

# Водородное топливо. Перспективы применения на подвижном составе



**А. Е. Богославский,**  
к. т. н., зав. кафедрой  
«Тяговый подвижной  
состав», ФГБОУ ВО  
«Ростовский государ-  
ственный университет  
путей сообщения»

В недалекой перспективе водородное топливо найдет широкое применение на наземных транспортных средствах. Для этого необходимо совершенствовать основные показатели производства, хранения и транспортировки водорода применительно к использованию в этом качестве, учитывать особенности конструкции и рабочего процесса топливных элементов различных электрохимических систем, а также особенности конструкции тягового подвижного состава на водородном топливе.

Среди тенденций развития современной энергетики особое место занимает снижение выбросов двуокиси углерода, которые, как предполагается, являются одной из причин глобального изменения климата. Программы перехода к так называемой безуглеродной энергетике, принятые в технологически развитых странах для выполнения требований Парижского соглашения по климату, отдают безусловный приоритет возобновляемым энергоносителям, в том числе водороду. К настоящему времени сформирована специфическая подотрасль, называемая водородной энергетикой, охватывающая аспекты добычи, транспортировки, хранения и применения водорода для стационарных и транспортных установок.

В отличие от традиционных видов топлива природных источников водорода на планете нет. Основные технологии получения товарного водорода в промышленных масштабах можно разделить на три основные группы: паровая конверсия углеводородов, газификация твердого топлива и электролиз водных растворов. Коэффициент полезного действия этих технологий различается незначительно и составляет 70...75 %. В перспективе для крупнотоннажного производства водорода может быть применена технология термохимического разложения воды с использованием высокотемпературного газоохлаждаемого ядерного реактора.

В настоящее время из 75 млн т мирового производства водорода свыше 99 % вырабатывается с использованием технологий паровой конверсии углеводородов, преимущественно метана, и газификации угля [1]. При этом, по данным Международного энергетического агентства, в атмосферу выбрасывается 830 млн т CO<sub>2</sub>. Учитывая, что удельная величина выбросов CO<sub>2</sub> в среднем для мировой электроэнергетики составляет 0,52 кг/кВтч [2], технология получения водорода электролизом тоже не является безэмиссионной. Добиться полного отсутствия выбросов можно за счет использования для электролиза электроэнергии, вырабатываемой с помощью технологий, не связанных со сжиганием ископаемого топлива. Следует отметить, что Россия со средним показателем удельных выбросов CO<sub>2</sub>, равным 0,306 кг/кВтч, занимает одно из лидирующих мест по «чистоте» вырабатываемой электроэнергии.

Стоимостные показатели различных технологий производства водорода

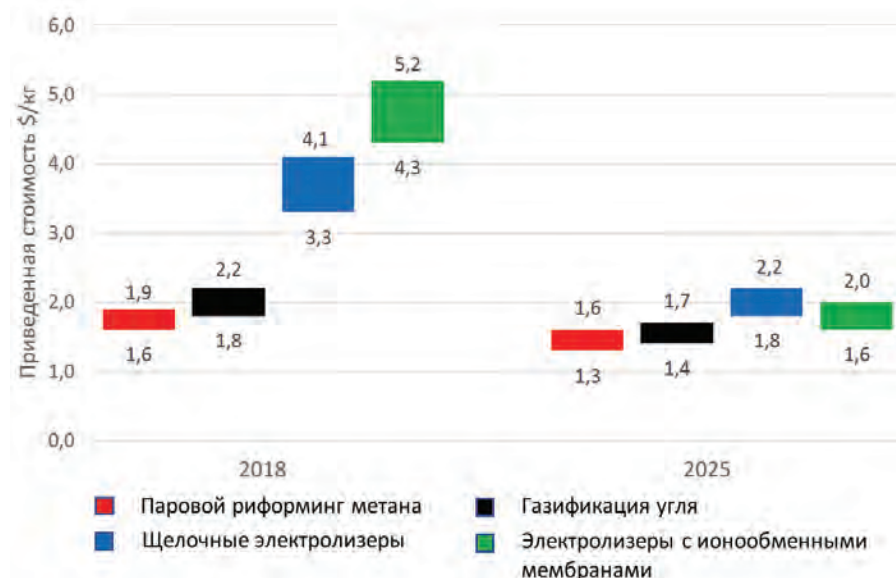


Рис. 1. Приведенная стоимость производства водорода с использованием различных технологий и предполагаемая тенденция ее изменения к 2025 году

и предполагаемая тенденция их изменений к 2025 году [3] приведены на рис. 1.

Сравнение розничной цены таких энергоносителей, как электроэнергия, компримированный водород, дизельное топливо и компримированный метан, на автомобильных заправках Германии приведено на рис. 2. Как видим, стоимость единицы энергии водорода конкурентоспособна в сравнении с традиционными энергоносителями и в перспективе имеет потенциал снижения при увеличении объемов производства, а также совершенствовании технологий получения и транспортировки.

### Транспортировка и хранение водорода

Показатели транспортировки и хранения водорода связаны с его специфическими физико-химическими свойствами. Водород обладает малой молекулярной массой, что существенно снижает удельные массогабаритные показатели хранения. Из данных, приведенных в таблице 1, следует, что по этим показателям водород существенно уступает не только дизельному топливу, но и метану. Это обуславливает увеличение габаритов и массы систем хранения топлива на транспортных средствах либо вынуждает снижать межзаправочный пробег.

При давлении свыше 25...30 МПа удельные показатели хранения компримированного водорода превышают таковые у сжиженного, что делает нецелесообразным хранение водорода на транспортных средствах в жидком состоянии. Среди недостатков криогенных систем хранения водорода следует отметить высокие затраты энергии на охлаждение, достигающие до 30 % теплотворной способности полученного продукта, необходимость иметь систему газификации и дренажную систему для сброса

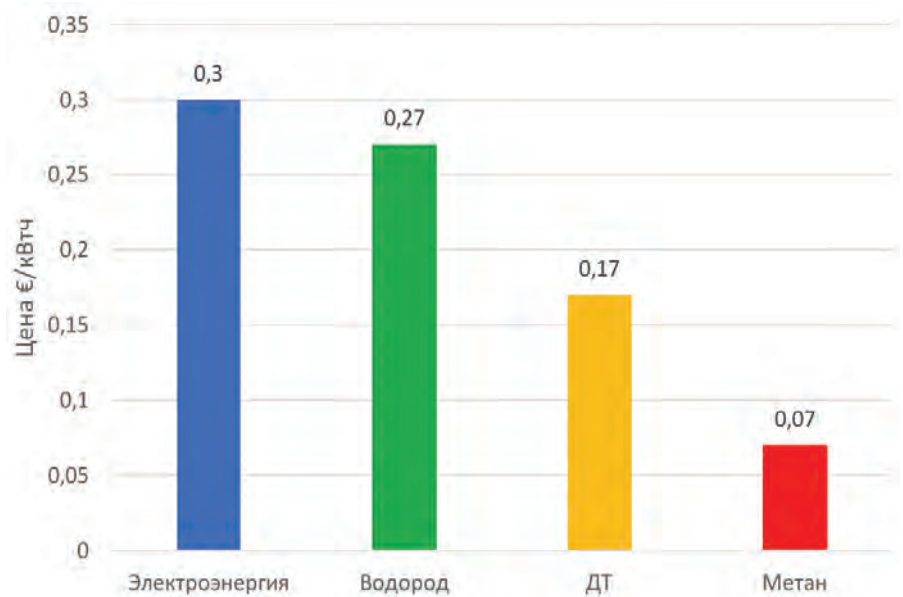


Рис. 2. Розничная цена различных энергоносителей на автомобильных заправках Германии

паровой фазы в атмосферу при длительном хранении. Тем не менее применение криогенной системы хранения водорода на локомотивах может быть оправданным при использовании для этой цели транспортных цистерн-контейнеров, позволяющих производить экипировку локомотива путем замены контейнера. Это обусловлено тем, что коммерческие перевозки водорода в настоящее время осуществляются преимущественно в сжиженном состоянии.

Серьезной проблемой является высокая диффузионная способность водорода, вызывающая повышенную опасность утечек. Диффузия водорода в металлы приводит к необратимым потерям их механических свойств, к так называемой водородной коррозии, которая повышает вероятность возникновения аварийных ситуаций, приводящих к утечкам водорода в окружающую среду. Смесь водорода с воздухом воспламеняется в широком

диапазоне концентраций и характеризуется высокой взрывоопасностью (категория ПС, группа Т1 по ГОСТ 12 1.011–78). Пламя горящего водорода практически бесцветно, что создает определенную опасность для персонала, обслуживающего водородные установки.

### Энергетические установки

Специфические химотологические свойства водорода осложняют его применение в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Низкая детонационная стойкость и высокая скорость сгорания — причины повышенных нагрузок на детали двигателя, малая минимальная энергия зажигания, способствующая появлению преждевременного воспламенения смеси в цилиндре, создают проблемы при использовании водорода в двигателях с внешним смесеобразованием. Высокая температура самовоспламенения водорода препятствует эффективной орга-

Таблица 1. Показатели хранения различных энергоносителей

Способ хранения	Удельная масса, кг/МВт•ч	Удельный объем, м <sup>3</sup> /МВт•ч	Рабочая температура процесса, °С	Рабочее давление процесса, МПа
Водород в стальных баллонах	3009	3,01	$t_0$	15
Водород в композитных баллонах [4]	466	0,99	$t_0$	40
Водород в композитных баллонах [4]	378	0,53	$t_0$	120
Сжиженный водород в криогенной емкости [5]	722	1,37	-272	1,1
Органический «гидрид» (метилциклогексан) [6]	481	0,59	180...280	0,1...1,0
Гидрид магния [6]	440	0,22	100...300	0,1...0,5
Метан в стальных баллонах	907	0,91	$t_0$	15
Сжиженный метан в криогенной емкости [5]	155	0,39	-161	0,7
Дизельное топливо в баке тепловоза	106	0,104	$t_0$	0,1

Примечание:  $t_0$  — температура окружающей среды.

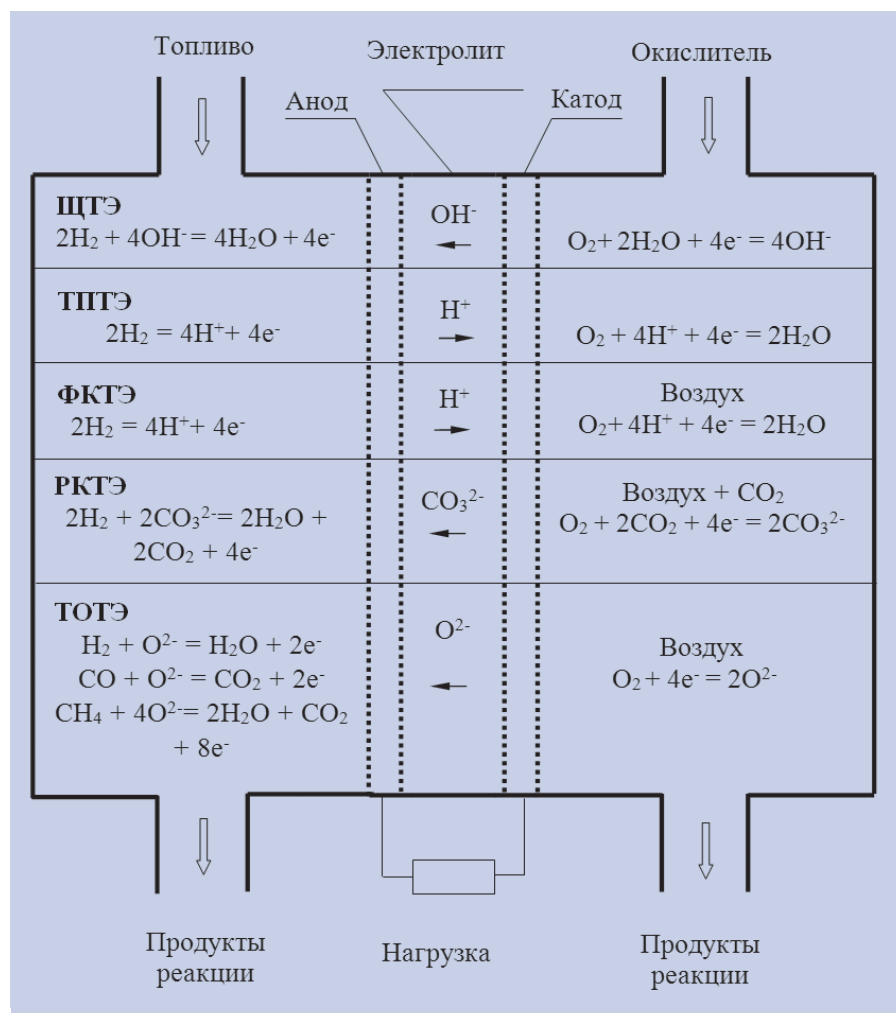


Рис. 3. Схема ТЭ и основные токообразующие реакции на электродах

низации рабочего процесса в двигателях с внутренним смесеобразованием. Эти обстоятельства, а также успешное применение электрохимических технологий в настоящее время дают возможность считать более перспективными энергетические установки (ЭУ), работающие на водороде, — электрохимические генераторы тока (ЭХГ), чем тепловые двигатели.

Основным компонентом ЭХГ является топливный элемент (ТЭ). Он представляет собой электрохимическое устройство, в котором происходит непосредственное превращение химической энергии топлива в электрическую. В связи с тем, что процесс в ТЭ не содержит этапа преобразования химической энергии топлива в теплоту, им не присущи термодинамические ограничения КПД, свойственные тепловым двигателям. Стационарный характер реакций и относительно невысокая температура их протекания позволяют практически исключить образование в ТЭ токсичных веществ.

Сущность реакций, протекающих как в тепловых двигателях, так и в ТЭ, заключается в обмене электронами между реаген-

тами. При термохимическом протекании этих реакций, возникающем при горении топлива, электронный обмен не упорядочен и энергия выделяется в виде теплоты. Для организации управляемого движения электронов в ТЭ реакции разделены, каждая из них протекает на отдельном электроде. Межэлектродный обмен электронами осуществляется по внешней цепи, по которой течет электрический ток. Движение электронов по внешней цепи компенсируется перемещением ионов в электролите, в котором расположены электроды.

К наиболее распространенным типам ТЭ, классифицируемым по типу применяемого электролита и температурному режиму работы, относятся [7]:

- низкотемпературные ТЭ со щелочным электролитом (ЩТЭ);
- низкотемпературные ТЭ с твердополимерной ионообменной мембраной (ТПТЭ);
- среднетемпературные ТЭ с фосфорнокислым электролитом (ФКТЭ);
- высокотемпературные ТЭ с расплавленным карбонатным электролитом (РКТЭ);

• высокотемпературные ТЭ с твердоокисным электролитом (ТОТЭ).

Схема ТЭ и основные токообразующие реакции на его аноде и катоде для различных электрохимических систем приведены на рис. 3.

С точки зрения оценки возможности применения электрохимической силовой установки на железнодорожном подвижном составе рассмотрим более подробно особенности применения ЭХГ с ТЭ различного типа.

### Электрохимический генератор на базе топливного элемента со щелочным электролитом

Начало практического использования ЭХГ на базе ЩТЭ относится к концу 1960-х годов, когда в США, а затем и в СССР на их основе были разработаны ЭУ для космических аппаратов. В СССР ракетно-космическим комплексом «Энергия» разработаны и изготовлены ЭХГ ЩТЭ «Фотон» для пилотируемого космического аппарата «Буран». Впоследствии были созданы и испытаны ЭХГ ЩТЭ для автомобилей, подводных лодок и стационарных ЭУ. В качестве электролита в ЩТЭ используется раствор КОН, его рабочая температура составляет от 70 до 110 °С [8]. Для повышения эффективности работы электроды активируются катализатором на основе металлов платиновой группы. КПД выработки электроэнергии ЩТЭ достигает 60 %.

Специфической особенностью ЩТЭ является высокая требовательность к чистоте как топливного водорода, так и кислорода, применяемого в качестве окислителя. Наличие таких примесей, как CO, CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>, даже в весьма малых количествах приводит к ускоренной деградации электродов и электролита.

В настоящее время конструкция и технология изготовления ЩТЭ достаточно хорошо отработаны, удельные показатели и ресурс этих элементов приемлемы для использования на наземных транспортных средствах, однако из-за упомянутых выше особенностей ЩТЭ не считаются перспективными для транспортных средств коммерческого назначения.

### Электрохимические генераторы на базе топливных элементов с твердополимерной ионообменной мембраной

Энергетические установки на базе ТПТЭ созданы в США в 1950–60 гг. фирмой General Electric для применения на космических кораблях Gemini. В СССР

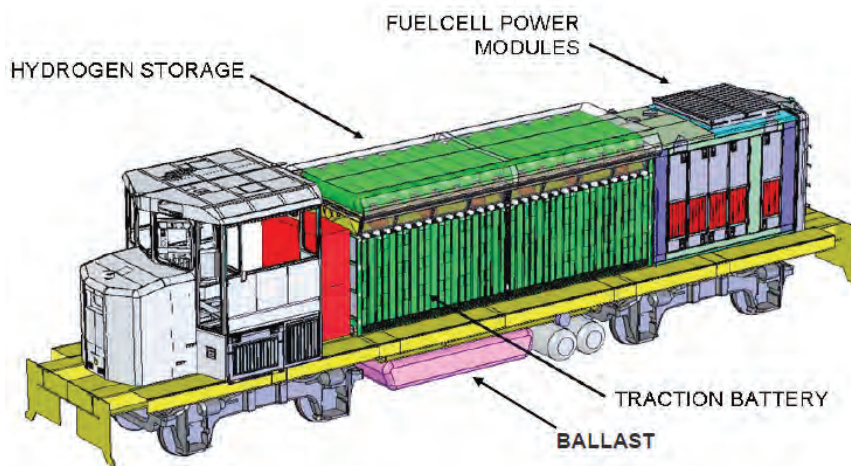


Рис. 4. Компоненка оборудования на тепловозе (рисунок Vehile Projects LLC)

также велась разработки ЭУ подобного типа, однако они не пошли дальше этапа опытных и демонстрационных образцов.

Так как перенос тока в твердополимерных электролитах осуществляется с помощью ионов водорода, ТПТЭ не критичны к наличию в реагентах  $\text{CO}_2$ , что позволяет использовать в качестве окислителя атмосферный воздух. Рабочая температура ТПТЭ 80...100 °С, поэтому к содержанию в водороде  $\text{CO}$  и  $\text{SO}_2$  они предъявляют такие же жесткие требования (< 1 ppm), как и ШТЭ, что ограничивает возможность применения в качестве топлива водорода, полученного путем конверсии из углеводородов, без его тщательной очистки. Electrodes ТПТЭ также содержат катализатор на основе платины.

В настоящее время технологии ТПТЭ являются одними из наиболее интенсивно развивающихся, они ориентированы преимущественно на применение в силовых установках транспортных средств. Это обусловлено такими преимуществами ТПТЭ, как компактность, хорошая приемистость, удобство, большая безопасность в изготовлении и эксплуатации благодаря отсутствию свободного электролита. На базе ТПТЭ создаются ЭУ автомобилей, судов, железнодорожного подвижного состава и летательных аппаратов.

Дальнейшее совершенствование ТПТЭ связано с решением таких проблем, как повышение срока службы ионообменных мембран, повышение их термостойкости, снижение электрического сопротивления и расхода благородных металлов при изготовлении электродов.

#### Электрохимические генераторы на базе топливных элементов с фосфорнокислым электролитом

На сегодняшний день ФКТЭ являются наиболее широко распространенными

преимущественно в стационарной энергетике. Основные работы в этом направлении ведутся фирмами United Technologies Corp., Westinghouse (США), Siemens (Германия), Toshiba, Mitsubishi, Hitachi (Япония) и др. [8]. Разработано, изготовлено и испытано в опытной эксплуатации большое количество ЭУ мощностью от 12,5 до 11 000 кВт, работающих в США, Канаде, ЕС, Японии и России.

В России ракетно-космическим комплексом «Энергия» совместно с Уральским электрохимическим комбинатом разработан ряд стационарных ЭУ ФКТЭ, перекрывающий диапазон мощностей 5...1000 кВт, и локомотивная ЭУ мощностью 1600 кВт.

Важнейшим преимуществом ФКТЭ по сравнению с описанными выше является то, что в составе топлива и окислителя допускается существенно более высокое содержание двуокси углерода. Это дает возможность эксплуатировать ЭУ на базе ФКТЭ на традиционных недорогих топливах — природном газе, нефтепродуктах и угле. Так как непосредственное окисление углеводородов на электродах ФКТЭ неэффективно, неотъемлемой частью ЭУ на их базе является система подготовки топлива, задачей которой является выработка топливного газа, основным компонентом которого является водород (~ 75 %). В связи с тем, что окись углерода снижает эффективность работы анодов ФКТЭ, система подготовки топлива должна обеспечивать достаточно малую концентрацию  $\text{CO}$  в топливном газе, не превышающую 1...3 %. Содержание сернистых соединений не допускается. В качестве окислителя используется атмосферный воздух.

Электролитом в ФКТЭ является концентрированный раствор ортофосфорной кислоты, рабочая температура электроли-

та составляет 180...210 °С, что позволяет добиться приемлемых скоростей реакции. Расход благородных металлов на единицу поверхности электродов ФКТЭ мало отличается от ШТЭ и ТПТЭ.

Указанные особенности ФКТЭ наряду с тем, что основные технологические проблемы их создания в основном решены, делают эти элементы в обозримом будущем перспективными для создания стационарных ЭУ, работающих на традиционных топливах в диапазоне мощностей от 3 до 10 000 кВт.

#### Электрохимические генераторы на базе топливных элементов с расплавленным карбонатным и твердооксидным электролитом

Топливные элементы этого типа и ЭХГ на их основе начали активно разрабатываться с конца 1980-х годов. Ценными особенностями высокотемпературных ТЭ являются высокий достижимый КПД, большой ресурс, возможность обходиться без применения благородных металлов в составе электродов и возможность работы наряду с водородом также и на метане, и на окиси углерода без их предварительной конверсии в водород. Эти элементы, в особенности ТОТЭ, в настоящее время считаются наиболее перспективными как для стационарной энергетике больших мощностей, так и для транспортных ЭУ. Около 50 % НИОКР, выполняемых российскими научными организациями на эту тему, посвящено проблематике ТОТЭ.

Рабочая температура РКТЭ составляет 650...700 °С, для ТОТЭ эта величина находится в пределах 650...1100 °С. Реализация высокого КПД требует применения в этих ТЭ утилизации тепла отработавших газов, для чего в состав ЭУ на их основе должны быть включены паросиловая или газотурбинная установка либо система регенерации тепла с использованием высокотемпературных теплообменников, что позволяет довести КПД по электроэнергии до 70 %. Основные направления совершенствования высокотемпературных ТЭ заключаются в повышении их термоусталостных характеристик (ТОТЭ) и снижении интенсивности коррозии электродов (РКТЭ).

#### Подвижной состав с энергетическими установками на водороде

В 1995 году РКК «Энергия» разработала эскизный проект локомотивной ЭУ на основе ФКТЭ для легкого пассажирского тепловоза ТЭ127 [9]. Водород для

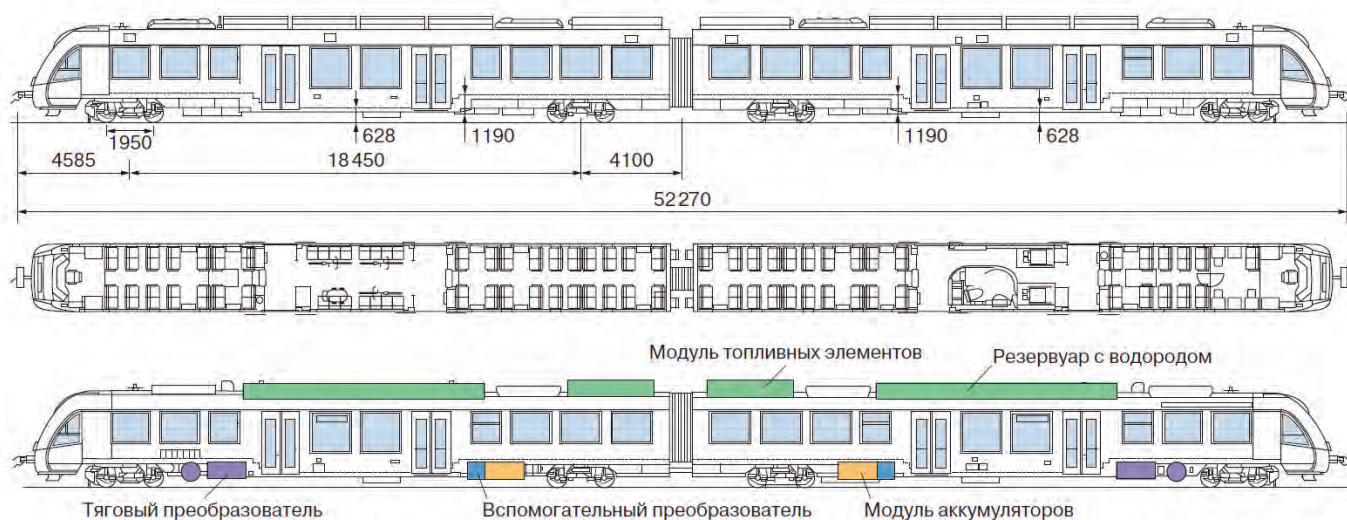


Рис. 5. Компоновка оборудования поезда Coradia iLint

питания ФКТЭ предполагалось получать на борту тепловоза из метана с помощью установки трехступенчатой конверсии. Предложенная ЭУ имела следующие характеристики:

- установленная длительная электрическая мощность 1600 кВт;
- пиковая электрическая мощность (до 6 мин один раз в час) 2100 кВт;
- КПД по электроэнергии относительно низшей теплотворной способности топлива 38...42 %;
- удельная масса ЭУ, включая систему конверсии топлива 36,3 кг/кВт (длит.);
- удельный объем ЭУ, включая систему конверсии топлива 0,08 м<sup>3</sup>/кВт (длит.);
- назначенный ресурс 10 лет.

На основании этой разработки РГУПС (РИИЖТ) совместно с РКК «Энергия» в 1998 г. выполнили эскизную разработку магистрального грузового тепловоза с ЭУ ФКТЭ с использованием технических решений по хранению и газификации метана, отработанных на газотепловозе 2ТЭ116Г-001. Массогабаритные и сцепные характеристики проектируемого локомотива полностью соответствовали параметрам базовой машины. Полученная с учетом ограничений по габаритам ЭУ ФКТЭ расчетная мощность, подводимая к тяговым электродвигателям локомотива, составила 2654 кВт против 3546 кВт прототипа. Дальнейшие работы по этой тематике были остановлены из-за отсутствия финансирования.

Мобильная ЭУ на основе ШТЭ разработана и испытана ВНИИЖТ совместно с РКК «Энергия» [10]. Установка смонтирована в кузове четырехосного полувагона

и предназначена для энергоснабжения путевой техники. Запасы водорода и кислорода в компримированном состоянии хранятся в стальных баллонах.

За рубежом интенсивное развитие водородных технологий в сочетании с политическими решениями по защите окружающей среды привело к активизации работ по совершенствованию транспортных ЭХГ, преимущественно на основе ТПТЭ, и созданию опытного подвижного состава. В США в рамках проектного консорциума, включающего компании BNSF, Vehile Projects LLC, а также ряд государственных и частных организаций, в 2008–2010 гг. оборудованы и испытаны несколько маневро-

вых тепловозов, ЭУ которых выполнена по гибридной схеме и включает ЭХГ на базе ТПТЭ одного из основных производителей ЭХГ этого типа — компании Ballard Power Systems (Канада) [11–12].

Компоновка оборудования одного из тепловозов показана на рис. 4 [13]. Силовая установка на базе ЭХГ ТПТЭ мощностью 250 кВт содержит накопитель энергии на базе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, что позволяет кратковременно реализовывать мощность до 1 МВт. Композитные резервуары, расположенные в верхней части капота, вмещают 70 кг водорода под давлением 35 МПа. Вес ЭУ ЭХГ оказался существенно меньше, чем применяемой



Рис. 6. Размещение водородного оборудования на поезде CRRC-Sifang

ранее дизель-генераторной установки с ее системами, в результате чего потребовался дополнительный балласт массой около 8 т.

Экспертный анализ показывает [14], что для условий ЕС, когда цена дизельного топлива превышает 1,35 €/литр, а цена электроэнергии составляет менее 50 €/МВт•ч, применение подвижного состава, работающего на водороде, является выгодной альтернативой электрификации для участков с небольшой интенсивностью движения. Предполагается, что к 2030 году доля поездов с ЭХГ, работающих на водороде, составит в зависимости от сценария спроса 11...41 % от общего объема поставок тягового подвижного состава. Основная часть спроса будет приходиться на моторвагонный подвижной состав (МВПС) для перевозки пассажиров на местных и региональных линиях.

В большинстве случаев этот подвижной состав создается на базе проверенных конструкций МВПС с дизельным или электрическим приводом. Так, в Германии Siemens, разрабатывая региональный поезд Mireo, совместно с Ballard проектирует вариант с ЭУ ЭХГ. В Великобритании в рамках государственной программы, призванной заменить до 2040 года дизельные поезда поездами на водородном топливе, создается МВПС Hydro Flex.

В Фошане Китайская железнодорожная корпорация подвижного состава (CRRC) поставляет восемь трамваев на водородных ТПТЭ производства Ballard для новой линии легкого железнодорожного транспорта. В китайском городе Таншань проходит демонстрационное испытание первый в мире водородный трамвай, построенный CRRC-TRC, обслуживающий пять станций на 14-километровой линии.

В Торонто, Канада, региональное управление по транзиту провело крупное исследование перспектив системы регионального железнодорожного транспорта на водороде. Предполагается, что в случае принятия положительного решения о строительстве эта система станет самой крупномасштабной.

В процессе создания и доводки этого подвижного состава выработаны достаточно общие технические решения, которые можно рассмотреть на примере регионального водородного поезда Alstom Coradia iLint, завершившего начальный этап испытаний и принятого в эксплуатацию в Германии [15].

Поезд Coradia iLint создан на базе дизель-поезда Coradia Lint54 путем замены

силовой установки с дизелем мощностью 390 кВт с гидромеханической передачей на водородную ЭУ ЭХГ производства фирмы Hydrogenics. Компоновка оборудования поезда показана на рис. 5 [15].

На каждой секции устанавливается один ЭХГ на ТПТЭ мощностью 198 кВт с максимальным КПД 55 %, питающийся водородом с чистотой не ниже 99,98 %. Удельные массогабаритные показатели ЭХГ с учетом всех обслуживающих систем составляют: по массе 3,64 кг/кВт, по объему 5,67 л/кВт, т. е. соответствуют уровню современных дизель-генераторных установок. Параллельно ЭХГ подключена аккумуляторная батарея емкостью 111 кВт•ч и длительной мощностью 221 кВт. Совместная работа ЭХГ и буферной аккумуляторной батареи позволяет в режиме разгона реализовать мощность, более чем вдвое превышающую мощность ЭХГ, обеспечить рекуперацию энергии торможения и минимизировать резкие колебания мощности ТЭ, приводящие к снижению их ресурса.

Запас водорода массой 178 кг в секции хранится в композитных баллонах под давлением 35 МПа, обеспечивая запас хода в пределах 600...800 км с максимальной скоростью 140 км/ч. Топливные баллоны, их обвязка и ЭХГ размещаются, как правило, на крыше для обеспечения беспрепятственного рассеивания возможных утечек водорода в атмосфере и предотвращения образования взрывоопасной водородовоздушной смеси вблизи мест расположения пассажиров и источников воспламенения (рис. 5, 6).

Таким образом, в настоящее время разработаны и апробированы технические решения, позволяющие создавать пригодный для коммерческой эксплуатации подвижной состав с ЭУ, работающими на водороде. Его основой является гибридная ЭУ, включающая ЭХГ ТПТЭ и накопитель энергии, позволяющий стабилизировать режим работы ЭХГ и реализовать рекуперацию энергии торможения. Отечественные научно-технические разработки и технологические возможности позволяют создать тяговый подвижной состав способный стать экологически чистой и экономически эффективной альтернативой дизельной тяги и электрификации. ■

#### Литература

1. Егоров А. Перекись водорода / Газ-пром. № 9. 2019. С. 42–43.

2. Белобородов С. С. Снижение эмиссии CO<sub>2</sub>: развитие когенерации или строительство ВИЭ? Энергосовет. 2018. № 1 (58). С. 16–25. — URL: [www.energsovet.ru](http://www.energsovet.ru).
3. Перспективы России на глобальном рынке водородного топлива: экспертно-аналитический отчет / под ред. Д. Холкина. — М., 2018. — 26 с.
4. URL: [http://www.нпопоиск.рф/publications/companynews/companynews\\_24.html](http://www.нпопоиск.рф/publications/companynews/companynews_24.html) (дата обращения: 27.12.2019).
5. URL: <http://www.cryont.ru/production> (дата обращения: 27.12.2019).
6. Тарасов Б. П. Водородное аккумулирование электроэнергии из возобновляемых источников // Сб. трудов шестой всероссийской конференции с международным участием «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». — Черноголовка, 2019. С. 43–45.
7. Коровин Н. В. Электрохимическая энергетика. — М.: Энергоатомиздат. 1991. — 264 с.
8. Козлов С. И., Фатеев В. Н. Топливные элементы — перспективные химические источники электрической энергии. Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 2. С. 7–22; № 3. С. 9–22.
9. Технико-экономический отчет по созданию энергетических установок на основе фосфорноокислых топливных элементов для различных отраслей народного хозяйства. № 051–8/6–95. — М.: РКК «Энергия». 1995. — 83 с.
10. Григорович Д. Н. Формирование предложений по использованию водородного топлива на железнодорожном транспорте с учетом анализа зарубежного опыта. Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». № 6. 2013. С. 37–49.
11. URL: <https://www.greencarcongress.com/2008/01/bnsf-railway-an.html> (дата обращения: 27.12.2019).
12. Ballard rail presentation. June. 2019. — URL: [/https://info.ballard.com/hubfs](https://info.ballard.com/hubfs) (дата обращения: 27.12.2019).
13. Miller A. R. Fuelcell locomotives for zero-emissions urban rail. — URL: <https://www3.arb.ca.gov/railyard/ryagreement/112807miller.pdf> (дата обращения: 27.12.2019).
14. Pocard N. Hydrogen powered trains: an analysis of 3 focus applications. zero emission rail transport. Jun. 27, 2019. — URL: <https://blog.ballard.com/fuel-cell.trains> (дата обращения: 27.12.2019).
15. Поезд Coradia iLint на топливных элементах. Железные дороги мира. № 4. 2017. С. 52–55.