

# Практическая реализация подвижного состава с водородными топливными элементами



**К. К. Ким,**  
д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники и энергетики» ПГУПС, член Общественного совета при Росжелдоре,



**М. Ю. Изварин,**  
канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики» ПГУПС.

Применение водорода в качестве топлива на транспорте, в том числе железнодорожном, является одним из самых перспективных направлений в области внедрения альтернативного топлива. Особую актуальность приобрел вопрос использования водородных топливных элементов с целью получения на локомотиве электрической энергии в результате химической реакции соединения водорода с кислородом.

Водород применялся и ранее в качестве моторного топлива, которое подлежало сжиганию с выделением определенного количества теплоты, потенциально способной выполнять полезную работу. Новый импульс к использованию  $H_2$  на железнодорожном транспорте обусловлен разработками топливных элементов (ТЭ), в которых энергия химических веществ напрямую превращается в электрическую.

Исключение этапа горения из процесса энергопреобразования обуславливает ряд достоинств подвижного состава (ПС) с силовой установкой на основе водородных ТЭ: экологическую чистоту, низкий уровень шума по сравнению с тепловозами и дизельпоездами, высокую надежность, более высокий КПД по сравнению с двигателями внутреннего сгорания.

Из недостатков «водородного» подвижного состава можно отметить: высо-

кую цену  $H_2$ ; дороговизну эксплуатации (примерно на 60% выше, чем ПС с дизелем и электропередачей); сложную конструкцию топливной аппаратуры и большую стоимость емкостей, предназначенных для хранения  $H_2$  под давлением; необходимость в сложной и дорогой заправочной инфраструктуре; взрыво- и пожароопасность. При этом хранение водорода в виде металлгидридных соединений сопряжено с рядом технологических сложностей.

## Водородно-аккумуляторные локомотивы в США

**Шахтный узкоколейный электровоз.** К достоинствам рельсового транспорта, используемого при подземных работах, можно отнести: привязанный к оси пути габарит ПС; малое сопротивление движению; возможность использования как узкой, так и широкой колеи.

В шахтах особо остро стоит вопрос газо- и дымоудаления, поэтому используются электровозы, но наличие контактной сети вблизи забоев создает технологические трудности, поэтому наряду с контактными используются также аккумуляторные и контактно-аккумуляторные электровозы с известными недостатками: малой мощностью, ограниченным запасом хода, большой массой. Применение силовой установки на основе водородных ТЭ позволяет отказаться от контактной сети в шахте и использования дизелей [1, 2].

Компания Vehicle Projects Inc. совместно с American Platinum, Ltd, Trident South Africa и Battery Electric создали шахтный локомотив с силовой установкой на основе водородных топливных элементов (рис. 1).



Рис. 1. Шахтный локомотив с силовой установкой на основе водородных топливных элементов

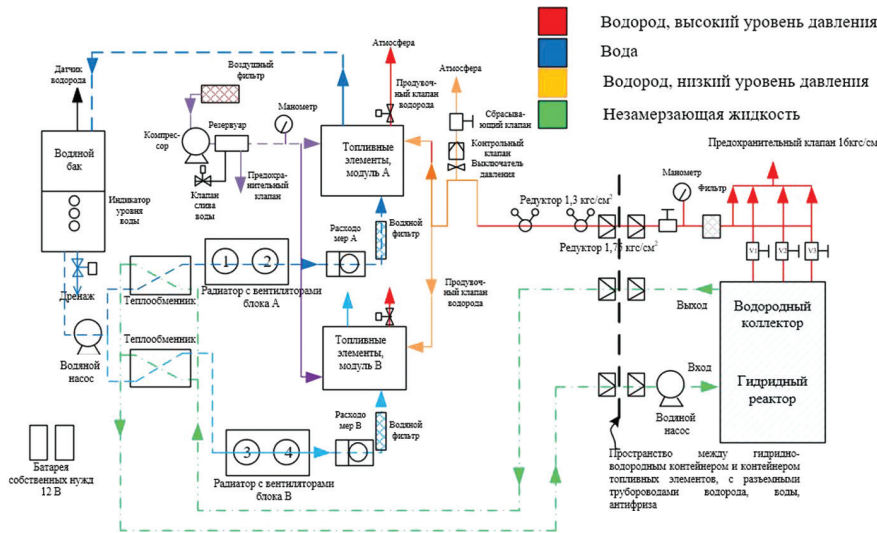


Рис. 2. Принципиальная схема потоков газов и жидкостей шахтного водородного электровоза.

В локомотиве  $H_2$  хранится в виде металлгидридных соединений с плотностью до  $150-170 \text{ кг/м}^3$ . Для сравнения: при хранении сжатого водорода в баллонах плотность составляет  $12-15 \text{ кг/м}^3$  при давлении  $356 \text{ кгс/см}^2$  и до  $40 \text{ кгс/м}^3$  при давлении до  $700 \text{ кгс/см}^2$ . Масса баллонов еще больше ухудшает этот показатель. Металлогидридные накопители могут отдать накопленный водород при соответствующем нагреве. Данную теплоту можно получить от работающих ТЭ. Их большая мощность позволила не применять гибридную схему. При этом безопасность находится на высоком уровне, так как давление  $H_2$  составляет примерно  $10,2 \text{ кгс/см}^2$ . Сравнительные технические характеристики водородного локомотива и базового аккумуляторного электровоза приведены в таблице.

Базовый шахтный электровоз снабжен кислотной аккумуляторной батареей (АКБ), состоящей из 52 последовательно включенных ячеек (напряжение  $104 \text{ В}$ ), тяговыми двигателями постоянного тока последовательного возбуждения с добавочными полюсами, передачей с двусторонним зацеплением. В водородном локомотиве смонтирована силовая установка из ТЭ такого же объема, что и тяговая АКБ.

Система хранения  $H_2$  расположена сверху капота и выступает на  $20 \text{ см}$ . Локомотив легче почти на  $30\%$  по сравнению с аккумуляторным, и для обеспечения силы сцепления на него установлен балласт массой  $1,1 \text{ т}$ . Два модуля ТЭ производства компании Nuvera Fuel Cells Europe генерируют электроэнергию с напряжением  $104 \text{ В}$  и током  $135 \text{ А}$  продолжительной мощностью  $14 \text{ кВт}$ . Теплота, выделяющаяся при ра-

боте ТЭ, идет на десорбцию  $H_2$  из накопителя, причем в контуре охлаждения ТЭ используется вода, а в накопителе — антифриз. Два контура связаны через теплообменник (рис. 2). Для дополни-

тельного охлаждения контура ТЭ используется принудительное воздушное охлаждение.

Внешняя характеристика силовой установки шахтного электровоза [3] и зависимость мощности от тока приведены на рис. 3. Конструкции силовой установки из модулей ТЭ и модуля для хранения  $H_2$  показаны на рис. 4.

**Маневровый гибридный локомотив GreenGoat (BNSF1205).** В США интерес к использованию  $H_2$  на ПС во многом объясняется тем, что железные дороги страны в основном работают на тепловозной тяге, по энергетической эффективности и экологической чистоте существенно уступающей электрической. При этом до  $60\%$  нефтепродуктов доставляется из-за рубежа [9].

Координатором программы создания водородно-аккумуляторных маневровых и маневрово-вывозных локомотивов на ТЭ в США является компания Vehicle Projects LLC, которая возглавляет частно-

Сравнительные характеристики водородного локомотива и аккумуляторного электровоза

Показатель	Электровоз аккумуляторный	Водородный локомотив
Мощность продолжительная, кВт	7,1	14
Напряжение, В	104	104
Ток ТЭ, А	75	135
Запас энергии, кВт·ч	43	48
Время работы на одной заправке, ч	6	8
Время заправки (заряд АКБ или накопителя водорода), ч	8	0,75
Масса локомотива, кг	3600	2500 (без балласта)

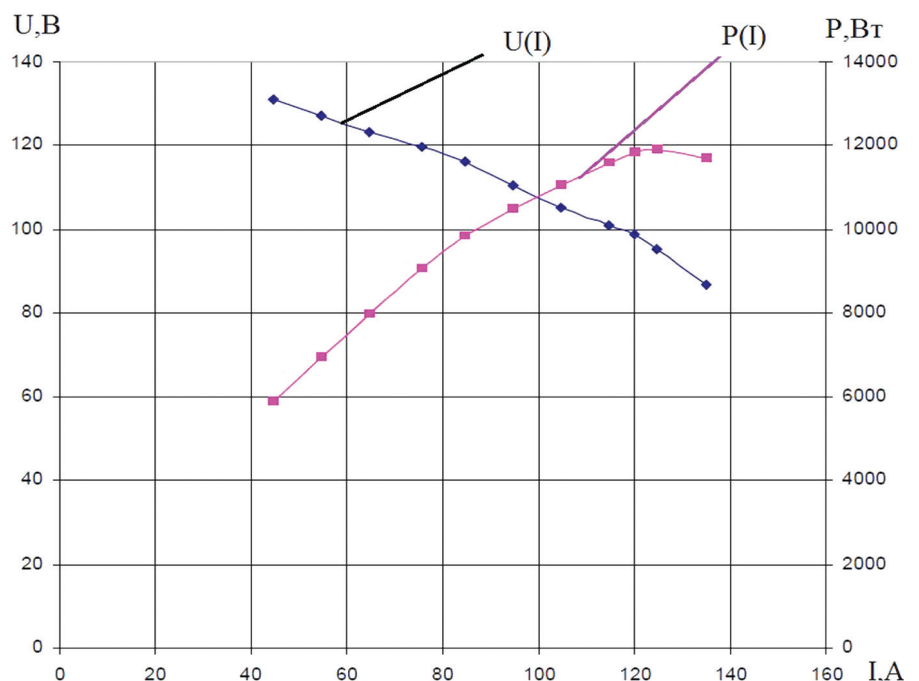


Рис. 3. Внешняя характеристика и зависимость мощности от тока шахтного «водородного» электровоза

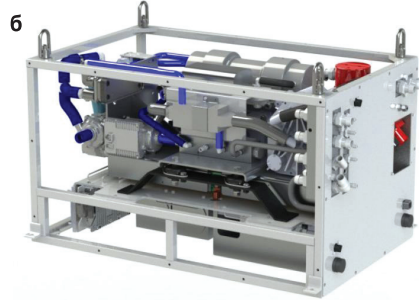
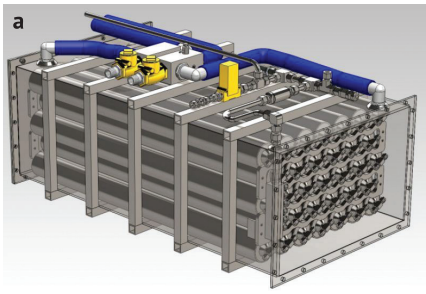


Рис. 4. Металлогидридный модуль для хранения водорода (а) и блок ТЭ (б)

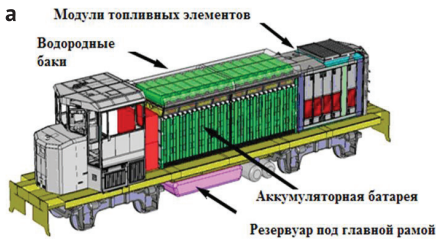


Рис. 5. Компонка водородно-аккумуляторного маневрового локомотива (а) и его внешний вид (б)



Рис. 6. Размещение водородных баков (а) и ТЭ (б)

государственный консорциум. Он объединил промышленные фирмы, научно-исследовательские и экспериментальные центры, военные организации и т. д.

Компания Берлингтон Нортерн — Санта-Фе (BNSF) — один из инициаторов рассматриваемых проектов. В военных целях водородный локомотив может использоваться для электроснабжения военных баз. Отсутствие выхлопа делает его менее заметным для спутниковых систем инфракрасного наблюдения и дронов.

Запуск проекта создания маневрового водородно-аккумуляторного локомотива состоялся в мае 2006 г. Его бюджет исчислялся 4,450 млн дол. США. Проектный график охватывал шесть этапов и рассчитан на 29 мес.

Железная дорога I класса BNSF для испытаний приобрела модернизированный маневровый локомотив, в котором дизель-генератор базовой модели заменен силовой установкой из двух модулей ТЭ по 125 кВт каждый (рис. 5).

Проектирование водородно-аккумуляторного локомотива предполагало решение ряда проблем: стабилизацию

массы и центра тяжести, размещение запасов  $H_2$ , адаптацию нового бортового оборудования к жестким условиям эксплуатации на локомотиве, соблюдение нормативных требований по безопасности, обеспечение хорошей ремонтно-пригодности и др.

Запасы  $H_2$  размещены в 14 баках из углепластика с алюминием длиной 2100 мм и диаметром 416 мм. Они располагаются на крыше локомотива над тяговой АКБ (рис. 6). Собственная масса бака без  $H_2$  составляет примерно 100 кг. В каждом баке может храниться примерно 5 кг  $H_2$  при давлении 356,9 кгс/см<sup>2</sup>.

Схема конструкции накопителя с водородными баками, размещенными в верхней части подкапотного отделения [4], показана на рис. 7. Это позволило минимизировать последствия при возможной утечке  $H_2$ . Снижен риск повреждения баков в случае схода с рельсов или столкновений с автотранспортом или при механическом контакте с посторонними предметами на путях.

Баки легкие по отношению к общей массе локомотива, поэтому их размещение на крыше не оказывает заметного

влияния на центр тяжести. Каждый бак снабжен:

- клапаном ограничения расхода газа, предотвращающим утечку  $H_2$  при прорыве трубопровода;
- стравливающим клапаном с датчиком температуры, срабатывающим при температуре выше 109 °С;
- датчиком, позволяющим системе управления определить скорость расхода  $H_2$ ;

- электромагнитным клапаном, закрытым в нормальном состоянии и открывающимся при работе.

Модули баков имеют независимые датчики давления и соединены с первичным расходным трубопроводом. Перед подачей к топливным элементам  $H_2$  проходит через фильтры и регулятор давления. Для экстренного отключения водорода с двух сторон локомотива имеются аварийные выключатели.

В качестве ТЭ использованы ячейки Ballard P5TM, которые уже устанавливаются на гибридные автобусы Citaro, трамваи и пр.

Канадская компания Ballard Power System является мировым лидером в производстве ТЭ с протонно-обменной мембраной с мощностью от 1 кВт до 1,25 МВт [1, 5]. График зависимости напряжения от плотности тока для ячейки P5 с мембраной толщиной 50 мкм дан на рис. 8.

Батарея ТЭ локомотива, состоящая из шести одинаковых сборок, содержит 960 элементов. Для контроля за работой силового блока топливных модулей предусмотрен специальный дисплей. Энергия, выработанная ТЭ, поступает на батарею через DC — DC преобразователь. Блок ТЭ имеет сложную систему жидкостного охлаждения, в которой используется состав на основе гликоля. Поток  $H_2$  в силовом модуле управляется датчиками расхода, эжекторными насосами и продувочными клапанами.

На рис. 9 показано подключение ТЭ в схеме локомотива [5–7]. Конструктивное размещение силовых модулей поясняется на рис. 10.

Данный локомотив — первый образец нового класса тягового ПС с инновационными силовыми установками, которые в будущем могут производиться крупносерийно.

Испытания на ударную нагрузку на испытательном полигоне Транспортно-испытательного центра Ассоциации американских железных дорог и опытная эксплуатация на станции Nobart Yard железной дороги BNSF в районе

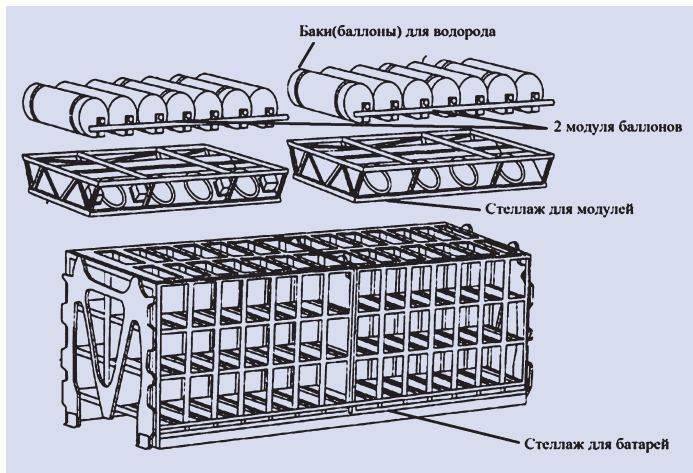


Рис. 7. Конструкция для установки баков и АКБ в кузове локомотива

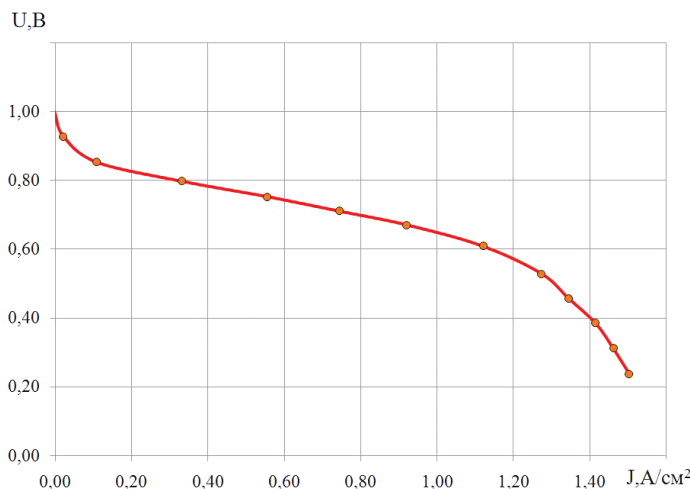


Рис. 8. Зависимость напряжения от плотности тока топливного элемента Ballard-MP5 для протонообменной мембраны толщиной 50 мкм

Лос-Анджелеса завершены к 2010 г. На последнем этапе локомотив использовался в качестве электростанции на военной базе штата Юта. Все время локомотив работал с эквивалентом тяговой нагрузки, проведены измерения уровня шума и определены расход и стоимость водородного топлива. По результатам испытаний построен график энергопотребления локомотива в режиме маневровой работы (рис. 11) [4].

Установлено, что средняя мощность, развиваемая локомотивом в маневровом режиме на станции, даже меньше, чем мощность одного из двух модулей на основе ТЭ — всего 75 кВт. Это подтвердило правильность выбора мощности силовой установки. Однако сфера эксплуатации локомотива существенно сузилась — он стал пригоден только для маневров на станции, в то время как большинство маневровых локомотивов в мире предназначены еще для вывозной работы.

Здесь ограничения накладывают не только мощность силовой установки, но и наличие заправочной инфраструкту-

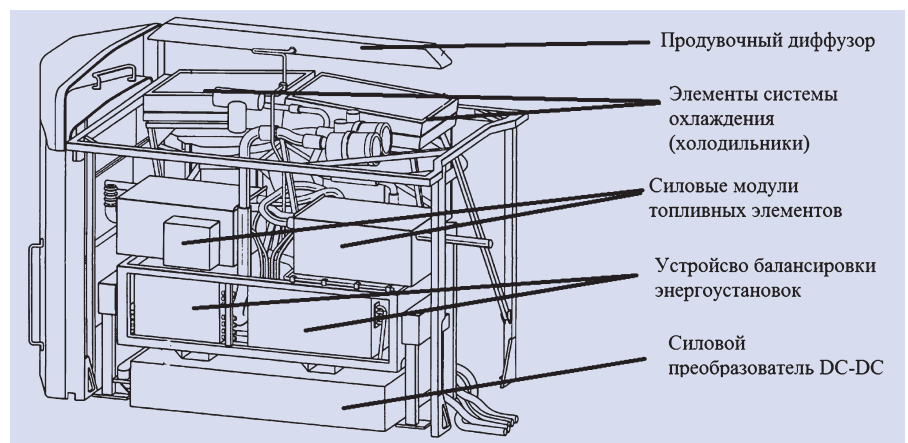


Рис. 10. Конструкция шахты силовых модулей и системы их охлаждения

ры. Длительность работы на одной заправке H<sub>2</sub> составляет 11,1 ч (одна смена при маневровой работе) в то время, как современные тепловозы при среднем расходе дизельного топлива до 40 кг/ч и емкости бака 4–7 т могут работать без дозаправки до 9–10 смен.

Если использовать подобные локомотивы для легкой поездной работы, возникает необходимость создания

целой сети сложных и дорогих заправок станций с компрессорным оборудованием. Подводить же газ с таким давлением по трубопроводам сложно, не говоря уже про недостаточную мощность гибридной силовой установки. К станции Nobart баллоны с H<sub>2</sub> подвозили автомобилями и подавали на борт локомотива с помощью компрессорного оборудования (рис. 12) [4].

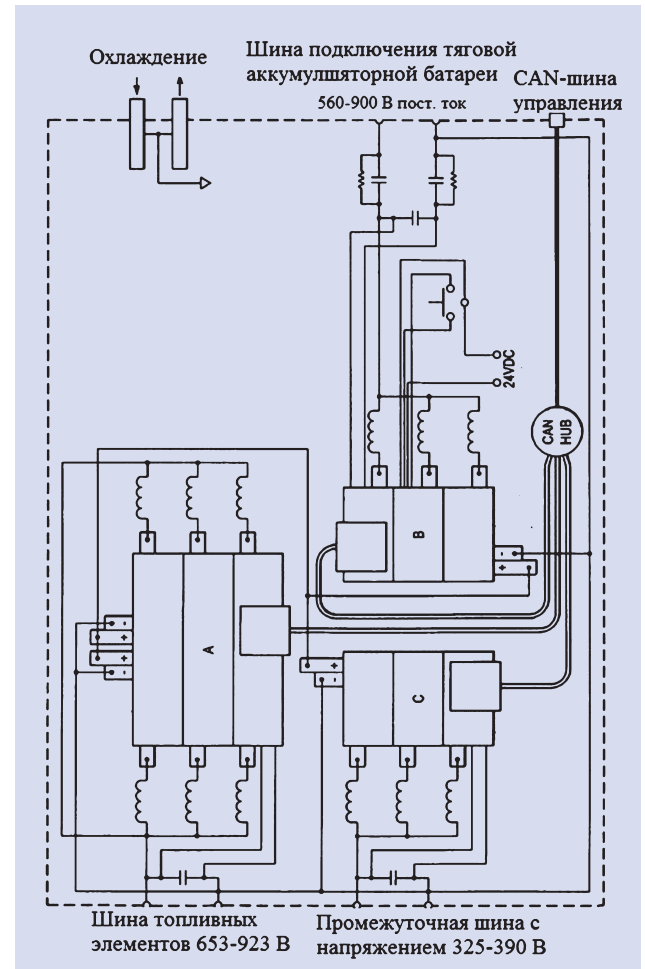


Рис. 9. Структурная схема включения ТЭ в силовую схему локомотива с использованием DC – DC преобразователя с гальванической развязкой; А, В, С – преобразователи – модули American Semiconductor PM1000 на основе IGBT

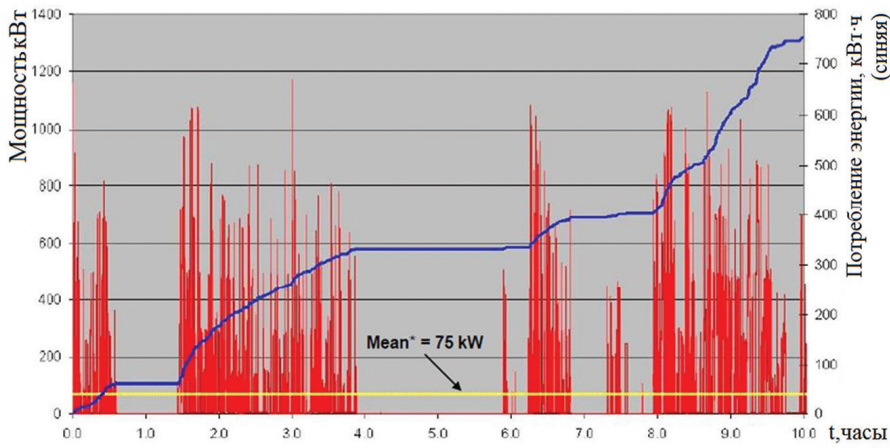


Рис. 11. График мощности и потребления энергии маневровым гибридным локомотивом с силовой установкой с ТЭ



Рис. 12. Заправочная станция водородного локомотива

С 2010 по 2014 гг. локомотив эксплуатировался на железной дороге BNSF как опытный на сортировочной станции Hobart. В процессе эксплуатации выявлены его достоинства и недостатки, затем он был передан в музей железных дорог Оклахомы для вождения музейных поездов. Однако готовятся новые, более совершенные локомотивы.

Основные технические характеристики локомотива BNSF 1205: схема тягового привода — гибридная (ТЭ + АКБ); тип ТЭ — два модуля ТЭ с полимерной мембраной  $2 \times 125$  кВт; общая мощность ТЭ — 0–250 кВт; средняя развиваемая мощность — 75–95,7 кВт; напряжение на выходе ТЭ — 650–920 В;

средний КПД — 41–49%; материал водородных баков — углепластик; количество баков — 14; давление в баках — 35 МПа ( $\approx 357$  кгс/см<sup>2</sup>); запасаемая масса  $H_2$  — 67,0 кг при 20 °С; тип торможения — рекуперативное; емкость кислотной свинцовой АКБ — 2400 кВт·ч; среднее потребление водорода — 5,73 кг/ч; средняя продолжительность работы на одной заправке баков — 11,1 ч; масса локомотива — 130 т; стоимость проекта — 4,450 млн дол. США.

### Моторвагонные поезда с силовыми установками на водородном топливе разработки Японии

В транспортной системе Японии пригородные моторвагонные электропоезда, легкорельсовый транспорт и метро выполняют до 70% всего пассажирооборота (не считая высокоскоростных линий). Поэтому в тенденциях начала 2000-х гг. (повышение энергоэффективности перевозок, снижение выбросов) первые разработки в области использования  $H_2$  сделаны для моторвагонного подвижного состава.

В 2003 г. Научно-исследовательский институт железнодорожного транспор-

та Японии представил опытный водородный моторный вагон. Он переоборудован из обычного вагона электропоезда, в котором дополнительно установлена кабина управления (рис. 13).

Этот вагон предназначался только для проверки возможности движения с использованием  $H_2$ , поэтому ТЭ установлен прямо в салоне, а под вагоном — водородные баки. Также использовалась система, автоматически регулирующая подачу  $H_2$  к ТЭ в зависимости от нагрузки, чем он принципиально отличается от других образцов, на которых используется гибридная схема [8]. На испытаниях вагон развил скорость 105 км/ч. Общий вид ТЭ в кузове вагона приведен на рис. 14.

После успешных испытаний опытного вагона RTRI разработал двухвагонный пассажирский поезд, работающий от водородных ТЭ (рис. 15), которые поставила компания Nuvera Fuel Cells (США). Этот поезд рассчитан на скорость 110 км/ч, а пробег без дозаправки составил 300 км, вместимость — 280 пассажиров. Один из вагонов оборудован тяговыми электродвигателями, системой распределения электроэнергии и АКБ, которая заряжается при рекуперативном торможении. Из-за этого пришлось вернуться к гибридной схеме. В промежуточном вагоне поезда установлены ТЭ и водородные баки.

Компоновка оборудования изменена: водородные баки и ТЭ смонтированы под кузовом вагона. Двухвагонная секция состоит из моторного вагона массой 34 т и прицепного массой 29 т. Внешний вид подвагонного модуля ТЭ дан на рис. 16. Основные технические характеристики поезда RTRI: схема тягового привода — гибридная (конт. сеть 1,5 кВ + ТЭ); тип ТЭ — два элемента с полимерной мембраной массой 1,9 т; мощность ТЭ — 90 кВт; напряжение на выходе ТЭ — 200–350 В; напряжение на выходе преобразователя — 700 В; давление в водородных баках — 35 МПа ( $\approx 356$  кгс/см<sup>2</sup>); напряжение в контактной сети — 1,5 кВ, пост. ток; максимальное ускорение — 0,7 м/с<sup>2</sup>; замедление при торможении — 0,86 м/с<sup>2</sup>; тип торможения — рекуперативное, на АКБ; мощность литий-ионной АКБ — 540 кВт; запас хода — 300 км.

Конкурентом RTRI является Западно-Японская железнодорожная компания (JR East) [9], построившая гибридный моторный вагон, оборудованный АКБ и ТЭ 130 кВт (рис. 17, а). Два элемента и бак с  $H_2$  установлены под полом, а АКБ мощно-

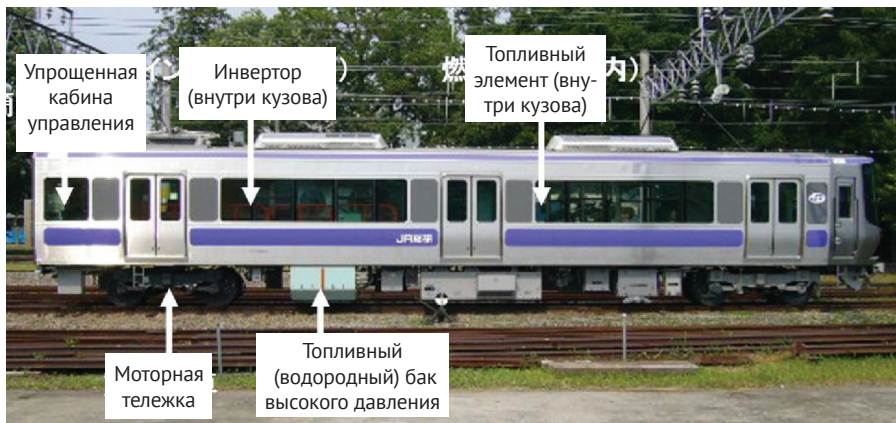


Рис. 13. Расположение оборудования опытного вагона RTRI



Рис. 14. Топливные элементы производства компании Nuvera



Рис. 15. Общий вид поезда RTRI



Рис. 16. Модуль Nuvera E45 в подвагонном исполнении

стью 300 кВт (примерно треть от полной мощности вагона) — на крыше. Запас хода составляет 50–100 км без дозаправки. Ускорение вагона примерно такое же, как и у стандартного пригородного поезда, а максимальная скорость равна 100 км/ч. Во время первой краткой демонстрации вагона перевезено 30 пассажиров, максимальная скорость составила 50 км/ч.

Топливные элементы поставлены компанией Toyota. На основании испытаний в 2022 г. создан поезд с силовой установкой на топливных элементах FV-E991 (рис. 17, б). Основные технические характеристики поезда на топливных элементах FV-E991: схема тягового привода — гибридная (ТЭ + АКБ); количество ТЭ — два элемента; мощность ТЭ — 180×2 кВт; напряжение на выходе ТЭ — 200–350 В; напряжение на выходе преобразователя — 700 В; давление в водородных баках — 70 МПа ( $\approx 712$  кгс/см<sup>2</sup>); емкость баков — 1020 л; максимальная скорость — 100 км/ч; тип торможения — рекуперативное, на АКБ; емкость литий-ионной АКБ — 24 кВт·ч; запас хода — 140 км при 70 МПа, 80 км при 35 МПа.



Рис. 17. Общий вид подвижного состава JR east: а — опытный; б — серийный с FV-E991



Рис. 18. Моторвагонный поезд Coradia i-Lint. Фото с официального сайта компании ALSTOM

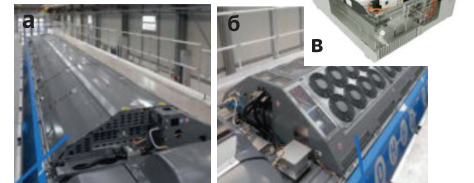


Рис. 19. Компонировка силового оборудования: а — водородных баков; б — ТЭ; в — АКБ

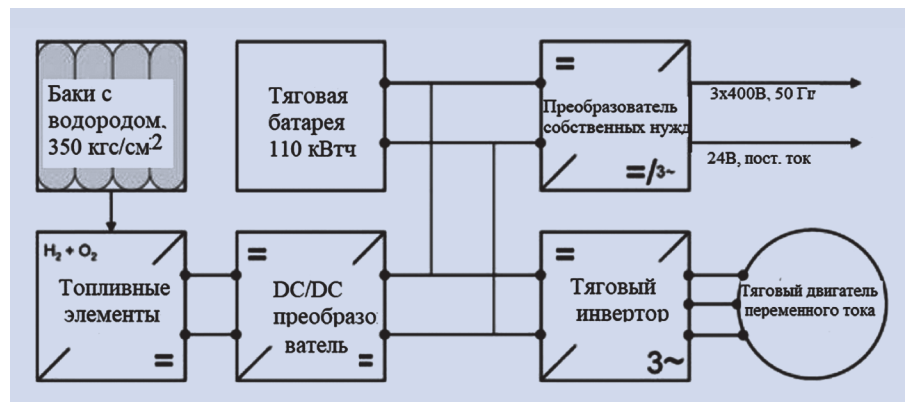


Рис. 20. Силовая схема с ТЭ моторвагонного поезда Coradia i-Lint

### Электропоезд Coradia i-Lint производства компании Alstom

Электропоезд, в котором вместо питания от контактной сети используются водородные ТЭ, построен на базе Alstom Coradia (рис. 18) [10]. Выпускается и версия дизель-поезда. Моторвагонные поезда Coradia i-Lint — единственные пассажирские поезда, производимые серийно и осуществляющие регулярные пассажирские перевозки. Водородные баки и ТЭ расположены на крыше, а АКБ, преобразователи и контакторы — под вагоном (рис. 19).

Силовая схема поезда Coradia i-Lint представлена на рис. 20. Технические характеристики поезда: максимальная скорость — 140 км/ч; запас хода на одной заправке — 1000 км; масса вагона — 49 т; запас H<sub>2</sub> — 94–130 кг (на один вагон/секцию); мощность силовой установки — 2×200 кВт (на двухвагонный поезд); давление в водородных баках — 350 кгс/см<sup>2</sup>; тип ТЭ — Hydrogenics HyPMTM Power modules; схема — гибридная; емкость литий-ионной АКБ — 110 кВт·ч; удельный расход H<sub>2</sub> — 0,25 кг/км; цена топлива

(средняя) — 4–7 Евро/кг; время заправки на заправочной станции — менее 30 мин.

### Российский опыт использования водорода в качестве топлива

Опыт применения водорода в качестве топлива имел место еще в Российской империи. Известно, что один из экземпляров иппомобиля, изобретенного бельгийско-французским ученым и инженером Этьеном Ленуаром (Jean-Joseph Lenoir) был поставлен в Россию. Данный иппомобиль был оснащен «жидкоуглеводородным» (нефтяным) двигателем мощностью 1,5 л. с. с примитивным карбюратором, запатентованным в 1886 г. Однако в России данная разработка развития не получила. В дальнейшем водород применялся в нашей стране как газомоторное топливо.

Следующие примеры его использования относятся уже к XX в. Следует отметить, что в блокадном Ленинграде под водород было переоборудовано порядка 200 автомобилей ГАЗ АА, однако это был скорее вынужденный шаг. Имелись попытки использования водорода в качестве



Рис. 21. Энерговагон ЭВТЭ-1

ве топлива и на железной дороге. Однако практически все разработчики, использовавшие водород в качестве моторного топлива, сталкивались с рядом технических проблем:

- большая масса баллонов из-за необходимости хранить водород сжатым (компримированным);
- высокая температура сгорания, что ведет к тепловой напряженности ДВС и снижению его ресурса, повышается вероятность отказов;
- снижение мощности на 15–20% при удержании других параметров в пределах нормы.

С данными проблемами столкнулись все, кто пытался использовать под водород обычный бензиновый двигатель, из чего сделан вывод о необходимости проектирования двигателя, специально предназначенного для работы с водородом. Поэтому все дальнейшие разработки основывались на водородных топливных элементах. В СССР и Российской Федерации, не испытывавших дефицита традиционных видов топлива, до последнего времени водород считался перспективным там, где без него не обойтись.

Так, одной из проблем является обеспечение электроснабжения в тоннелях, где из-за большого количества выбросов нельзя применять дизель-генераторы, а питать путейский инструмент необходимо. РКК «Энергия» совместно с ВНИИЖТ разработала вагон-электростанцию с силовой установкой на основе водородных топливных элементов. Данный вагон ЭВТЭ-1 предназначен именно для питания путейского электроинструмента при работе в тоннелях (рис. 21). В РФ ведутся работы по созданию гибридного поезда с топливными элементами под водородное топливо.

### Заключение

Силовая установка на основе водородных ТЭ лучше подходит для маневрового локомотива или моторвагонного поезда. Использование  $H_2$  для магистрального локомотива затруднено из-за малой плот-

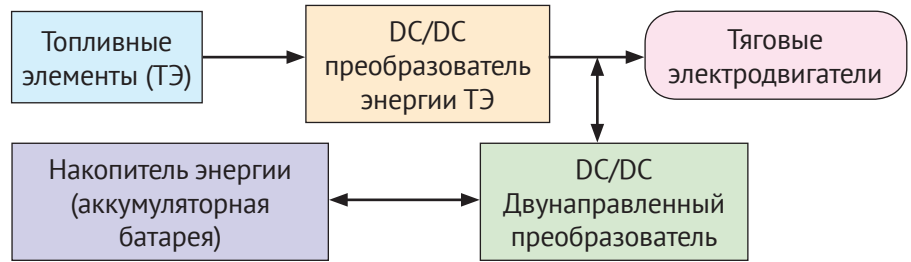


Рис. 22. Энергетическая цепь перспективного подвижного состава

ности энергии в существующих системах хранения. Особенности работы силовой установки и перечисленного ПС позволяют получить наибольший эффект при использовании гибридной схемы с накопителями энергии на основе АКБ.

Наилучшие показатели имеет тяговый ПС, энергетическая цепь которого показана на рис. 22.

В плане тяговой силы наибольшие преимущества могут быть получены для пригородного движения. На маневровом локомотиве она уменьшается из-за малой массы силовой установки, поэтому может потребоваться балластировка. Эффект от рекуперации будет незначителен из-за малых скоростей движения при маневровой работе.

Наибольший эффект может быть достигнут при применении силовой установки с ТЭ на пригородных и междугородных моторвагонных поездах [8–12, 13].

### Источники

1. Agreement signed for Britain's first new hydrogen train // IRJ. International Railway Journal. URL: <https://www.railjournal.com/fleet/agreement-signed-for-britains-first-new-hydrogen-train/> (дата обращения: 11.02.2025).
2. Hydrogen: how realistic is it for rail traction? // IRJ. International Railway Journal. URL: [https://www.railjournal.com/in\\_depth/hydrogen-how-realistic-is-it-for-rail-traction/](https://www.railjournal.com/in_depth/hydrogen-how-realistic-is-it-for-rail-traction/) (дата обращения: 11.02.2025).
3. Accelerated Testing Validation – DOE Hydrogen and Fuel Cells Program FY 2013 Annual Program. URL: [https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/progress13/v\\_d\\_3\\_mukundan\\_2013.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/progress13/v_d_3_mukundan_2013.pdf) (дата обращения: 11.02.2025).
4. Miller A. R., Barnes D. L. Advanced underground vehicle power and control Fuel cell mine locomotive // Proceedings of the 2002 U.S. DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-610–32405. URL: <https://docs.nrel.gov/docs/fy02osti/32405a30.pdf> (дата обращения: 11.02.2025).
5. Alter L. There Are More Colors of Hydrogen

Than Green, Blue, and Gray-Meet Brown, Turquoise, and Purple. Treehugger, Sustainability for All. URL: <https://www.treehugger.com/more-colors-of-hydrogen-brown-turquoise-purple-5218320> (дата обращения: 11.02.2025).

6. Berger R. Study On The Use Of Fuel Cells & Hydrogen In The Railway Environment. Report 1. State of the art & business case and market potential // Europe's Rail. URL: <https://rail-research.europa.eu/publications/study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment/> (дата обращения: 20.03.2025).
7. Arcos J. M. M., Santos D. M. F. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production // Gases. 2023. № 3(1). P. 25–46. DOI: 10.3390/gases3010002.
8. Коровин Н. В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Издательский дом МЭИ, 2005. 280 с.
9. East J. R. Hitachi and Toyota to Develop Hybrid (Fuel Cell) Railway Vehicles Powered by Hydrogen. URL: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/33954855.html> (дата обращения: 11.02.2025).
10. Голокок Д. А., Карпова Н. С., Ким К. К., Иванов С. Н. Анализ влияния конструктивных факторов на надежность герметичных электромеханических преобразователей // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2013. Т. 1. № 4(16). С. 29–34.
11. Бильцева В. Д., Изварин М. Ю., Ким К. К. Системы автономного хода городского электрического транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 300–319. DOI: 10.17816/transysyst634812. EDN: SONMKY.
12. Богославский А. Е. Водородное топливо. Перспективы применения на подвижном составе // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 6(85). С. 40–45. EDN: PCBCTY.
13. Italy's first hydrogen train on test // IRJ. International Railway Journal. URL: <https://www.railjournal.com/technology/italys-first-hydrogen-train-on-test/> (дата обращения: 11.02.2025).