

# Водородные и алюмоводородные накопители в электроэнергетике

## Hydrogen and aluminum-hydrogen storage in the power industry

Андрей ЖУК  
Профессор, д. ф.-м. н.,  
заместитель директора по науке ОИВТ РАН  
e-mail: 666zhuk@ihed.ras.ru

Andrey ZHUK  
Deputy director of the JIT RAS,  
D. Tech. Sc, Professor  
e-mail: 666zhuk@ihed.ras.ru

Николай НОВИКОВ  
Профессор МЭИ, д. т. н., заместитель  
Научного руководителя НТЦ ФСК ЕЭС,  
ведущий научный сотрудник ОИВТ РАН  
e-mail: novikov\_nl@ntc-power.ru

Nikolay NOVIKOV  
Leading Researcher of the JIT RAS,  
D. Tech. Sc., Professor  
e-mail: novikov\_nl@ntc-power.ru

Александр НОВИКОВ  
Главный специалист НТЦ ФСК ЕЭС,  
старший научный сотрудник «НТЦ  
«Энергобезопасность»  
e-mail: novikov@energo365.ru

Alexander NOVIKOV  
Research Associate of the JIT RAS  
e-mail: novikov@energo365.ru

Виктор ФРОЛОВ  
Ведущий инженер-проектировщик  
НТЦ ФСК ЕЭС  
e-mail: Frolov\_VD@ntc-power.ru

Viktor FROLOV  
Leading Design Engineer of STC FGC UES  
e-mail: Frolov\_VD@ntc-power.ru

Аннотация. Развитие электроэнергетики в настоящее время происходит под влиянием нескольких технологических трендов: водородная энергетика, системы накопления энергии (СНЭ), «цифровизация» инфраструктур и переход к интеллектуальному управлению и инжинирингу. Главное значение накопителей энергии – не просто решить задачу энергообеспечения при перерывах внешнего питания, а сформировать новую энергетическую инфраструктуру, свободную от ограничений непрерывности одного вида электрических процессов. По сути, их главная задача значительно расширить вид и форму энергетических объединений, позволяющих интегрировать автономные, распределенные и централизованные системы, включая новые центры генерации и потребления в общую энергетическую «систему систем».

*Ключевые слова: водородные и алюмоводородные накопители электрической энергии, многоуровневый преобразователь, суперконденсатор, активный фильтр, электроэнергетика, распределённая генерация.*

Abstract. The development of the electric power industry is currently under the influence of several technological trends: hydrogen energy, energy storage systems (ESS), «digitalization» of infrastructures and the transition to intelligent management and engineering. The main importance of energy storage devices is not just to solve the problem of energy supply, but to form a new energy infrastructure, free from restrictions on the continuity of one type of electrical processes. In essence, this means significantly expanding the type and form of energy associations that allow the integration of autonomous, distributed and centralized systems, including new centers of generation and consumption into a common energy «system of systems».

*Keywords: hydrogen and aluminum-hydrogen storage of electric energy, multilevel converter, supercapacitor, active filter, distributed power generation.*



## **Водород нужно произвести и преобразовать для получения конечного потребительского вида. И то, и другое требует необходимых затрат**

### **Введение**

«Убежден: развитие водородной энергетики – это стратегическое будущее всего мира», – писал еще в 2009 году академик РАН Владимир Накоряков. Термин «водородная энергетика» в последние десять лет приобрел огромную популярность в мире науки, экономики и политики. Он означает отрасль, основанную на использовании

водорода в качестве средства для аккумуляции, транспортировки, производства и потребления энергии.

Водород, хотя и является самым распространенным элементом на планете, но в чистом виде практически не встречается в природе. Его нужно произвести и преобразовать для получения конечного потребительского вида. И то, и другое требует необходимых затрат. Свыше 90 % конечной энергии получается из ископаемого углеводородного топлива, причем углерод при этом по-прежнему переводится в CO<sub>2</sub>, так что, при получении и последующем использовании конечного чистого продукта, общая проблема сокращения выбросов не решается. Она лишь перемещается территориально. В местах производства чистого водорода, выбросы несколько увеличиваются по сравнению с использованием традиционного жидкого и газообразного топлива, а у потребителя – чистый продукт дает меньше выбросов.

Иногда в популярной литературе водородная энергетика противопоставляется «углеводородной». Водородная энергетика лишь дополняет нефтяную, атомную или «возобновляемую» энерге-



Производство водорода с помощью ВИЭ

Источник: aa-w / Depositphotos.com

тику, но сама по себе не является новым источником энергии. Другими словами, это способ наиболее эффективного применения имеющихся источников энергии, повышения КПД их использования или получения иных преимуществ. Водород является вторичным энергоносителем, но он заслуживает особого внимания как наиболее емкий и экологически чистый энергоноситель из всех существующих химических веществ, ведь единственный продукт реакции – это вода. Теплота сжигания водорода составляет 142 мегаджоуля на килограмм, а природного газа – от 28 до 46 мегаджоулей. Поскольку водород может широко применяться

не только в энергетике, но и в химической промышленности, то более правильно употреблять понятие «водородная экономика», которое включает в себя:

- производство водорода из воды с использованием невозобновляемых источников энергии (углеводороды, атомная энергия, термоядерная энергия);
- производство водорода с использованием возобновляемых источников энергии (солнце, ветер, гидроэнергия, энергия морских приливов, биомасса и т. д.);
- производство водорода из природного газа.

Водород не источник энергии, а его получение – это средство преобразования других энергетических ресурсов в химическую энергию в форме запасенного чистого водорода, которую можно использовать впоследствии при окислении  $H_2$ . По сути, резервуар или другой накопитель водорода – это техническое устройство преобразования природного газа с КПД использования 72 %. Это означает, что 28 % энергии, содержащейся в природном газе – метане, теряется, не считая энергии, которая расходуется на добычу и транспортировку природного газа до завода, производящего водород. Только 4 % водорода получают

---

**Накопитель водорода – это техническое устройство преобразования природного газа с КПД использования 72 %. Это означает, что 28 % энергии, содержащейся в природном газе, метане, теряется**

---

из воды посредством электролиза. Себестоимость производства водорода из воды (различные виды электролиза) в 3–6 раз выше, чем получение водорода из природного газа.

Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells, Министерство энергетики, торговли и промышленности Японии (METI) [1,2] координирует долгосрочную стратегию, направленную на ускоренное внедрение водородных топливных элементов и установок для производства энергии на водороде. METI ожидает, что годовое потребление водорода в Японии вырастет с 4 тысяч тонн в 2020 году до 300 тысяч тонн к 2030 году и 5–10 млн тонн – к 2050 году. Цены на водород, METI ожидает 3 долларов за 1 кг водорода к 2030 году (эквивалент 0,8 долл./л бензина), а к 2050 году цена снизится до 2 долларов за 1 кг водорода (0,5 долл./л бензина). Цены для импортируемого водорода в Японии на текущий момент составляют около 10 долларов за 1 кг водорода (2,6 долл./л бензина). Это значит, если до 2030 года нефтяные цены не упадут до 30–40 долларов за баррель, водородное топливо будет вполне конкурентоспособно.

В зависимости от первичного вида энергии, используемой при получении  $H_2$ , различают различные «цветовые» виды водорода: «зеленый» (энергия

---

**Годовое потребление водорода в Японии вырастет с 4 тыс. т в 2020 г. до 300 тыс. т к 2030 г. Цены на импортируемый водород сейчас составляют около 10 долл./кг. К 2030 г. они снизятся до 3 долл./кг**

---

ВИЭ для электролиза воды), «желтый» (атомная энергия для электролиза воды), «серый» (получение из метана с помощью парового риформинга), «голубой» (получение из метана с помощью парового риформинга с использованием систем хранения  $CO_2$ )

По прогнозам Международного энергетического агентства, даже к 2070 году на долю энергетики будет приходиться всего около четырнадцати процентов общего потребления водорода в мире. В водороде привлекает высокая энергоемкость – в три-четыре раза больше, чем у природного газа. Применение водорода в качестве топлива пока еще не получило

Инфраструктура Олимпийского стадиона в Токио ориентирована на использование водорода

Источник:  
kuremo / Depositphotos.com



широкого распространения, однако многие страны и компании делают на него большую ставку, поскольку данный энергетический ресурс в сочетании с ВИЭ позволяет производить энергию с нулевыми выбросами. Значительное распространение этого энергоносителя ожидается именно в транспортном секторе. При выполнении требований Парижского соглашения по климату, структура мировой энергетики в ближайшие десятилетия должна претерпеть радикальные изменения в результате эффективного использования всех видов топлива.

Нужно уходить от выброса  $\text{CO}_2$ , поэтому звучат призывы вообще отказаться

технологий в России, стране с огромными территориями, гигантскими запасами природного газа (из которого можно производить дополнительный «голубой» энергетический водород) и большим потенциалом по ВИЭ. В пользу развития водородных технологий в России говорят и ценовые факторы. У нас низкая стоимость газа, а на его долю приходится от 45 до 70 % затрат на производство водорода. Кроме того, у нас дешевая электроэнергия. Так что в России водородные технологии будут экономически эффективнее, чем, например, в Европе.

Водород – это перспективная ниша. Уже многие страны приняли водородные стратегии и дорожные карты. В Европе осуществляют достаточно серьезные финансовые вливания в это направление.

По оценкам Hydrogen council и Hydrogen Analysis Resource Center мировой рынок водорода может составить порядка 2,5 трлн долларов к 2050 году. В натуральном выражении в мировом энергобалансе доля водорода может достигнуть порядка 18 % от конечного спроса на энергию, что позволит сократить выбросы  $\text{CO}_2$  на 6 гигатонн в год. При этом в транспортном секторе к 2050 году доля водородных автомобилей составит от 15 до 20 % (количество легковых автомобилей на водородном топливе составит около 400 млн, грузовых – 15–20 млн и около 5 млн автобусов). Для достижения этих показателей потребуется 20–25 млрд долларов инвестиций ежегодно до 2030 года. Для сравнения: инвестиции в нефтегазовую отрасль даже в период кризиса составили около 60 млрд долларов.

Особенности физических и химических свойств водорода потребуют разработки стандартов для оборудования, производства, транспортировки, хранения и применения. Метрология и технологические основы физико-химической безопасности станут очень важными элементами будущей измерительной инфраструктуры и систем контроля качества и безопасности. Для обеспечения вышеперечисленного потребуются разработка научно обоснованных и законодательно закрепленных методов измерений, а также признанных во всем мире норм, правил и стандартов. Все эти меры необходимы для обеспечения безопасности, так как негативные примеры и несчастные случаи послужат серьезным препятствием для развития водородных технологий, нане-



Мария Токио уже разработала программу использования водорода в мегаполисе  
Источник: kanzilyou / depositphotos.com

от угля. Некоторые эксперты, в частности, член-корреспондент РАН Владимир Клименко, утверждают: при любых сценариях развития энергетики, даже если мы вообще перестанем сжигать органическое топливо, глобальное потепление не остановится. Поэтому не нужно совершать никаких масштабных резких изменений в структуре энергетики. Это просто катастрофа для всей экономики. Ближайшая перспектива энергетики – это органическое топливо и связанные с ним парогазовые технологии, глубокая переработка угля, ядерная энергетика. Более дальняя – возобновляемые источники энергии. Но существенно повысить эффективность всех видов топлива возможно с помощью водородных



Водородная АЗС

Источник: neftegaz.press

сут политический урон еще зарождающейся водородной промышленности.

Установление международных деловых связей с зарубежными компаниями в сфере водородной экономики способствует ускоренному развитию национального водородного рынка и укрепит позиции российских компаний в этом направлении. Создание компонентов производства, применения и транспортировки водорода станет серьезным стимулом для развития полной производственной цепочки.

### Анализ государственных программ развития водородных технологий

В мире создано уже 23 международных консорциума водородной тематики. В Германии, Нидерландах, Японии появились Водородные долины.

Россия, согласно принятой Энергетической стратегии до 2035 г., планирует к 2024 году экспортировать 200 тысяч тонн водорода, а к 2035 г. – в десять раз больше. В целом потребление и добыча нефти и газа не изменятся принципиально еще много лет, поэтому ресурсов (в том числе для получения водорода) вполне достаточно.

Минэнерго разработало дорожную карту развития водородной энергетики в России до 2024 года. Она предусматривает, что первыми производителями водорода в стране станут «Газпром» и «Росатом» – в 2024 году они должны пустить пилотные водородные установки, в том числе на атомных электростанциях.

Около 20 стран, включая Японию, Южную Корею, Германию, Китай и США (в первую очередь – штат Калифорния), активно развивают сейчас рынок энергетического водорода, выстраивая партнерские связи между государственным и частным секторами. Уже работает целый ряд таких партнерств: H2Mobility Germany, H2Korea,

---

**В пользу развития водородных технологий в РФ говорят ценовые факторы. У нас дешевая электроэнергия и низкая стоимость газа, а на его долю приходится 45–70% затрат на производство H<sub>2</sub>**

---

the California Fuel Cell Partnership, and the Scandinavia Hydrogen Highway Partnership.

Китай планирует установить до 1000 водородных заправочных станций (ВЗС) к 2030 году, обслуживающих более 1 млн водородных автомобилей (FCEV). К 2025 году он также рассчитывает превратить город Ухань (Wuhan) в ведущий водородный хаб страны. К 2025 году в городе будут сосредоточены крупнейшие предприятия в сфере производства топливных элементов и более 100 предприятий, связанных с водородной энергетикой. Количество ВЗС составит 30–100 единиц. Объем инвестиций оценивается примерно в 1,7 млрд долларов.

В Корею, по данным Hydrogen Analysis Resource Center, в 2018 году действовало всего 12 ВЗС. Однако благодаря небольшой территории страны и правильному расположению этих заправок, водители могут пересечь всю страну на водородном автомобиле. Корейское Министерство промышленности, торговли и энергетики объявило о планах на 2,3 млрд долларов, чтобы обеспечить 16 000 транспортных средств на водороде и построить 310 заправочных станций по всей стране к 2022 году. В соответствии с пятилетним планом ожидается, что предприятия получат государственную поддержку в разработке стеков топливных элементов и контейнеров для хранения топливных элементов, а также налоговых льгот для водителей водородомобилей.

Япония является одним из лидеров в области инвестиций в господдержку, регулирование и инфраструктуру для обеспечения перехода на водородную энергетику. Главная задача состоит в том, чтобы улучшить качество воздуха, значительно сократить выбросы от транспортного и промышленного секторов, уменьшить

---

**К 2050 г. доля водородных автомобилей достигнет 15-20% (легковые автомобили на H<sub>2</sub> составят 400 млн, грузовые –15-20 млн, автобусы –5 млн). Это потребует 20–25 млрд долл. инвестиций в год**

---



Toyota Mirai на водородных топливных элементах  
Источник: [allinallnews.com](http://allinallnews.com)

зависимость от импортируемых ископаемых видов топлива. Именно эта страна выпустила первый серийный автомобиль – Toyota Mirai. В середине 2018 года, по данным Hydrogen Analysis Resource Center, в Японии насчитывалось 94 ВЗС тогда как в Германии, которая находится на втором месте по количеству ВЗС – 44.

Как указано в Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells, Министерство энергетики, торговли и промышленности Японии (METI) координирует долгосрочную стратегию, направленную на ускоренное внедрение водородомобилей, автобусов на водородных топливных элементах и установок для производства энергии на водороде. METI ожидает, что годовое потребление водорода в Японии вырастет с 4000 тонн в 2020 году до 300 000 тонн к 2030 году и 5–10 млн тонн к 2050 году. Согласно Strategic Roadmap for Hydrogen and Fuel Cells, количество автомобилей на водороде должно достигнуть: к 2020 году 40 000 штук, к 2025 году – 180 000 и около 800 000 к 2030 году. Одновременно предполагается и развитие заправочных станций до 160 штук к 2020 году и около 320 штук к 2025 году с нынешних 90 штук. Ожидается, что по меньшей мере 1200 автобусов на топливных элементах будут эксплуатироваться на дорогах к 2030 году.

Япония активно внедряет водородные технологии, так еще в 2014 году была принята дорожная карта по построению

«общества, базирующегося на водороде». Япония рассматривает возможность перехода к водороду за счет импортных поставок из Брунея, Африки и Австралии. С этой целью японские компании, такие как Chiyoda Corporation, Kawasaki Heavy Industries, Iwatani, J-POWER и Marubeni, инвестируют в проекты по производству водорода в Австралии и Брунее.

Австралия – потенциальный крупный производитель водорода. В Австралии японские компании сотрудничают с AGL Energy и Shell, чтобы создать цепочку поставок сжиженного водорода в Японию (проект HESC) стоимостью 375 млн долларов. Согласно проекту, водород будет производиться из синтетического газа, который будет получен при помощи газификации бурого угля, для обеспечения экологических стандартов будут применяться технологии улавливания и хранения углерода (CCS). Наличие обширных пустых участков земли для строительства объектов возобновляемой энергетики, удачное географическое расположение, позволяющее генерировать большой объем солнечной и ветровой энергии и высоких инвестиций в пиковое производство возобновляемой энергии дают Австралии значительный потенциал для производства водорода. Отдельно стоит отметить интерес инвесторов к Австралии как к потенциальному поставщику водорода. На текущий момент, если инвестиции оправдают себя, Австралия может стать

Топливный элемент  
Источник: flipboard.com



## Китай планирует установить 1 тыс. водородных заправок к 2030 г., обслуживающих 1 млн автомобилей. Главным водородным хабом станет Ухань, в котором будет более 100 водородных предприятий

крупнейшим экспортером не только СПГ, но и водорода.

В Южной Австралии французская компания Neoen, работающая в сфере возобновляемой энергетики, недавно объявила о планах по созданию водородного суперцентра в Crystal Brook для экспорта возобновляемого водорода в Азию. Водородный электролизер мощностью 50 МВт будет питаться от ветровой и солнечной установок общей мощностью 300 МВт, так же будет построен накопитель в 400 МВт/ч. Планируется, что производство водорода может достигнуть 20–25 тонн в сутки. Neoen уже сотрудничает с Siemens и Hyundai, чтобы построить электролизер малой мощности в 1,25 МВт.

Водород в Европе и в США. Крупнейшим мировым рынком водорода собирается стать Евросоюз, который к 2050 году намерен инвестировать от 180 до 470 миллиардов евро в сегмент возобновляемого водорода. В европейских городах сейчас эксплуатируется 91 водородный автобус, тогда как 5 лет назад их было только 30. Стоит отметить, что опыт эксплуатации весьма успешен. Так, по данным партнерства FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), которая обеспечивает поддержку 67 водородным автобусам в Европе, интерес со стороны транспортных компаний есть и уже в ближайшие годы их парк должен вырасти до 500 единиц.

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking финансирует пилотные проекты (например, Don Quichote и HyBalance) по производству водорода как путем электролиза воды на базе ветровой и солнечных электростанций, так и опробует новые технологии термолиза воды в рамках проекта Hydrosol, и новые технологии фотоэлектролиза (проекты ARTIPHYSTION и PECDEMO). Объем



инвестиций со стороны FCH JU только в перечисленные проекты достиг около 30 млн евро.

В целом сейчас, по данным Hydrogen Europe, на территории Европы осуществляется более 200 проектов в области водородной энергетики.

В США локомотивом продвижения водородомобилей является штат Калифорния. Благодаря инициативам штата, к 2020 году количество ВЗС достигнет 62 единиц. На сегодняшний день количество FCEV практически достигло 5000 штук – самый большой водородный автопарк в мире, а количество действующих ВЗС составило 36 единиц. При этом правительство штата ставит перед собой крайне амбициозную цель: к 2030 году количество автомобилей должно достигнуть 1 млн, а ВЗС – 1000 единиц.

На сегодняшний день лидером по количеству водородных автомобилей являются США, а по объему заправочной инфраструктуры – Япония. Крупные инвестиции делаются в Европе, главным образом в Германии и Скандинавии, и в Китае.

Федеральное правительство Германии создает условия для производства, транспортировки, применения и дальнейшего использования водорода. Национальная водородная стратегия способствует инновационному развитию и активизации инве-

---

**В Австралии компания Neoen объявила о планах по созданию водородного суперцентра в Crystal Brook для его экспорта в Азию. Объем производства может достигнуть 20–25 тонн в сутки**

---

стиционной деятельности в соответствующих сферах. Она определяет меры, необходимые для достижения национальных целей по борьбе с изменением климата, для создания новых производственных цепочек в германской экономике и для дальнейшего расширения кооперации в сфере энергетической политики.

В планах – стимулировать расширение рынка водородных технологий (особенно в сфере разработки и использования электролизеров) в соответствии с политикой энергетического поворота. Правительство Германии считает, что спрос на водород к 2030 году вырастет до 90–110 ТВт·ч.

Заправка водородным топливом

Источник: [japantimes.co.jp](http://japantimes.co.jp)



Для того, чтобы частично удовлетворить спрос на водород, в Германии необходимо создать производственные мощности производительностью до 5 ГВт·ч. Это обеспечит возможность производства водорода в объеме до 14 ТВт·ч, что потребует 20 ТВт·ч «зеленой» электроэнергии. Правительство планирует детально анализировать динамику и структуру спроса на «зеленый» водород для мониторинга национальной водородной стратегии.

Водород несет огромное значение для химической и сталелитейной промышленности Германии. В скором времени, промышленный сектор планирует исполь-

зовать широко развитую систему транспортировки энергетических газов: сетью газопроводов и хранилищ газа.

## Водородные накопители энергии

**Основные типы накопителей.** Существует много различных классификаций накопителей электрической энергии. Наиболее удобной с практической точки зрения представляется классификация на электромагнитные и электрохимические, физические (механические), водородные и алюмо-водородные накопители энергии.



Водородный газогольдер

Источник: storengy.com

зовать 55 ТВт·ч водорода, при этом сейчас подавляющая его часть производится из ископаемых энергоносителей. Последние оценки экспертов показывают, что к 2050 году потребность сталелитейной промышленности для обеспечения углеродной нейтральности потребует 80 ТВт·ч водорода. Процесс производства аммиака и нефтехимической продукции потребует дополнительных 22 ТВт·ч водорода.

Расширение рынка сбыта водорода и его побочных продуктов предполагает развитие транспортной инфраструктуры.

Первые – запасают электроэнергию в сверхпроводящих катушках либо преобразуют ее в химическую энергию веществ, вторые – в механическую энергию.

К электрохимическим накопителям энергии относятся аккумуляторные батареи, накопители энергии на основе молекулярных конденсаторов и др. Все типы электрохимических накопителей подключаются к сети через преобразователи (инверторы).

К физическим накопителям электроэнергии в основном относятся два вида комплексов: кинетические накопители энергии



Шаровые резервуары для хранения газов

Источник: energosmi.ru

(маховики), гравитационные накопители энергии (ГАЭС). В [5, 6, 7, 8] приведен обзор СНЭ и анализ их характеристик.

Водородные накопители энергии состоят из системы производства водорода, топливных элементов и системы связи и управления с электроэнергетической системой.

**Топливные элементы.** Топливный элемент (ТЭ) – электрохимическое устройство, подобное гальваническому элементу, но отличающееся от него тем, что вещества для электрохимической реакции подаются в него извне – в отличие от ограниченного количества энергии, запасенного в гальваническом элементе или аккумуляторе. Топливные элементы не имеют такого ограничения на коэффициент полезного действия (КПД), как у тепловых машин. В связи с этим они могут иметь очень высокий коэффициент преобразования химической энергии в электрическую.

Конструкция любого топливного элемента состоит из двух электродов (катода и анода) и находящегося между ними слоя электролита – среды, обеспечивающей перемещение ионов от одного электрода к другому и блокирующей движение электронов. Для того чтобы реакция проте-

кала с более высокой скоростью, в электродах часто используют катализаторы. Работа топливных элементов поддерживается путем подачи двух применяемых для поддержания реакции компонентов – топлива и окислителя. В зависимости от типа топливного элемента, в качестве топлива могут использоваться газообразный водород, природный газ (метан), а также жидкое углеводородное топливо (например, метиловый спирт). В роли окислителя обычно выступает содержащийся в воздухе кислород, а некоторые типы топливных элементов могут работать только с чистым кислородом.

---

**Сейчас лидером по количеству водородных автомобилей являются США, а по объему заправочной инфраструктуры – Япония. Крупные инвестиции делаются в Германии и Скандинавии, а также в Китае**

---

---

**Алюминий по своему энергетическому потенциалу очень близок к водороду, при этом он лишён недостатков водорода, таких как чрезвычайно малая плотность газа и взрывоопасность**

---

Технологические достижения в области производства топливных элементов привели к тому, что водород может использоваться в батареях топливных элементов для крупной и малой энергетики, отопления и, конечно, транспорта. За последние 15 лет стоимость водородного топливного элемента снизилась с 275 долларов до 55 долларов/кВт – более чем в 5 раз. В планах Департамента энергетики США снизить стоимость топливного элемента до 30 долларов/кВт к 2022 году. В топливных элементах нет превращения химической энергии топлива в тепловую и механическую, как в традиционной энергетике (рис. 3). В связи с этим, КПД топливных

элементов значительно выше, чем у традиционных энергоустановок, и может достигать 90 %. Имеется возможность практически мгновенного возобновления их энергоресурса – для этого достаточно установить новую емкость (картридж) с используемым топливом. Применение не расходуемых в процессе реакции электродов позволяет создавать топливные элементы с очень большим сроком службы. Отмечается высокая экологическая чистота химических топливных элементов. Расходным материалом для топливных элементов служат лишь традиционные виды топлива, а основным продуктом реакции является обычная вода. Замена используемых в настоящее время батареек и аккумуляторов на топливные элементы позволит значительно сократить объем подлежащих переработке отходов, содержащих ядовитые и вредные для окружающей среды вещества.

### **Алюмоводородные накопители энергии**

Алюминий по своему энергетическому потенциалу очень близок к водороду, считающемуся сегодня перспективным топливом [9]. При этом алюминий лишён недостатков, свойственных водороду (чрез-

SLS ракета на водородном топливе

Источник: [nasa.gov](http://nasa.gov)



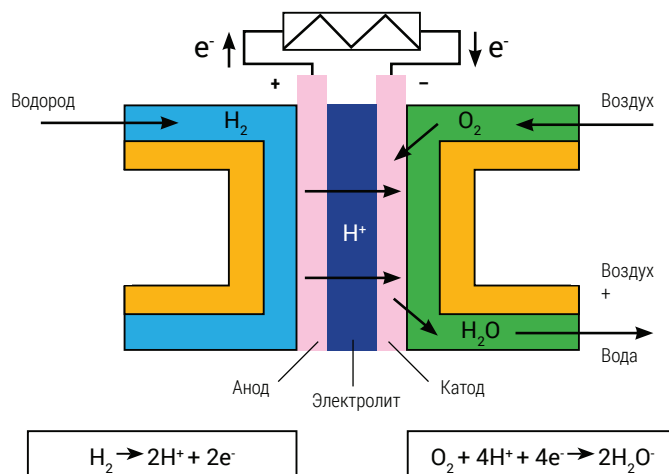


Рис. 1. Принцип действия топливного элемента (превращения химической энергии водорода в электроэнергию) [4]

вычайно малая плотность газа и взрывоопасность). Когда речь идёт о хранении и транспортировке водорода, возникает масса вопросов, связанных с безопасностью. Также до сих пор не существует простого и недорогого способа производства водорода в массовых количествах из возобновляемых ресурсов.

Алюминий же по распространённости в природе стоит на первом месте среди металлов и на третьем, после кислорода и кремния, среди химических элементов. В обычных условиях алюминий химически инертен. Причём продукты его окисления можно вторично использовать для восстановления металла, поэтому нет необходимости значительно расширять добычу алюминосодержащих ископаемых.

В Объединённом институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН, Москва) разработали серию воздушно-алюминиевых топливных элементов. Таким образом, алюминий может участвовать в распределении экологически чистой (по сравнению с ископаемыми топливами) энергии возобновляемых источников и АЭС и регулировании их генерирующей мощности. При этом наработанные оксиды снова возвращаются на алюминиевый завод для регенерации.

Перспективным топливом будущего, в том числе и для использования в ТЭ, является водород. Водород, как и алюминий, может быть доставлен к месту потребления и преобразован в полезную электрическую и тепловую энергию.

Водород может быть получен прямым электролизом воды электрическим током. Так может решаться проблема хранения электроэнергии. Такая схема хранения может быть использована для регулирования работы электростанций как традиционного типа, так и на основе ВИЭ, в силу более высокой маневренности электролизера воды по сравнению с электролизером

Рис. 2. Ступени преобразования химической энергии традиционным и электрохимическим способами





Накопитель энергии

Источник: inomarka136.ru

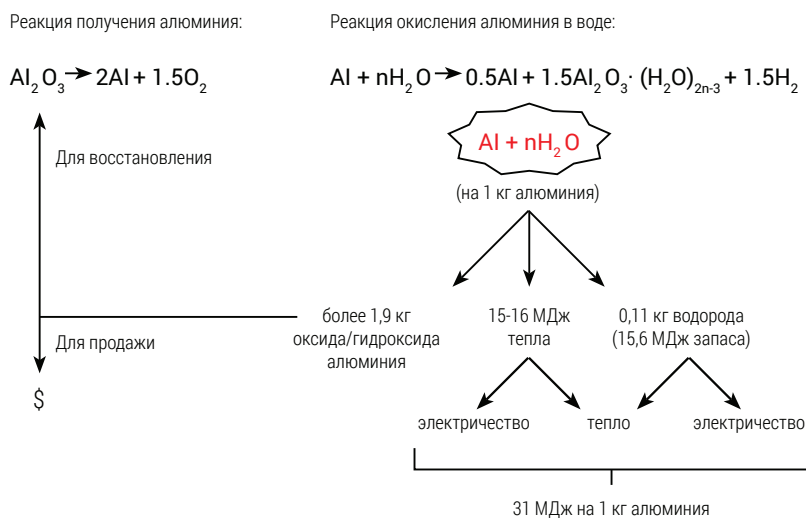
алюминия, который требует буферного накопителя из-за высокой чувствительности к изменению режимов работы. Однако на пути транспортировки баллонного водорода стоят серьезные ограничения, связанные с пожаро- и взрывоопасностью таких перевозок.

Существует вариант с криогенным хранением водорода, но он также является не вполне безопасным и сопряжен с затратами на сжижение газа и последующими потерями при транспортировке за счет испарения. Достаточно широко распространен способ хранения водорода в гидридах

интерметаллических и металлогидридных соединений, однако его существенным недостатком являются низкая емкость по водороду таких соединений (1–3%), высокая стоимость и малое количество циклов гидрирования-дегидрирования.

Традиционный вариант использования дизельного топлива помимо чисто экологических имеет и «энергетический» недостаток – плотность запасенной энергии меньше, чем у алюминия. Кроме того, алюминий в отличие от водорода и дизельного топлива более удобен при транспортировке (не огнеопасен, не текуч, не испаряется).

Рис. 3. Процессы окисления алюминия



Разрабатываемые технологии алюмо-водородной энергетики могут быть применены как в «водородной экономике» будущего в качестве эффективного и безопасного способа транспортировки водорода и запасаемой энергии, так и в качестве дополнения существующих энергосистем в регионах, где отсутствуют централизованная газовая сеть или местные виды топлива. Применение алюминия для генерации водорода и энергии позволяет снизить нагрузку на окружающую среду. Эффективность применения подобных установок во многом определяется стоимостью исходного сырья и побочных продуктов реакции, а также наличием или отсутствием конкурирующих решений по централизованному энергоснабжению потребителей.

### Современное состояние, проблемы и тенденции развития систем аккумулирования электроэнергии

**Перспективы технологии хранения электроэнергии [2].** Новая технологическая модель электроэнергетики характеризуется увеличением сложности энергосистем, связанной с появлением существенной доли распределенной генерации, формированием нового типа субъекта – активных потребителей, соединяющих в себе функции потребления и производства энергии, повышением требований потребителей энергии по доступности, качеству и надежности.

Важно знать, что системные накопители электроэнергии (СНЭ) – это одни из ключевых элементов электроэнергетики

---

**За последние 15 лет стоимость водородного топливного элемента упала в 5 раз, с 275 долл. до 55 долл./кВт. В планах Департамента энергетики США снизить его стоимость до 30 долл./кВт к 2022 г.**

---



Накопитель энергии Tesla

Источник: [unearthed.greenpeace.org](http://unearthed.greenpeace.org)

с интеллектуальной системой управления. Потенциальные области применения накопителей электроэнергии в энергосистеме, среди прочего, включают: сглаживание неравномерности производства и потребления (в том числе сглаживание неравномерности производства электроэнергии на ВИЭ), регулирование напряжения и частоты, предоставление горячего резерва мощности, аварийное питание для предотвращения развития системных аварий (при секционировании энергосистемы) и для восстановления энергосистемы после аварии, аварийное питание потребителя электроэнергии. Особая ценность накопителей перечисленные функции одновременно.

СНЭ могут потреблять и выдавать активную мощность, а в соединении с устройствами силовой электроники – реактивную мощность. В зависимости от потребностей энергосистемы СНЭ могут обеспечить регулирование частоты и напряжения, сдвиг во времени потребления и генерации, регулировку мощности на выходе системы ВИЭ+СНЭ, расширить возможности диспетчерского управления. Они могут быть спроектированы для потребностей распределительной и/или передающей сети, для одноцелевого использования или многоцелевого использования, или для целей управления на стороне потребителя.

Каждая технология накопления энергии характеризуется капитальными затратами на ее внедрение, а также эксплуатационными расходами. В общем, в настоящее время некоторые технологии накопления энергии не являются экономически эффективными, и в перспективе необходимо снизить, в первую очередь, капитальные затраты. Стоимость различных СНЭ и выгода от их применения в значительной степени зависят от их структуры в терминах мощности разряда (МВт) и энергетической емкости (МВт·ч).

Требуемая мощность систем накопителей энергии – около 30 ГВт. Энергоемкость систем накопления около 15 ГВт/ч. Предварительный анализ показывает [11,12], что срок окупаемости системы на основе литий-ионных аккумуляторов составляет 6–7 лет.

*Срок окупаемости системы на основе водородных и алюмоводородных накопителей энергии составляет 4–6 лет за счет локализации возмущающих воздействий активных и реактивных мощностей нагрузок, стабильного качества электроэнергии, экономии топлива на генерирующих станциях, увеличения времени безотказной работы генерирующего оборудования и оборудования потребителей энергии.*

## Заключение

1. Водородные и алюмоводородные накопители энергии являются приоритетными задачами освоения водородных технологий и позволяют обеспечить существенное повышение управляемости, режимной надежности и экономичности электроэнергетических систем.
2. Главное значение накопителей – сформировать новую энергетическую инфраструктуру, свободную от ограничений непрерывности одного вида электрических процессов, а по сути – значительно расширить вид и форму энергетических объединений, позволяющих интегрировать автономные, распределенные и централизованные системы, включая новые центры генерации и потребления в общую энергетическую «систему систем».
3. По оценкам экспертов в ближайшие 10 лет рынок накопителей энергии будет расти со среднегодовыми темпами, превышающими 30 % с тенденцией к снижению удельной стоимости запасенной энергии, где особая роль отводится водородным технологиям.

## Использованные источники

1. URL: <https://rg.ru/2020/12/03/reg-sibfo/nuzhna-li-rossii-vodorodnaia-energetika.html>
2. Грушевенко Екатерина. Форма воды. Водородное топливо будет дешевле бензина. URL: <https://www.forbes.ru/biznes/366881-forma-vody-vodorodnoe-toplivo-budet-deshvele-benzina>
3. Прокопьев Юрий (Новосибирск). Нужна ли России водородная энергетика и на каких направлениях следует сосредоточиться разработчикам технологий? Российская газета. Экономика Сибири. № 273(8327).
4. Полякова Т. В. Состояние и перспективы развития водородной энергетики / Т. В. Полякова // Вестник МГИМО-Университета. 2012. № 1. С. 156–164.
5. Бут Д. А., Алиевский Б. Л., Мизюрин С. Р., Васюкевич П. В. Накопители энергии. М.: Энергоатомиздат, 1991. 400 с.
6. Бушуев В. В., Новиков Н. Л. Инфраструктурные накопители в энергетике // Энергетическая политика. 2020. № 10 (152). С. 74–89.
7. Попель О. С., Тарасенко А. Б. Накопители электрической энергии // Энергоэксперт. 2011. № 3. С. 28–37.
8. Бушуев В. В., Лизалек Н. Н., Новиков Н. Л. Динамические свойства энергообъединений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
9. Алюмоводородная энергетика / Под ред. акад. РАН А. Е. Шейндлина. М.: ОИВТ РАН, 2007.
10. Hingorani N. G. and Gyugyi L. Understanding FACTS concepts and technology of flexible AC transmission systems. IEEE Press, New York, 2000.
11. Гайсин Б. М., Шахмаев И. З., Новиков Н. Л., Новиков А. Н. Экономическая эффективность устройств FACTS при повышении живучести электроэнергетических систем. В сборнике: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 92-е заседание семинара при ИСЭМ СО РАН. В 3-х книгах. Иркутск, 2020. С. 191–202.
12. Фортов В. Е. (академик РАН), Сон Э. Е. (член-корр. РАН), Деньщиков К. К. (д. т. н.), Жук А. З. (д. ф.-м. н., ОИВТ РАН), Новиков А. Н. (инж.), Новиков Н. Л. (д. т. н., ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС») Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Инновационные технические решения в программе ниокр ПАО «ФСК ЕЭС». Сб. статей. М, 2016. С. 198–212.
13. Zhuk A. Z., Denshikov K. K., Buzoverov E. A. (JIHT RAS), Novikov A. N., Novikov N. L., Zhoraev T.YU. (OJSC NTC FSK EES), YU.N. Kuchero (OJSC SO EES Russia) Hybrid Energy Storage System for Power Systems Based on Lithium-Ion Batteries and Supercapacitors CIGRE 2016.