

Перспективы водородных энергоустановок на топливных элементах для развития электротранспорта



М. А. Касаткин,
начальник отдела главного конструктора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», филиал «ЦНИИ СЭТ»



И. К. Ландграф,
зам. директора по направлению водородной энергетики — главный конструктор НВЭ, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», филиал «ЦНИИ СЭТ»

Водородная энергетика — это одно из перспективных направлений глобальной экономики, в которой водород будет играть роль, сопоставимую с той, которую сейчас выполняют уголь, нефть и газ. По различным прогнозам, это может случиться в целом в масштабах планеты после 2040 г., но в отдельных регионах водородная экономика формируется уже в наши дни.

Если в XX веке основным драйвером развития водородных технологий была их экономическая конкурентоспособность по сравнению с дорожающими углеводородами, то в наши дни на первый план выходят обязательства государств, отдельных регионов, компаний и их объединений по борьбе с глобальным изменением климата. Водород является необходимым элементом для реализации этих обязательств: возобновляемые источники энергии могут декарбонизировать в основном электроэнергетику (хотя и там есть ограничения, связанные с их стохастичностью), в то время как энергообеспечение зданий, транспортный сектор, промышленность остаются «за бортом» декарбонизации —

пока не удастся найти новый энергоноситель. Водород претендует на решение этой проблемы, так как в топливных элементах происходит преобразование химической энергии водорода в электроэнергию и тепло без выбросов и практически без потерь, а продуктом реакции является вода [1].

Мировые достижения в области водородной энергетики

Водородные установки (установки на топливных элементах с использованием водорода в качестве топлива) применяются практически во всех сферах деятельности человека (рис. 1). Начнем с автомобилей. Самый удачный пример — Toyota Mirai, впервые представленная в ноябре 2013 года.

В сентябре 2018 года в Германии запустили два поезда на водородных топливных элементах Coradia iLint (вышедшие на неэлектрифицированный маршрут, заменив собой дизельные локомотивы), в ближайших планах — еще десятки таких поездов. На крыше Coradia iLint установлены емкости с водородом и топливные элементы. Великобритания тоже представила свой «водородный поезд» на выставке Rail Live в июне 2019 года. Это вагон, оборудованный 100-киловаттной батареей топливных элементов, литий-ионными аккумуляторами и 20 килограммами сжатого водорода. Он был испытан специалистами только на железнодорожном испытательном полигоне, но уже в этом году поезд могут начать тестировать и на основной британской железнодорожной сети. Китай еще в октябре 2017 запустил



Рис. 1. Существующий в мире водородный транспорт

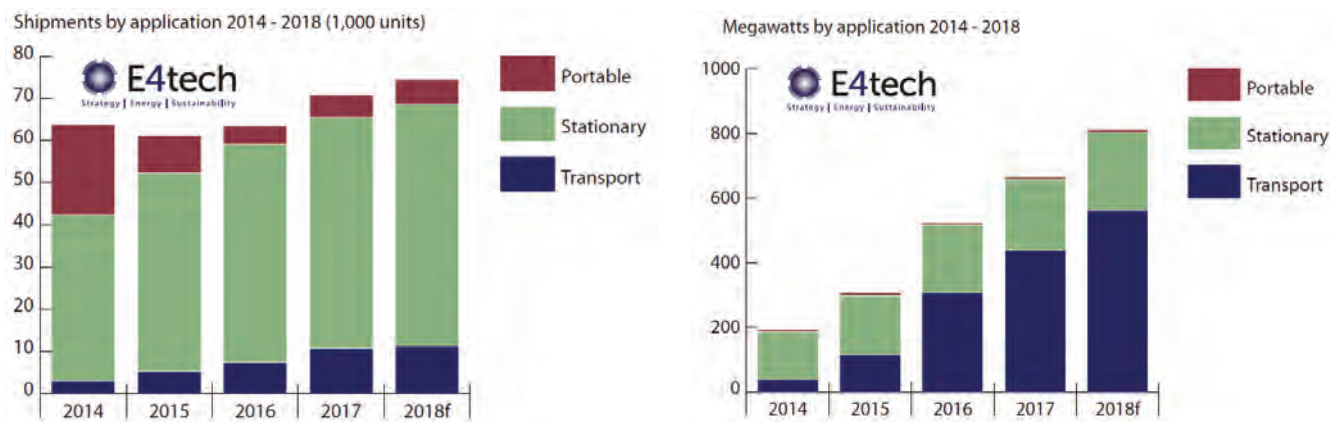


Рис. 2. Динамика изменения рынка ЭУТЭ по назначению [3]

в городе Таншань первый в мире трамвай на водородных топливных элементах.

Планируется применение водородной энергетики и на судах. На сегодняшний день насчитывается около 10 концепт-проектов — на финских, норвежских, голландских и судах ряда других стран уже используются такие установки. Более того, применяют водородные системы и в авиации. Например, беспилотники с этими системами обеспечивают дальность полета в два-три раза большую, чем на аккумуляторных батареях. Разработаны и концепты пассажирских самолетов, рассчитанных на одного-двух человек.

Япония и Германия развивают также направление стационарной водородной энергетики: у них существует понятие «home fuel cell» — «домашние топливные элементы». Их установки позволяют обеспечивать отдельные коттеджи или небольшие коттеджные поселки не только электроэнергией, но и теплом и горячей водой, ведь водородная установка на твердодополимерных топливных элементах выделяет тепловую энергию с температурой 50...60 °С, которые можно использовать.

Следует отметить неуклонный рост продукции водородной энергетики на мировом рынке энергетического оборудования [2]. На рис. 2 показано, как меняется состав номенклатуры мирового рынка энергоустановок на топливных элементах в зависимости от назначения. Если в 2014 году до трети рынка водородных энергоустановок составляли портативные ЭУТЭ (20 тыс. шт.), то в 2018 году пользовались спросом преимущественно стационарные ЭУТЭ (около 60 тыс. шт.). Однако, если говорить о суммарной установленной мощности ЭУТЭ, то транспортное применение, несомненно, преобладают на рынке, а суммарная установленная мощность всех ЭУТЭ за пять лет увеличилась в четыре раза. И это не удивительно, ведь водород, который не существу-

ет в природе в чистом виде, является универсальным аккумулятором электроэнергии, запасы которого можно хранить бесконечно долгое время и транспортировать на любые расстояния без потерь. Именно поэтому страны, не имеющие ископаемых углеводородных ресурсов, могут создавать и создают запасы водорода, получая его из воды электролизом с использованием ВИЭ (возобновляемых источников энергии), используя ветро- и гидрогенерацию, а также солнечные панели в качестве первичного источника энергии.

Проект «Водородный трамвай»

В марте 2019 года между ФГУП «Крыловский государственный научный центр», одно из ведущих предприятий России в области водородной энергетики, обладающее более чем 40-летним научно-практическим опытом создания ЭУТЭ различного уровня мощности для стационарных и транспортных применений, и СПб ГУП «Горэлектротранс» заключено соглашение о сотрудничестве, имеющее своей целью создание действующего макетного образца трамвая на базе серийного трамвая ЛМ-68М2 с энергопитанием от водородной энергоустановки на топливных

элементах (ЭУТЭ) — проект «Водородный трамвай».

Проект «Водородный трамвай» осуществлялся за счет собственных средств предприятий — участников проекта и в октябре–ноябре был представлен научному и инженерному сообществу России (рис. 3). Суть проекта «Водородный трамвай» заключается в создании макетного образца транспортной испытательной платформы для отработки эксплуатационных режимов ЭУТЭ в составе системы электродвижения транспортного средства в городских условиях и демонстрации преимуществ водородной энергетики представителям администрации города, научно-инженерному и бизнес-сообществам. Успешная реализация проекта позволяет сократить технологическое отставание в области создания беспроводного электротранспорта от ведущих мировых промышленно развитых стран, в первую очередь Германии и Китая, где беспроводные трамваи и поезда на основе ЭУТЭ, как было сказано выше, уже находятся в эксплуатации.

ЭУТЭ — это сложный комплекс систем, в котором электрохимический генератор (ЭХГ) является источником



Рис. 3. «Водородный трамвай» на Московском пр. Санкт-Петербурга

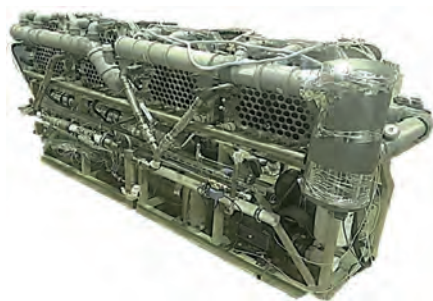


Рис. 4. Электрохимический генератор на основе батарей твердого полимерного топлива, установленный на макетный образец трамвая ЛМ-68М



Рис. 5. Схема размещения оборудования в городском водородном трамвае

электроэнергии (рис. 4). Электричество постоянного тока с изменяющимся в зависимости от нагрузки напряжением необходимо преобразовать в тот род тока и с тем напряжением, которые необходимы для движения трамвая. Мы планировали посмотреть, как ведет себя электрохимический генератор и устройство преобразования электроэнергии (инвертор), настроить совместную работу всех систем, отладить технологию и определить пути, как сделать ее коммерчески привлекательной и пригодной для серийного выпуска.

При этом сам проект является лишь стартовой площадкой, а главной целью сотрудничества является разработка, создание и коммерческое внедрение инновационного беспроводного городского электротранспорта на базе ЭУТЭ (рис. 5).

Целесообразность и эффективность оснащения городского транспорта, в том числе трамваев, энергоустановками на топливных элементах определяется их высокой экономичностью, эксплуатационными и экологическими характеристиками, а именно:

- полным отсутствием вредных выбросов во время работы;
- отсутствием шумов и вибраций при работе;

- высокой маневренностью на всех режимах нагрузки, практически мгновенным запуском;

- высокой эффективностью (в процессе испытаний достигнуто значение $KПД_{ЭХГ} = 50...56\%$ на всех режимах работы, в то время как в генераторах на основе тепловых двигателей — не более 35 % только на номинальном режиме; уточнено фактическое потребление водорода во время работы, равно 0,22 кг(H₂)/км при удельном расходе электро-энергии в режиме автономного хода 4,1 кВт*ч/км и средней мощности ЭУТЭ около 30 кВт);

- высокой надежностью;
- минимальными затратами на обслуживание, длительным периодом межремонтного обслуживания (12 мес.);

- минимальным временем заправки ЭУТЭ водородом (несколько минут), значительно меньшим, чем зарядка аккумуляторных батарей.

Применение такого типа городского беспроводного транспорта, оснащаемого ЭУТЭ, при увеличении первоначальных затрат (стоимости) на изготовление транспортных средств на 20...25 % позволит значительно сократить капитальные и эксплуатационные расходы за счет следующего:

- для окраинных районов, особенно для «вылетных» линий (продолжение городских трамвайных линий за город), — отсутствие необходимости создавать обслуживающую инфраструктуру (контактные сети, тяговые подстанции, кабельные трассы и т. п.);

- для центральных районов — возможность вывода из эксплуатации и демонтажа объектов обслуживающей инфраструктуры, в первую очередь контактной сети (цена оборудования одного километра составляет 10...12 млн рублей) и дорогостоящих тяговых подстанций (цена одной подстанции 120...130 млн рублей), а высвобождаемые мощности в центре города могут быть использованы для других целей;

- существенное снижение затрат на производство электроэнергии.

Проведенный нами сравнительный технико-экономический анализ проекта перспективной «вылетной» трамвайной линии длиной 16,5 км показал, что при строительстве этой линии для «водородных трамваев» по сравнению с обычными трамваями (18 трамваев на линии), работающими от контактной сети, удастся сэкономить около 600 млн руб.

на капитальном строительстве и ежегодно экономить около 120 млн руб. при эксплуатации. Это делает проект рентабельным и привлекательным для инвесторов, правда, при условии рыночной стоимости водорода не более 130 руб./кг (2,0 \$/кг), что вполне соответствует современному состоянию рынка водорода за рубежом [3].

Относительно условий безопасности использования водорода на транспорте следует отметить, что в Российской Федерации водород широко применяется в качестве технического газа в различных областях, в том числе в химической, пищевой, стекольной промышленности и др. В меньшей степени — в качестве энергоносителя — ведущими профильными организациями при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также в единично реализуемой продукции. Необходимая нормативно-правовая база, в том числе регламентирующая требования безопасности в сфере водородных технологий и топливных элементов для транспорта, имеется. Применение водорода предполагает соблюдение требований и правил безопасности при работе с ним. С учетом специфических свойств этого газа к нему предъявляются высокие требования безопасности, однако это не обуславливает невозможность их соблюдения и не является сдерживающим фактором применения водорода в качестве энергоносителя. Это обстоятельство подтверждается аналитическими данными статистики, характеризующими мировые поставки в эксплуатацию энергоустановок на топливных элементах различных типов, работающих на водороде, которые с 2014 года увеличились в четыре раза и для транспортных применений в 2018 году составляли около 600 МВт совокупной установленной мощности.

Проведенные испытания доказали принципиальную возможность создания и внедрения водородного трамвая в качестве инновационного городского пассажирского транспорта. Проект «Трамвай ЭУТЭ» отлично вписался в совместный проект городов-побратимов «Трансформация в сторону безвыбросного городского транспорта в Дрездене и Санкт-Петербурге», участниками которого являются СПб ГУП «Горэлектротранс» и филиал «ЦНИИ СЭТ».

Уже сейчас значительный интерес к проекту проявляется со стороны руководства АО «РЖД», АО «Трансмашхолдинг» и организаций — эксплуатантов городского автотранспорта и малых речных судов.

Топливные элементы представляют большой интерес для российских системообразующих структур, таких как «Газпром», «Росатом», Минпромторг, а также министерство энергетики. Правительство страны понимает всю важность внедрения этой технологии, именно поэтому Минэнерго поручено разработать отдельную программу по развитию водородной энергетики, предложения в которую направлены нами в октябре этого года. По нашему мнению, развитие водородной энергетики должно осуществляться по всем направлениям — от промышленного производства товарного водорода как моторного топлива и его сертификации для использования в экономике страны, транспортировки и хранения до получения из него электроэнергии на транспорте и в стационарной автономной энергетике. Несомненно, программа должна разрабатываться и осуществляться при постоянном внимании и контроле со стороны государства с определением и финансированием компаний-драйверов, обладающих наибольшим научно-техническим потенциалом и подготовленными опытно-экспериментальной и производственной базами.

В заключение хочется привести слова академика РАН Николая Николаевича Пономарева-Степнова о роли ядерной и атомно-водородной энергетики в структуре мирового энергетического производства XXI века:

«Кардинальным решением проблемы обеспечения человечества экологически чистой энергией может быть крупномасштабное производство с помощью ядерных реакторов не только электроэнергии и тепла, но и водорода в качестве энергоносителя для промышленности, энергетики, транспорта и бытовых нужд. Эта концепция, разработанная в России в начале 1970-х гг., получила название атомно-водородной энергетики.

Преимуществом такого подхода является то, что он объединяет достоинства ядерной энергетики (неограниченные ресурсы топлива и минимальное воздействие на окружающую среду при производстве электричества, тепла и водорода) и полезные свойства водорода (неограниченные запасы сырья для его производства (воды), удобство использования и транспортировки, экологическую чистоту в случае использования в качестве топлива, востребованность в химической промышленности, возможность

использования в качестве аккумулятора энергии). Такая энергетика сохранит нефть и газ для неэнергетических нужд и обезопасит атмосферу от вредных выбросов продуктов сгорания» [4].

Литература

1. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика — путь к низкоуглеродному развитию. Центр энергетики Московской школы управления «Сколково». — URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Hydrogen-economy_Rus.pdf. (дата обращения: 14.12.2019)
2. FUEL CELL INDUSTRY REVIEW 2018. — URL: <http://www.fuelcellindustryreview.com/> (дата обращения: 14.12.2019)
3. Costs of Making Hydrogen Available in Supply Systems Based on Renewables / T. Grube, B. Höhle // Hydrogen and Fuel Cells. Springer, 2016.
4. Пономарев-Степной Н. Н. Роль атомной энергетики в структуре мирового энергетического производства XXI века. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». 2006. № 8.

10

**10-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА:
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОБИЛЬНОСТЬ,
ПРОДУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА И МЕТРОПОЛИТЕНОВ**



ЭЛЕКТРОТРАНС

2020

Проводится в рамках Российской недели
общественного транспорта
www.publictransportweek.ru



www.electrotrans-expo.ru

27-29 МАЯ 2020 / МОСКВА / СОКОЛЬНИКИ