

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*В.О. Сайданов, д.т.н., профессор
ВИ(ИТ) ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулева
И.К. Ландграф, зам. директора–гл. конструктор
М.А. Касаткин, нач. отдела*

Филиал ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Рассмотрены основные типы топливных элементов и энергоустановки на их основе, преимущества таких энергоустановок перед другими источниками энергии, а также области их применения в энергетике и на транспорте. Выполнен анализ результатов НИОКР, проведенных филиалом ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в 1990–2016 гг. по созданию топливных элементов с твердополимерным и твердооксидным электролитом и энергоустановок на их базе, в том числе в комбинации с ДВС, оборудованным системой утилизации теплоты.

Одним из перспективных направлений развития энергетики, обеспечивающим экономию топливно-энергетических и сырьевых ресурсов, радикальное снижение загрязнения окружающей среды является разработка и использование прямых методов преобразования химической энергии топлива в электрическую.

Процессы прямого преобразования химической энергии в электрическую и наоборот осуществляются в электрохимических элементах. Простейший электрохимический элемент (ячейка) состоит из двух электродов — проводников первого рода, разделенных проводником второго рода (ионным проводником или электролитом). На границе между этими проводниками возникает скачок потенциала, называемый электродным потенциалом. На электродах протекают реакции окисления восстановителя (на анодах) и восстановления окислителя (на катодах).

Топливный элемент (ТЭ) — одна из разновидностей электрохимических элементов, существенным преимуществом которого является то, что, в отличие от гальванических (первичных) элементов и аккумуляторов, электроды в ТЭ в процессе выработки электрической энергии не изменяются, так как химические реагенты (топливо и окислитель) в их состав не входят, а подаются в ТЭ извне в момент его работы.

Таким образом, схема обеспечения реагентами ТЭ подобна схемам топливоснабжения тепловых

машин, однако в них достигается более высокий КПД за счет прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую.

История топливных элементов отсылает нас к 30-м годам XIX века, когда первый водородный топливный элемент был сконструирован англичанином Уильямом Р. Гроувом в 1839 г. (намного раньше первого двигателя внутреннего сгорания бельгийца Жана Этьена Ленуара — в 1860 г.). Сам термин «топливный элемент» (Fuel Cell) появился позднее — он был предложен в 1889 г. Людвигом Мондом и Чарльзом Лангером.

Разработанные ТЭ классифицируются по типу ионного проводника (электролита). В табл. 1 представлены основные типы и характеристики ТЭ, получившие практическое применение.

ТЭ вырабатывает постоянный электрический ток только при подключении внешней нагрузки. Напряжение ТЭ обычно не превышает 1 В, при этом плотность тока может достигать значений 1 А/см² и более, сила тока зависит от площади ТЭ. Поэтому для увеличения напряжения отдельные элементы соединяют в батареи ТЭ, которые, объединяют в электрохимический генератор (ЭХГ). Для постоянного получения электроэнергии при постоянно подключенной внешней нагрузке необходимо непрерывно подводить в батарею ТЭ окислитель и топливо, выводить из батареи продукты реакции, поддерживать постоянную температуру и т. п. Поэтому реальная выработка электрической энергии и теплоты осуществляется в ЭХГ (рис. 1) и энергоустановках (ЭЭУ).

Электрохимический генератор (ЭХГ) — это энергоустановка, состоящая из батареи ТЭ, систем хранения и подачи топлива и окислителя, отвода продуктов реакции и теплоты. ЭХГ входит в состав электрохимической энергетической установки (рис. 2) [8].

Электрохимическая энергоустановка (ЭЭУ) предназначена для выработки электрической энергии и теплоты. Она включает в себя ЭХГ, устройства для преобразования напряжения и тока (например, инвертор) и систему утилизации теплоты, генерируемой в ТЭ, например, для теплофикации (низкопотенциальная теплота)

Основные типы топливных элементов и их характеристики

Характеристики	Типы топливных элементов				
	Щелочные (ЩТЭ)	Твердополимерные (ТПТЭ)	Фосфорнокислые (ТЭФК)	С расплавленными карбонатами (ТЭРК)	Твердоокисные (ТОТЭ)
Наименование	Щелочные (ЩТЭ)	Твердополимерные (ТПТЭ)	Фосфорнокислые (ТЭФК)	С расплавленными карбонатами (ТЭРК)	Твердоокисные (ТОТЭ)
Электролит	Водный раствор КОН	Полимерная мембрана	H_3PO_4 высокой концентрации	Расплавы Li_2CO_3 , K_2CO_3	Твердый (ZrO_2), стабилизированный (Y_2O_3)
Рабочая температура, °С	60–90	50–80	180–220	500–700	800–1000
Топливо	Особо чистый водород	Чистый водород	Очищенный водород	Водородосодержащий газ	Водородосодержащий газ
Окислитель	Чистый кислород	Чистый кислород или атмосферный воздух	Атмосферный воздух	Атмосферный воздух	Атмосферный воздух
Коэффициент полезного действия (электрическая энергия), %	50–65	50–60	30–55	50–60	60–70
Коэффициент использования топлива (электричество + теплота), %	80	80	85	80	95

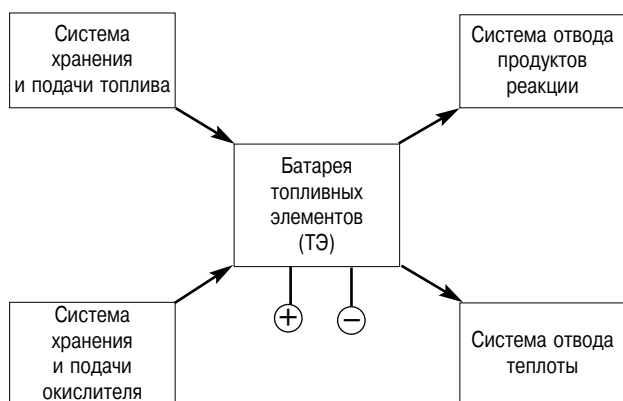


Рис. 1. Структурная схема электрохимического генератора

или получения электрической энергии (высокопотенциальная теплота) в паровой или газовой турбине (в комбинированном цикле).

ЭЭУ на основе ТЭ по сравнению с энергетическими установками других типов обладают преимуществами, основные из которых:

- высокая эффективность (экономичность), в том числе за счет полной совместимости нагрузки и генерации на всех эксплуатационных режимах;

- высокая маневренность на переходных режимах;

- экологическая чистота (полное отсутствие вредных выбросов при работе ЭХГ);

- способность работы без связи с атмосферой (для специальных применений);

- бесшумность работы.

Основными недостатками ЭЭУ с ТЭ являются:

- относительно высокая стоимость (из-за высокой стоимости материалов и комплектующих, эксклюзивно производимых ограниченным количеством зарубежных компаний и использования драгоценных и редкоземельных металлов);

- ухудшение вольтамперных характеристик в процессе длительной эксплуатации.

Отмеченные достоинства ЭЭУ с ТЭ делают их использование на объектах стационарной энергетики и транспорта весьма перспективным. На сегодняшний день существует, как минимум, пять направлений использования ЭЭУ:

- постоянно действующие, резервные и аварийные электростанции;

- главные и вспомогательные энергетические установки неатомных подводных лодок (НАПЛ);

- энергетические установки автомобильного и железнодорожного транспорта;

- энергетические установки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);

- вспомогательные энергетические установки воздушных и космических аппаратов.

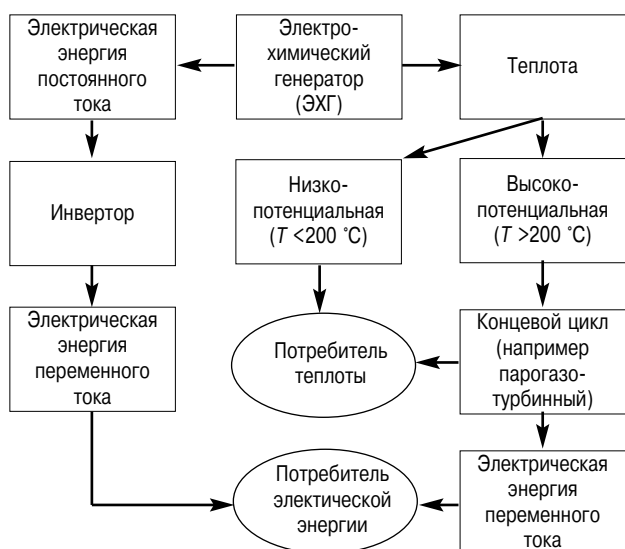


Рис. 2. Структурная схема электрохимической энергетической установки

При подготовке настоящей статьи рассмотрено состояние разработок ЭЭУ с ТЭ несколькими десятками компаний, включая «Ballard Power System» (www.ballard.com), «Dais-Analitic» (www.dais-analytic.com), «Fuji Electric» (www.fujielectric.co.jp), «H Power Hydrogenics» (www.hydrogenics.com), «Ida Tech» (www.idatech.com), «Matsuchita Electric Industrial Co» (www.panasonic.co.jp), «Nu Elements Inc» (www.nuelement.com), «Nuvera» (www.nuvera.com), «Phocos» (www.phocos.com), «Plug Power Inc.» (www.plugpower.com), «Proton Energy Systems» (www.protonenergy.com), «Sanyo Electric Co» (www.global-sanyo.com), «Schatz Energy Research Center», «Toshiba International Fuel Corp.» (www.toshiba.co.jp), «Toyota» (www.toyota.com), «UTC Fuel Cell» (www.utcfuelcells.com) и т. д.

Как показывает анализ, основные разработки в данной области энергетики сосредоточены в трех регионах планеты — Северная Америка (США, Канада), Западная Европа (Германия, Италия, Великобритания, Финляндия и др.), Юго-Восточная Азия (Япония, Южная Корея, Китай). При этом, если Япония практически целиком сосредоточила усилия на разработке электротеплогенераторов (ЭТГ) для бытового применения, так называемые Home Fuel Cells, то в Европе и особенно в США практически одинаковое внимание уделяется разработкам стационарных и транспортных ЭЭУ с ТЭ. Сегодня в мире эксплуатируются тысячи опытных ЭЭУ с ТЭ различной мощности и назначения.

В России разработкой ЭЭУ на ТЭ занимаются следующие научно-исследовательские институты и промышленные предприятия: ИФТТ РАН (г. Черноголовка), ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» (Москва), филиал ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (Санкт-Петербург), ИВТЭ УрО РАН (Екатеринбург), ООО «ИнЭнерджи» (Москва), ООО «Эй Ти Энерджи» (Москва).

Наибольших практических результатов по созданию действующих образцов ЭЭУ с ТЭ в России добились специалисты направления водородной энергетики филиала ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Филиал ЦНИИ СЭТ — многопрофильный специализированный научно-производственный центр, выполняющий наукоемкие научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы в области создания судового электротехнического оборудования, в том числе с полным циклом создания новой техники «под ключ»: от научной идеи до монтажа на объекте.

ЦНИИ СЭТ был образован в 1965 г. на базе ЦКБ-55 для выполнения базовых функций по всем видам судового электрооборудования и разработке технических заданий на создание электротехни-

ческого оборудования для отечественного судостроения. Вошел в состав Крыловского государственного научного центра в 2012 г.

Направление водородной энергетики филиала ЦНИИ СЭТ имеет многолетний опыт создания энергоустановок на основе топливных элементов (ЭУ с ТЭ), в том числе специального назначения, располагает модернизированной опытно-производственной и испытательной базами и значительным научно-техническим заделом в области водородной энергетики.

Несмотря на то, что к настоящему времени разработано большое число различных типов ТЭ, практический интерес для стационарной энергетики и транспорта представляют в основном:

- низкотемпературные топливные элементы с твердополимерной (протонообменной) мембраной (ТПТЭ);

- высокотемпературные топливные элементы с твердооксидным керамическим электролитом (ТОТЭ).

В 2004–2005 гг. филиалом ЦНИИ СЭТ были разработаны ЭЭУ с ТПТЭ для резервного электроснабжения потребителей мощностью 5 кВт и ЭЭУ для совместной выработки электрической энергии и теплоты электрической мощностью 5 кВт и тепловой мощностью 7 кВт (рис. 3). Последняя установка использует в качестве топлива природный газ, а в качестве окислителя атмосферный воздух. При этом природный газ для получения водорода подвергают паровой конверсии при температуре 600–650 °С в топливном процессоре согласно термохимической реакции:



В 2006 г. по заказу Федерального агентства по науке и инновациям, в рамках Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002–2006 годы» (направление «Энергетика и энергосбережение»), ФГУП ЦНИИ СЭТ совместно с ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» был разработан, создан и испытан опытный образец блочно-модульной ЭЭУ на с ТПТЭ и системы получения водорода методом конверсии углеводородного топлива мощностью 10 кВт.

В рамках ФЦП «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 годы» в 2011 г. завершен проект «Разработка технологии создания гибридной судовой энергетической установки мощностью от 250 до 2500 кВт на основе высокоманевренного низкотемпературного ЭХГ с ТПТЭ».

Гибридные ЭУ с ТПТЭ предназначены, прежде всего, для оснащения перспективных типов судов, работающих в условиях Крайнего Севера и обеспечивающих разведку, добычу и транспортировку нефти и газа.

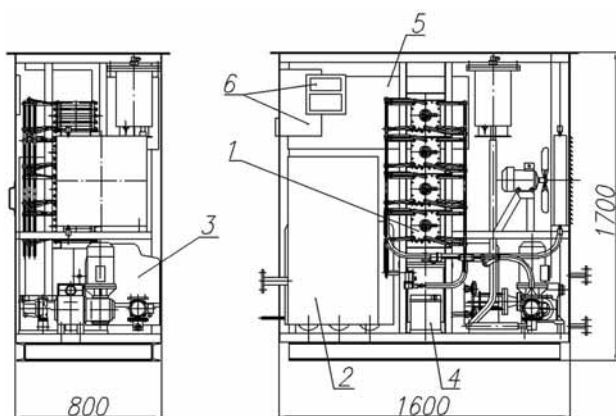


Рис. 3. Электрохимическая энергетическая установка для совместной выработки электрической энергии и теплоты: 1 — батарея топливных элементов; 2 — топливный процессор; 3 — нагнетатель воздуха; 4 — аккумуляторная батарея; 5 — преобразователь напряжения; 6 — система управления

На рис. 4 представлена структурная схема, а на рис. 5 — демонстрационный образец модуля гибридной судовой энергоустановки мощностью 60 кВт на основе высокоманевренного низкотемпературного ЭХГ с ТПТЭ (МГЭУ-60).

Демонстрационный образец модуля гибридной судовой энергоустановки мощностью 60 кВт разработан для реализации в качестве базового конструктивно-технологического решения при создании типоряда гибридных (комбинированных) судовых энергетических установок, работающих на углеводородном топливе.

Данное конструктивно-технологическое решение ЭХГ основано на реализации:

- технологии изготовления ТПТЭ;
- технологии получения водорода из различных углеводородных топлив.

Для пояснения первой технологии следует рассмотреть схему устройства ТПТЭ (рис. 6).

ТПТЭ представляет собой систему, состоящую из тонкой полимерной мембраны, способной

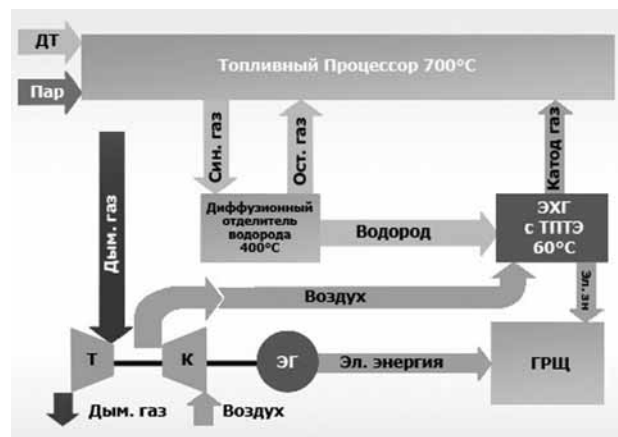


Рис. 4. Структурная схема гибридной ЭУ с ТПТЭ

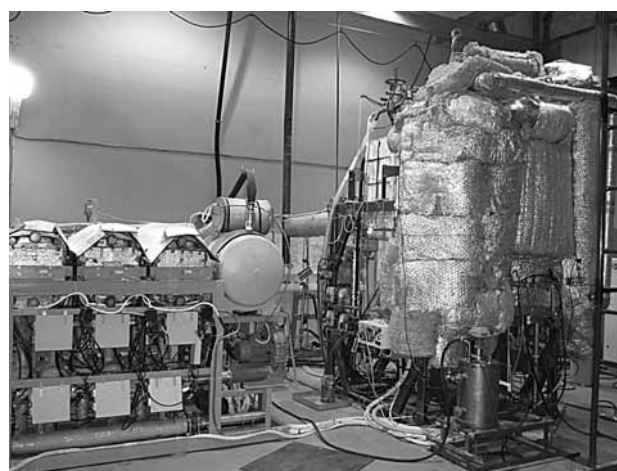


Рис. 5. Демонстрационный образец модуля гибридной судовой энергоустановки МГЭУ-60

проводить протоны, и не пропускающей топливо и окислитель. На мембрану с обеих сторон нанесен слой катализатора (платины), который находится в контакте с пористым волокнистым материалом, обладающим высокой электронной проводимостью — газодиффузионным слоем (ГДС), осуществляющим подвод газообразных реагентов к протонопроводящей мембране, и отвод продуктов электрохимической реакции, т. е. воды, а также для осуществления токосъема. Такая конструкция — мембрана, катализатор, ГДС — носит название мембранно-электродного блока (МЭБ) (рис. 7).

Для подвода реагентов ко всей поверхности газодиффузионных слоев, а также эффективного отвода образующейся воды, которая в противном случае может блокировать («затопить») поры газодиффузионного слоя используется биполярная холодильная камера.

Батарея топливных элементов состоит из пакета последовательно собранных мембранно-электродных блоков (МЭБ) и биполярных холодильных камер (БХК), сжатых через уплот-

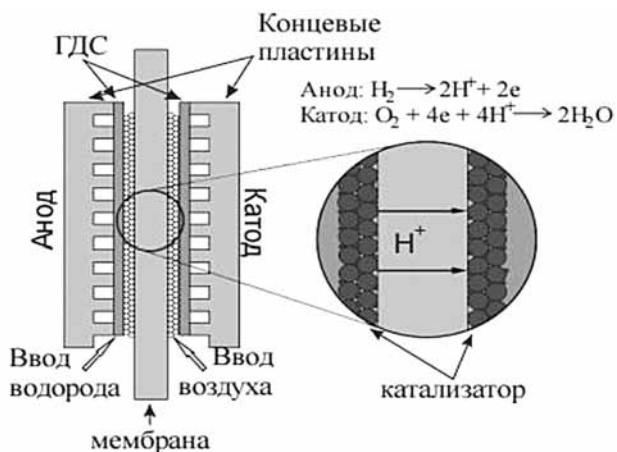


Рис. 6 Схема устройства ТПТЭ

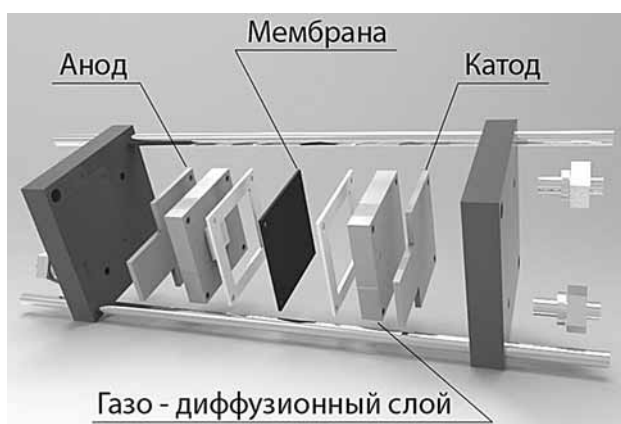


Рис. 7. Схема мембранно-электродного блока

нительные элементы силовыми пластинами, снабженными токосъемными элементами и устройством для отвода теплоты электрохимической реакции.

Филиал ЦНИИ СЭТ имеет уникальное оборудование для изготовления на базе отечественных полимерных мембран МФ-4СК мембранно-электродных блоков ТПТЭ собственной разработки (совместно с ФГУ РНЦ «Курчатовский институт»). При этом используется технология напыления каталитического слоя Pt/C на мембрану «принтерным» методом с последующим «припеканием» газодиффузионных слоев методом термопрессования [3]. В настоящее время предприятием освоено производство двух типоразмеров ТПТЭ: первый на базе МЭБ с активной поверхностью 330 см² (рис. 8, а), второй — на базе МЭБ с активной поверхностью 1225 см² (рис. 8, б). Первый типоразмер ТПТЭ положен в основу батареи ТЭ номинальной мощности 5 кВт (рис. 9, а), второй — соот-

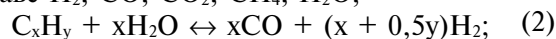
ветственно номинальной мощности 50 кВт (рис. 9, б). В табл. 2 представлены основные характеристики батарей ТЭ [3].

В 2015 г. на специальном стенде состоялись испытания опытного образца батареи БТЭ-50К в условиях, имитирующих условия эксплуатации (рис. 10). На БТЭ-50К оформлен паспорт экспортного облика и рекламный паспорт. В июне 2017 г. работа БТЭ-50К была продемонстрирована индийской делегации.

Разработанная технология и технические решения изготовления ТПТЭ защищены патентами РФ на изобретения и полезные модели [13, 14, 16], часть из них являются «ноу-хау» предприятия и охраняются режимом коммерческой тайны.

Функционирование ЭХГ с ТПТЭ обеспечивается тем, что для получения водорода используется технология паровой конверсии различных углеводородных топлив (природный газ и дизельное топливо) [8]. В основе технологии лежит известный промышленный процесс риформинга углеводородного топлива, который включает в себя две или три стадии:

➤ паровая конверсия углеводородного топлива в синтез-газ — газовую смесь, содержащую в своем составе H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O;



➤ паровая конверсия оксида углерода, образовавшегося на предыдущей стадии паровой конверсии углеводородного топлива (стадия исключается при мембранном способе разделения синтез-газа);

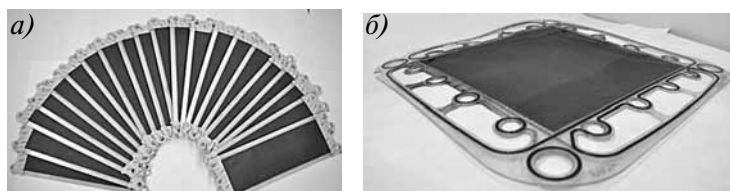
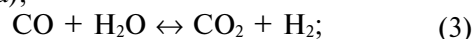


Рис. 8. Мембранно-электродные блоки ТПТЭ:

а — с активной поверхностью 330 см²;

б — с активной поверхностью 1225 см²

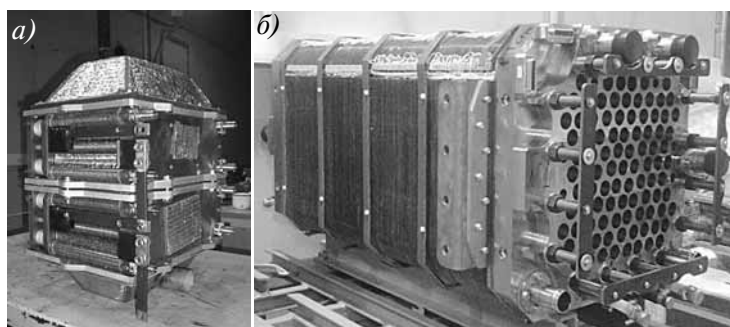


Рис. 9. Водородо-воздушные батареи ТПТЭ:

а — номинальной мощностью 5 кВт (БТЭ-П);

б — номинальной мощностью 50 кВт (БТЭ-50В)

Таблица 2

Характеристики батарей ТПТЭ

Наименование параметра, единица измерения	Марки батарей	
	БТЭ-П	БТЭ-50В
Максимальная мощность, кВт	11	80
Номинальная мощность, кВт	5	50
Площадь активной поверхности МЭБ, см ²	330	1225
КПД, %	60	60
Напряжение на номинальной мощности, В	54	115
Количество ТЭ *2×42), шт.	84	180
Габаритные размеры, мм	380×420×750	1180×536×536
Масса, кг	100	710
Рабочая температура, °С	(+1)–(+50)	(+1)–(+50)
Рабочее давление (избыточное) водорода (синтез-газа), МПа	0,04	0,1

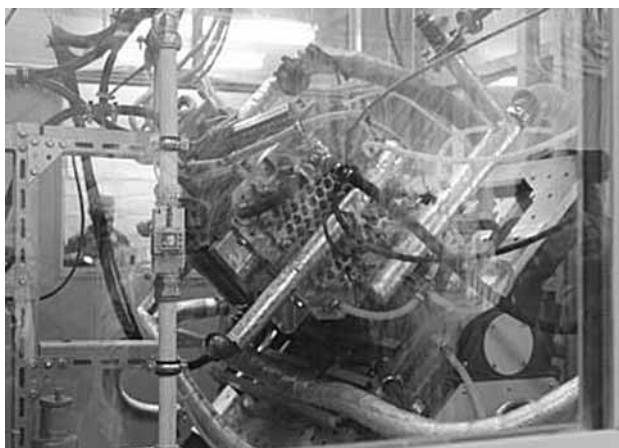


Рис. 10. Государственные приемочные испытания опытного образца водородо-кислородной батареи БТЭ-50В в условиях, имитирующих эксплуатационные

➤ тонкая очистка и разделение синтез-газа с выделением чистого водорода.

Существуют различные методы разделения и очистки газов: изменение агрегатного состояния, абсорбционные и адсорбционные; химические; мембранные (с использованием полимерной или металлической мембраны) [6].

Широкое применение для разделения газов находят селективные мембраны, в частности полимерные. Наиболее чистый водород можно получить при использовании мембран диффузионных отделителей водорода (ДОВ), изготавливаемых из сплавов палладия.

Несмотря на высокую стоимость палладиевых мембран, внедрение этой передовой технологии в практику создания энергоустановок с ЭХГ представляет значительный интерес, так как ее реализация одновременно обеспечивает и увеличение ресурса низкотемпературных ТЭ за счет получения высокой степени чистоты водорода

(не менее 99,999 %), и повышение эффективности риформинга используемого углеводородного топлива по показателям конверсии, выходу чистого водорода, массогабаритным характеристикам оборудования и термическому КПД.

Филиалом ЦНИИ СЭТ еще в 2004 г. была предложена одностадийная схема осуществления процесса конверсии углеводородного топлива с отбором водорода непосредственно из зоны реакции, что конструктивно обеспечивается за счет интеграции мембран ДОВ в каталитическую зону конвертора [2]. Организация вывода водорода непосредственно из зоны реакции позволяет повысить КПД конверсии до 0,8 (против 0,6 при других способах) либо снизить температуру процесса до 600–650 °С (против 750–850 °С при других способах), что позволяет использовать недорогие конструкционные материалы, снижает стоимость и повышает надежность конструкции.

Для реализации данной технологии в 2015 г. был создан и испытан топливный процессор, обеспечивающий эффективное преобразование органического топлива в водородосодержащий синтез-газ, включая диффузионный отделитель водорода, обеспечивающий выделение химически чистого водорода из синтез-газа. На рис. 11 представлена принципиальная схема, на рис.12 — конструкция, а в табл. 3 — основные характеристики моноблочного конвертора [5].

Основным технологическим отличием моноблочного конвертора является использование новой конструкции ДОВ и нового высокопористого проницаемого ячеистого материала (ВПЯМ), примененного в качестве носителя катализатора [5].

Конструкция конверсионного элемента, реализующего одностадийный способ получения водорода с выделением непосредственно из зоны реакции, представляет собой корпус в виде плоского диска диаметром около 180 мм, внутри которого расположены диффузионный отделитель водорода и по обе стороны от него два каталитических диска из ВПЯМ [5].

Таблица 3

Характеристики моноблочного конвертора филиала ЦНИИ СЭТ

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Мощность ЭХГ, обеспечиваемая данным конвертором, кВт	10
Габаритные размеры (диаметр×высота), мм	600×2000
Расход углеводородного топлива, кг/ч	7,58
Температура паротопливной смеси на входе в конвертор, °С	510
Расход остаточного газа, кг/ч	6,98
Выход водорода, кг/ч	0,6

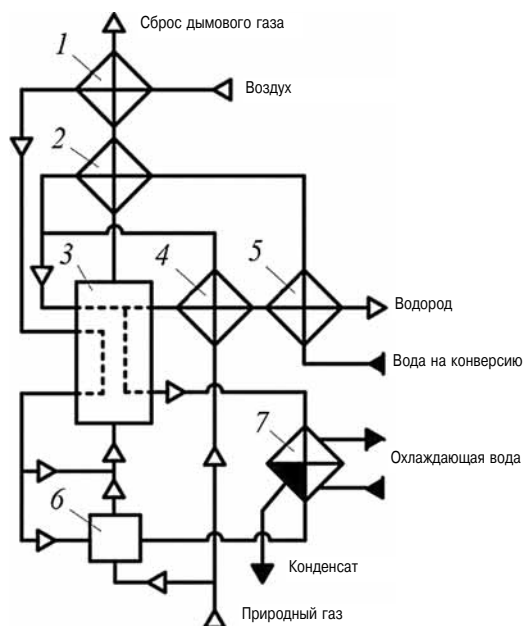


Рис. 11. Принципиальная схема моноблочного конвертора филиала ЦНИИ СЭТ:

1 — подогреватель воздуха; 2 — парогенератор; 3 — термохимический реактор; 4 — подогреватель топлива; 5 — подогреватель воды; 6 — горелочное устройство; 7 — осушитель остаточного синтез-газа

На рис. 13 представлена схема компоновки реакционной зоны конвертора из однотипных конверсионных элементов. В разрабатываемой конструкции конвертора требуемое соответствие водородопроницаемости мембран ДОВ (1) и активности катализатора реакционной зоны достигается путем согласования внешней формы и размеров ДОВ с формой, размерами и размещением каталитических элементов на носителе из ВПЯМ (2) относительно мембран во внутреннем объеме конверсионного элемента (3). Данное техническое решение было разработано филиалом ЦНИИ СЭТ при участии ИК СО РАН им. Г.К. Борескова.

Разработанная технология и технические решения конверсии углеводородного топлива с отбором водорода непосредственно из зоны реакции защищены патентами РФ на изобретения и полезные модели [15], часть из них являются «ноу-хау» фирмы и охраняются режимом коммерческой тайны.

В настоящее время в промышленно развитых странах мира проходят опытную эксплуатацию экономичные (коэффициент использования топлива — более 80 %) ЭЭУ с ЭХГ на основе топливных элементов с твердооксидным электролитом (ТОТЭ) [7, 18].

Большой интерес к разработке ЭЭУ данного типа не случаен и объясняется их основными достоинствами: использование неплатиновых ката-

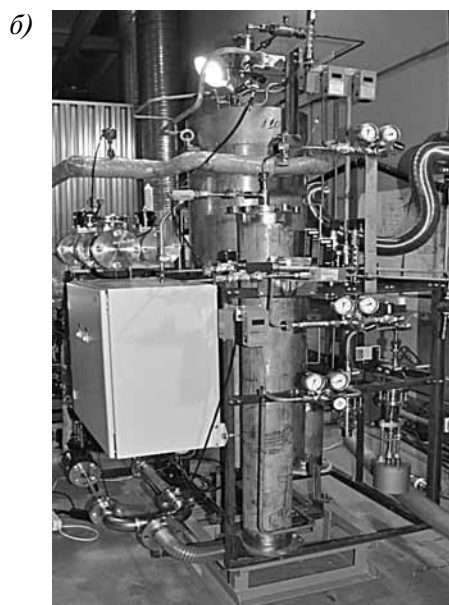
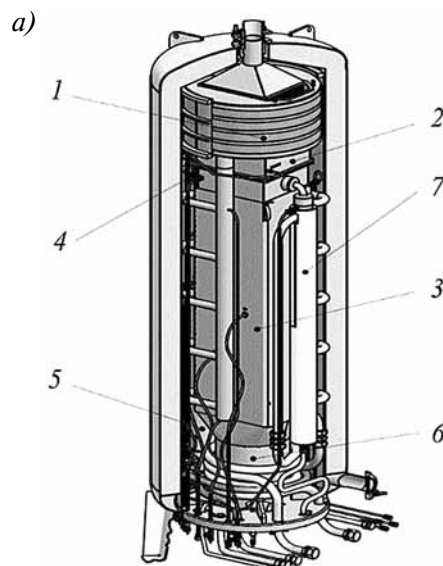


Рис. 12. Моноблочный конвертор филиала ЦНИИ СЭТ:

а — конструкция; б — конвертор в составе энергоустановки на экспериментальном стенде (все обозначения соответствуют рис. 11)

лизаторов, а также водородосодержащих газов в качестве топлива, в том числе полученных в результате газификации углей, отсутствие фазовых превращений твердого электролита и т. п.

В ТОТЭ наряду с электроэнергией, генерируется высокопотенциальная теплота, которую можно использовать в газовой турбине.

ТОТЭ отличаются простотой конструкции и функционируют при очень высоких температурах 800–1000 °С. Такие высокие температуры позволяют использовать относительно «грязное», неочищенное топливо. В качестве топлива могут применяться природный и синтетические водородосодержащие газы.

В отличие от ТПТЭ, электроды ТОТЭ не содержат драгоценных металлов. Анод, катод и электролит ТОТЭ изготовлены из специальных сортов керамики. Наиболее часто в качестве электролита используется смесь диоксида циркония и оксида иттрия, но могут использоваться и другие оксиды. Электролит образует кристаллическую решетку, покрытую с обеих сторон пористым электродным материалом. Конструктивно такие элементы выполняются в виде трубок или плоских плат, что позволяет при их изготовлении использовать технологии, широко применяемые в электронной промышленности.

В России работы по созданию ЭХГ на основе ТОТЭ начались еще в 1991 г., когда была создана научно-производственная кооперация предприятий под руководством ОАО «Специальное конструкторское бюро котлостроения (СКБК)» (в последствии вошло в состав ФГУП ЦНИИ СЭТ) в составе предприятий Уральского региона, в том числе Института высокотемпературной электрохимии (ИВТЭ УрО РАН) — основоположника разработок ТОТЭ в России.

В ходе работ, совместно с ИВТЭ УрО РАН, была создана новая отечественная тонкопленочная технология изготовления ТОТЭ трубчатой конструкции, с помощью которой выполнен макетный образец батареи ТОТЭ мощностью 1 кВт,

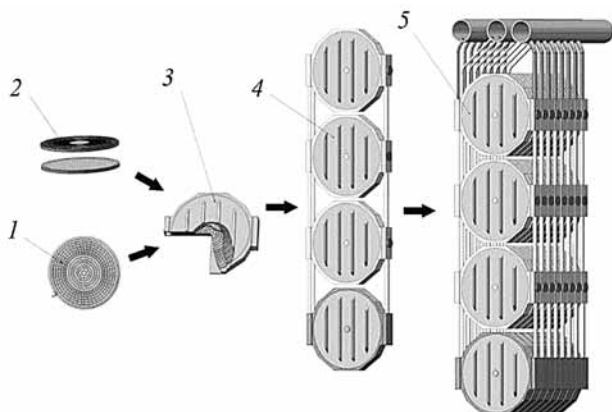


Рис. 13. Схема компоновки реакционной зоны конвертора: 1 — диффузионный отделитель водорода (ДОВ); 2 — каталитический элемент на носителе из высокопористого проницаемого ячеистого материала (ВПЯМ); 3 — конверсионный элемент; 4 — конверсионная секция; 5 — конверсионная система

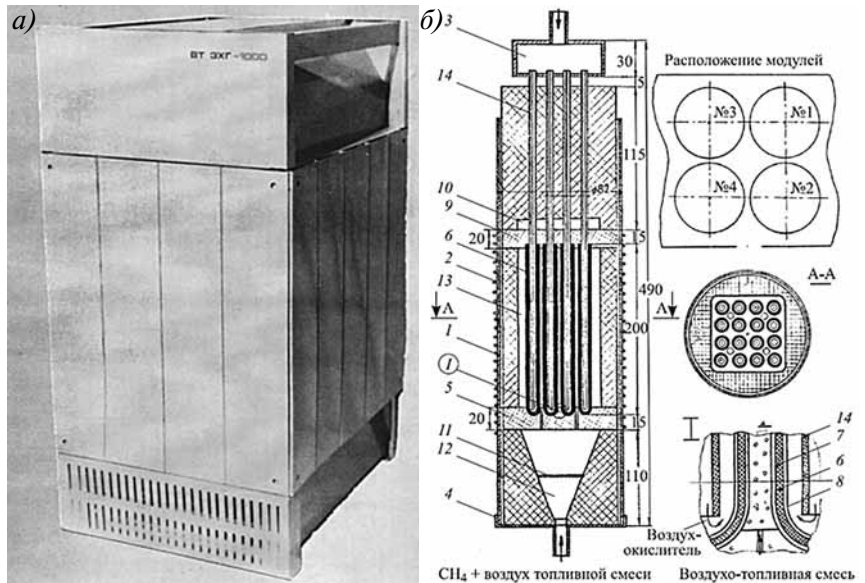


Рис. 14. Макетный образец батареи ТОТЭ мощностью 1 кВт:

а — внешний вид; б — эскиз основных элементов модуля; 1 — корпус; 2 — стартовый нагреватель; 3 — коллектор воздуха-окислителя; 4 — пробка; 5 — решетка; 6 — несущий электролит; 7 — топливный электрод (анод); 8 — воздушный электрод (катод); 9 — газоразделительная решетка; 10 — камера дожигания; 11 — решетка для катализатора конверсии; 12 — зона ввода топливной смеси; 13 — рабочая зона; 14 — трубки подвода воздуха-окислителя

Таблица 4

Характеристики макетного образца батареи ТОТЭ, мощностью 1 кВт

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Расход метановоздушной смеси (на 1 модуль), нл/ч	340
Давление метановоздушной смеси, мм вод.ст.	10–20
Расход воздуха-окислителя (на 1 модуль), нл/ч	2000
Давление воздуха-окислителя, мм вод.ст.	10–40
Температура уходящих газов, °С	150–200
Объем катализатора ГИАП-18 (на 1 модуль), см ³	170
Масса сборки из 4-х модулей, кг	60
Электрический КПД, %	43
Время пуска, ч	8

прошедший всесторонние испытания на стенде ОАО СКБК. На рис. 14 представлен внешний вид и эскиз основных элементов модернизированного макетного образца батареи ТОТЭ, состоящей из 4-х модулей, суммарной мощностью 1 кВт, а в табл. 4 — его основные характеристики [4].

В 1997 г. ОАО СКБК под руководством главного конструктора энергоустановок на топливных элементах В.Б. Авакова разработало принципиально новый тип ЭХГ на основе ТОТЭ с неразделенным газовым пространством, работающих на метановоздушной смеси [2].

Начиная с 2007 г. ситуация с господдержкой разработок ЭЭУ с ТОТЭ коренным образом изменилась. Работы по созданию энергоустановок

на основе ТОТЭ для станций катодной защиты газопроводов, включены в состав Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы». Главной исполнитель комплексного проекта — ФГУП ЦНИИ СЭТ основной исполнитель работ по ЭЭУ с ТОТЭ — РФЯЦ ВНИИТФ (г. Снежинск).

Окончание в следующем номере

Литература

1. Аваков В.Б., Зинин В.И., Ландграф И.К. Автономные энергоустановки на основе высокотемпературных электрохимических генераторов для промышленных и коммунальных объектов // Теплоэнергоэффективные технологии. — 1997. — № 4. — С. 25–29.
2. Аваков В.Б., Ландграф И.К., Кулаков Г.В. и др. Состояние и потенциал развития водородной энергетики // Академия энергетики. — 2008. — № 4. — С. 28–32.
3. Аваков В.Б., Богдановская В.А., Ландграф И.К. и др. Характеристики мембранно-электродных блоков водородо-воздушных топливных элементов с ртсост/с-катализатором // Электрохимия. — М., 2014. Т. 50, № 7. — С. 733.
4. Аваков В.Б., Ландграф И.К., Ковалевский В.П. Экспериментальная стендовая доводка конструкции и эксплуатационных режимов твердооксидного электрохимического генератора мощностью около 1000 Вт // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2014. — Вып. 81 (365). — С. 5–24.
5. Аваков В.Б., Хайров Д.А., Ландграф И.К. и др. Разработка моноблочного конвертора углеводородного топлива с отбором водорода из зоны реакции // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2017. — Вып. 2 (380). — С. 111–120.
6. Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В.А. Корабельные воздухонезависимые энергетические установки. — СПб.: Судостроение, 2006. — 424 с.
7. Ковалевский В.П., Аваков В.Б., Ландграф И.К. Конструкции трубчатых твердооксидных топливных элементов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2014. — Вып. 81 (365). — С. 25–50.
8. Аверьянов В.К., Карасевич А.М., Сайданов В.О. и др. Системы малой энергетики. Современное состояние и перспективы развития. / под ред. Аверьянова В.К. — М.: ИД «Страховое ревю», 2008. Т. 1. — 466 с.
9. Сайданов В.О., Дыбок В.В., Скляренко Е.В. Экспериментальное исследование работы дизеля 6Ч15/18 с системой термохимической обработки топлива по нагрузочной характеристике // Двигателестроение. — 1991. — № 12. — С. 5–6.
10. Сайданов В.О., Агафонов А.Н., Гудзь В.Н. Комбинированные энергоустановки объектов малой энергетики. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. — 262 с.
11. Сайданов В.О., Михайлов А.К., Ландграф И.К. Энергетические установки на базе топливных элементов // Новости электротехники. — 2007. — № 5 (47). — С. 2–5; № 6 (48). — С. 27–29.
12. Патент РФ 2206777 С1 МПК 7 F 02 G 5/00. Способ работы комбинированной энергоустановки для совместной выработки электрической и тепловой энергии / Сайданов В.О., Агафонов А.Н., Аваков В.Б., Ландграф И.К. — Оpubл. 20. 06. 2003. Бюл. № 17.
13. Патент РФ 2328060 С1 МПК H01M 8/00. Топливный элемент и батарея топливных элементов / Аваков В.Б., Кулаков Г.В., Ландграф И.К. и др. — Оpubл. 27. 06. 2008., бюл. № 18.
14. Патент РФ 114808 С1 МПК H01M 8/00. Полномасштабный топливный элемент с твердополимерным электролитом для батарей топливных элементов мощностью около 60 кВт / Аваков В.Б., Кулаков Г.В., Ландграф И.К. и др. — Оpubл. 25. 10. 2011.
15. Патент РФ 152752 С1 МПК G01B 3/34. Конвертор паровой органического топлива на базе нежаростойких конструкционных материалов со сниженными потерями энергии с уходящими газами / Аваков В.Б., Ландграф И.К., Хайров Д.А. и др. — Оpubл. 20. 06. 2015.
16. Патент РФ 154716 С1 МПК H01 M 8/00. Батарея водородовоздушная многосекционная для энергоустановок мегаваттного класса / Аваков В.Б., Ландграф И.К., Хайров Д.А. и др. — Оpubл. 20. 06. 2015.
17. Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Истомин С.Я., Ковалевский В.П., Филиппов С.П. / Стационарные энергетические установки с топливными элементами: Материалы, Технологии, Рынки. — М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации ЕЭЭК, 2017 г.
18. Yoshinori Koboyashi, Yoshima Sa Ando, Tatsuo Kabata, Masanori Nishiura, Kazuo Tomida, Norisha Mataka. Extremely high-efficiency thermal power system-solid oxide fuel cell (SOFC) triple combined-cycle system // Mitsubishi Heavy Industries technical review. — 2011. Vol. 48. — № 3. — P. 9–15.