относительную встречаемость в проанализированном массиве источников, где 1 соответствует максимальному числу упоминаний. При расчете учитываются частота встречаемости термина, его специфичность и векторная центральность. Частота встречаемости сама по себе недостаточна для отражения реальной актуальности термина, важно, чтобы он обозначал конкретное научно-технологическое направление и не был слишком общим (эту задачу решает показатель специфичности), а векторная центральность отражает степень его связи с другими направлениями поиска. **Этап цепочки создания стоимости** показывает группу, к которой относится отдельная технология.

Большая часть актуальной повестки исследований связана с **производством водорода** (№ 1–6, 9–10). Именно на этом этапе цепочки создания стоимости отмечается значительное разнообразие технологий, хотя наиболее затратным считается хранение водорода в силу его высокой взрывоопасности, летучести и ряда иных свойств.

Наиболее оптимальным и технически отработанным считается производство **водородных топливных элементов (ячеек)** (№ 1), которые преобразуют химическую энергию в электричество. Они применимы в промышленности для автономной генерации и накопления энергии, на транспорте (авиа-, авто-, железнодорожном), в электроэнергетике для обеспечения энергией удаленных и труднодоступных районов. Так, в [Индии](#) значительная часть проектов национального водородного альянса нацелены на разработку топливных элементов для автобусов, автомобилей, поездов. В 2021 г. в [Южной Корее](#) запущена крупнейшая в мире электростанция на водородных топливных элементах, рассчитанная на 250 тыс. домохозяйств. [Японская компания Teijin Group](#) работает над созданием портативных водородных топливных ячеек для применения в строительстве и на морском транспорте. Изучается возможность использования водорода и в космических аппаратах.

Чтобы обеспечить необходимую функциональность генераторов энергии и иных устройств на основе водорода, применяется целый ряд **специальных материалов и соединений** (№ 2), прежде всего в катализаторах, которые необходимы для выработки электроэнергии. В них используется чаще всего платина, из-за чего стоимость таких ячеек крайне высока, поэтому активно изучаются возможности использования других материалов. В 2022 г. специалисты Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе применили вместо платины [кристаллы платинокобальтового сплава](#). В начале 2023 г. российские ученые разработали другой материал для электрокатализаторов – [углеродные микротрубки, покрытые композитами на основе никеля и меди](#), которые делают процесс получения водорода более дешевым и эффективным.

В качестве сырья для получения водорода изучается и **солнечная энергия** (№ 3), чему во многом способствует господдержка в ряде стран. Однако основным и наиболее дешевым сырьем остается традиционный природный газ, который с помощью **паровой конверсии метана** трансформируется в водород (№ 4). На него приходится [более 60% производимого водорода в мире](#). В последние годы стали популярны системы улавливания и хранения углекислого газа (CCUS), снижающие выбросы CO₂, однако пока число действующих промышленных объектов в мире по производству водорода из углеводородов с CCUS насчитывает [не более двух десятков](#).

Особой задачей остается масштабирование технологий в целях коммерческого получения водорода. Для этого необходимы **крупные промышленные установки** (№ 5). Каждый такой проект уникален и зависит от задач потребителя, природных особенностей местности и технических характеристик объекта. Так, компания LG Chem к 2025 г. планирует построить в Южной Корее [завод по производству водорода мощностью 50 тонн в год](#). В качестве сырья предполагается использовать метан, образующийся на химических предприятиях корпорации. А в китайской провинции Шаньдун формируется (пока в виде демонстрационного проекта) целая [экосистема для разработки и использования водорода](#), включая скоростную автомагистраль, морские порты, промышленные парки и жилые комплексы. Основной технологией станет электролиз, требующий значительных объемов воды для протекания химических реакций.

Еще один, менее традиционный, способ получения водорода – **подземная газификация угля** (№ 6) как альтернатива методу добычи из труднодоступных угольных пластов. Несмотря на меньшую популярность среди исследователей, способ может быть актуальным для стран с крупными месторождениями угля, поскольку решает также проблему содержания запущенных шахт. Подобные проекты рассматриваются в [Китае](#) и [Австралии](#).

Создание **экологически чистого «зеленого» водорода** (№ 10), прежде всего с помощью **электролиза воды** (№ 9) с использованием ВИЭ, остается дорогостоящей технологией с отдаленными перспективами реализации. Текущий уровень готовности пока не позволяет говорить о коммерциализации этих разработок. Они приобрели популярность в силу масштабных и системных инвестиций в исследования со стороны ряда государств, в первую очередь стран ЕС. Стоимость электролизеров постепенно снижается (за 2018–2022 гг. вдвое), появляются более мощные и масштабируемые установки, хотя их применение все еще ограничено. Есть продвижение и в создании солнечных фотоэлектрических систем благодаря новым сферам приложения. Например, в аэрокосмической промышленности фотоэлектрические элементы могут использоваться для энергообеспечения спутников, в медицине – для лечения различных заболеваний легких. Специальный модуль для получения кислорода и водорода с использованием солнечных батарей был установлен в [одной из больниц Испании](#).

Крупный блок задач связан с созданием коммерческих **систем хранения водорода** (№ 7), повышением их энергоэффективности и вместительности. Выбор наиболее подходящей установки зачастую зависит от объема водорода, продолжительности хранения, требуемой скорости выгрузки, географии поставок и др. В настоящее время водород чаще всего хранится в резервуарах в газообразном или жидком состоянии. Один из наиболее удобных и наименее

затратных вариантов для длительного использования в промышленных масштабах – подземное хранение водорода. Метод показывает высокую эффективность и низкий риск смешивания водорода с другими соединениями. В химической промышленности он известен еще с 1970-х гг., когда под такие цели начали использовать подземные соляные шахты. Подобные проекты не теряют своей актуальности и сегодня: крупнейшее в мире подземное хранилище водорода мощностью 300 ГВт-ч [планируется построить в США](#).

В числе наиболее востребованных приложений водорода – **автомобильный электротранспорт** (№ 8). Лидерами в создании новой индустрии водородомобилей являются Япония и Республика Корея: на них приходится большая часть мировых производственных мощностей в этой сфере. Автоконцерны Toyota и Hyundai лидируют в серийном производстве пассажирских электромобилей на топливных водородных ячейках. В 2020–2021 гг. продажи таких автомобилей благодаря значительной государственной поддержке в мире [выросли на 65%](#) (в основном за счет автобусов и грузовиков). Изучается возможность применения топливных элементов и в авиации (концерн [Airbus](#)).

Мировой рынок водорода как энергоносителя находится на этапе зарождения. По оценкам экспертов, он сформируется не ранее 2030 г. вследствие целого ряда факторов – от неготовности технологий для коммерческого внедрения до отсутствия нормативно-правовой базы, регулирующей их практическое использование. На фоне высокой неопределенности развития рынка инвесторы пока консервативны в своих ожиданиях: водородные проекты хотя и финансируются, но не столь активно. В 2022 г. в мире было заявлено 680 крупномасштабных водородных проектов стоимостью [240 млрд долл., но только на каждое десятое предложение были выделены инвестиции](#). Глобальный рынок водородной энергетики во многом будет зависеть от создания жизнеспособных решений и их экономической целесообразности для широкого применения. Пока этому препятствуют высокие издержки производства и хранения водорода, потери энергии на каждом этапе цепочки создания стоимости, сложности транспортировки, отсутствие стандартов использования водорода и т. п.

Перспективы для России

Принятая в 2021 г. [Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации](#) предусматривает создание сегмента водородной энергетики как части энергетической отрасли с высоким экспортным потенциалом. Для этого наша страна обладает уникальным сочетанием факторов, включая значительные запасы природного газа, собственные научно-технологические заделы, выгодное географическое положение.

Наряду с этим водород может быть востребован и при реализации российских высокотехнологичных проектов. Водородные топливные ячейки или двигатели на водороде подходят для [БПЛА](#), могут быть востребованы для морского и речного судоходства (в мире такую возможность изучает, в частности, корейская [Samsung Heavy Industries](#)). С учетом значительных сухопутных и водных просторов такие сценарии применения становятся все более актуальными для нашей страны. Их коммерческая и техническая реализация зависит от корректной оценки потребностей и затрат по всей цепочке создания стоимости, а также формирования условий для промышленного тиражирования. Ведущие компании (прежде всего ПАО «Газпром» и ГК «Росатом») уже реализуют ряд проектов, среди которых запуск пилотного производства низкоуглеродного водорода на Сахалине (2025 г.), создание транспорта на водородном топливе. Водородные технологии в перспективе способны внести свой вклад в технологическое развитие России при условии широкой кооперации науки, разработчиков и потенциальных пользователей в отраслях.



Источники: Расчеты на основе системы интеллектуального анализа больших данных iFORA (правообладатель – ИСИЭЗ НИУ ВШЭ); результаты проекта «Экспертно-аналитическое сопровождение деятельности по развитию высокотехнологичных направлений в 2023 г., включая подготовку ежегодного доклада («белой книги») о развитии отдельных высокотехнологичных направлений», тематического плана научно-исследовательских работ, предусмотренных Государственным заданием НИУ ВШЭ.

■ Материал подготовили Ю. В. Туровец, Н. П. Марчук

Данный материал НИУ ВШЭ может быть воспроизведен (скопирован) или распространен в полном объеме только при получении предварительного согласия со стороны НИУ ВШЭ (обращаться issek@hse.ru). Допускается использование частей (фрагментов) материала при указании источника и активной ссылки на интернет-сайт ИСИЭЗ НИУ ВШЭ (issek.hse.ru), а также на авторов материала. Использование материала за пределами допустимых способов и/или указанных условий приведет к нарушению авторских прав.