**Энергетические установки на базе топливных элементов. Перспективы применения**

Алексей Михайлов, д.т.н., профессор, Виктор Сайданов, д.т.н., доцент, Военный инженерно-технический университет, Игорь Ландграф, инженер, ФГУП «ЦНИИ СЭТ» г. Санкт-Петербург

В настоящее время мировая потребность в энергоустановках для децентрализованного энергоснабжения по разным оценкам составляет около 50-100 тыс. единиц в год.

Традиционные газопоршневые, дизельные и газотурбинные установки имеют множество недостатков, главными из которых являются довольно низкий КПД и экологический вред.

В качестве наиболее перспективных энергетических установок для малой энергетики могут быть рассмотрены получающие всё большее распространение в мире установки на основе топливных элементов. О них сегодня рассказывают наши петербургские авторы.

Основными преимуществами установок на основе топливных элементов по сравнению с традиционными по экономическим и потребительским качествам являются:

значительно меньшие выбросы вредных веществ в окружающую среду;

значительно меньшие показатели уровня шума и вибрации;

эффективное использование топлива и высокий КПД;

низкие затраты на эксплуатацию (не требуются замена масла, присутствие оператора);

плавные вольт-амперные характеристики, высокая маневренность и эффективность во всем диапазоне нагрузок.

Физика процесса и определения

Процессы прямого преобразования химической энергии в электрическую и наоборот осуществляются в электрохимических элементах (ячейках).

Простейшая электрохимическая ячейка состоит из двух электродов, разделенных проводником второго рода (ионным проводником или электролитом). Электрод – проводник первого рода, находящийся в контакте с ионным проводником. На границе между этими проводниками возникает скачок потенциала, называемый электродным потенциалом. На электродах протекают реакции окисления восстановителя (на анодах) и восстановления окислителя (на катодах).

Совокупность окислителя, восстановителя и ионного проводника называется электрохимической системой ячейки или элемента.

Топливный элемент (ТЭ) – одна из разновидностей электрохимических элементов, существенным преимуществом которой 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 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 энергию.

ТЭ вырабатывают постоянный электрический ток. Напряжение ТЭ обычно не превышает 1 В, а токи, отбираемые от одного элемента, относительно невелики [1]. Для увеличения напряжения, тока и электрической мощности отдельные ТЭ соединяют между собой в батареи ТЭ.

Для постоянного получения электроэнергии необходимо непрерывно подводить в батарею ТЭ топливо и окислитель, отводить из батареи продукты реакции и теплоту. Поэтому реальная выработка электрической энергии и теплоты осуществляется в электрохимических генераторах и энергоустановках.

Электрохимический генератор (ЭХГ) – это энергоустановка, состоящая из батареи топливных элементов, систем хранения и подачи топлива и окислителя, отвода продуктов реакции и теплоты. На рис.1 представлена упрощенная структурная схема ЭХГ.

Электрохимическая энергоустановка (ЭЭУ) – это установка, предназначенная для выработки электрической энергии и теплоты, включающая в себя ЭХГ, устройства для преобразования напряжения и тока (например, инвертор) и систему утилизации теплоты, генерируемой в ТЭ, например, для теплофикации (низкопотенциальная теплота) или получения электрической энергии (высокопотенциальная теплота) в паровой или газовой турбине (в концевом цикле). На рис. 2 представлена упрощенная структурная схема ЭЭУ.

**Мировая практика**

Как показывает анализ, основные работы в области разработок ЭЭУ с ТЭ сосредоточены в трех регионах планеты: в Северной Америке (США, Канада), Западной Европе (Германия, Италия, Великобритания и др.), Юго-Восточной Азии (Япония, Южная Корея, Китай). Япония практически целиком сосредоточила свои усилия на разработке ЭЭУ с ТЭ для бытового применения, так называемых Homе Fuel Cells. В Европе и особенно в США практически одинаковое внимание уделяют разработкам ЭЭУ для резервного электроснабжения и ЭЭУ для совместной выработки электроэнергии и теплоты.

Сейчас в мире эксплуатируются сотни опытных ЭЭУ с ТЭ единичной мощностью от 0,01 кВт до 1 МВт. Стоимость установленной мощности ЭЭУ с ТЭ составляет 3000–10000 долларов США за 1 кВт. На сегодняшний день ни одна компания не предложила потребителям свою продукцию в промышленном масштабе, однако следует ожидать ее массового появления на рынке начиная с 2010 года. Работы по созданию промышленных ЭЭУ с ТЭ в развитых странах получают всё более широкую государственную поддержку. При этом за рубежом крупные негосударственные компании также вкладывают значительные инвестиции в разработку ЭЭУ.

В России из негосударственных компаний работы по водородной энергетике и ЭЭУ финансирует только Национальная инновационная компания «Новые энергетические проекты» (НИК «НЭП»). Успешное решение сложных задач в области водородной энергетики невозможно без реальной поддержки и участия государства. В этом плане наметилась положительная тенденция. В рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы» и ФЦП «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы на решение этих задач выделяются сотни миллионов рублей.

**Классификация установок**

Классификация ЭЭУ может быть произведена по различным признакам: по назначению, виду ТЭ, виду топлива и окислителя и т.п. Поскольку основой ЭЭУ является батарея топливных элементов, то в литературе [1, 3] принято классифицировать их по видам и типам ТЭ.

Существует ряд признаков, по которым классифицируются ТЭ:

по рабочим температурам (низкотемпературные – до 100 OС, среднетемпературные – до 250 OС, высокотемпературные – до 1000 OС), по типу ионного проводника-электролита (щелочной, кислотный, твердополимерная мембрана, расплавленные карбонаты, твердооксидная керамика), по виду топлива (водород, метанол) и т.п. Несмотря на то, что к настоящему времени разработано большое число различных типов топливных элементов, интерес с точки зрения практического применения представляют лишь несколько типов, а именно:

низкотемпературные топливные элементы со свободным (жидкий раствор КОН) и со связанным (пропитанная водным раствором КОН асбестовая мембрана) щелочным электролитом и топливные элементы с твердополимерной ионообменной (протонопроводящей) мембраной;

среднетемпературные топливные элементы с фосфорно-кислым электролитом (ТЭФК);

высокотемпературные топливные элементы с расплавленным карбонатным электролитом (ТЭРК) и с твердооксидным керамическим электролитом (ТЭТО).

Основные характеристики всех перечисленных типов топливных элементов приведены в табл. 1 [3, 4], которая дает наглядное представление об энергетической эффективности ЭЭУ. Рассмотрим основные типы ЭЭУ с топливными элементами.

**Электрохимические энергоустановки на базе топливных элементов со щелочным электролитом**

Топливные элементы со щелочным электролитом работают при относительно низкой температуре (60–120 OС) и потребляют в качестве топлива и окислителя соответственно водород и кислород высокой чистоты. В качестве окислителя в принципе возможно использование воздуха, очищенного от диоксида углерода и примесей, отравляющих катализатор топливного элемента.

В качестве электролита используется либо непосредственно жидкий раствор КОН, либо матрица, пропитанная раствором электролита (матричный электролит). Токообразующая реакция в водородно-кислородном топливном элементе со щелочным электролитом: 2Н2 + О2 = = 2Н2О. Т.о. единственным продуктом, образующимся при работе ЭХГ, является вода высокой чистоты, которая может быть использована для удовлетворения технологических и бытовых нужд. В 1950–1980-х годах в Англии, Германии, США, Франции и СССР проводились активные исследования и опытно-конструкторские работы по созданию ЭХГ с топливными элементами со свободным и связанным щелочным электролитом (ТЭЩЭ). В качестве электролита применялся раствор КОН, обладающий высокой электрической проводимостью.

Первая батарея ТЭЩЭ мощностью 5 кВт была сконструирована Ф. Беконом в Англии в 1952 году. Она работала при температуре 200 OС и давлении водорода и кислорода 2–4,5 МПа. Из-за высокого давления масса конструкционных материалов была очень велика, а ресурс батареи не превышал нескольких сотен часов [1].

В 1970–1980-х годах английская фирма Varta разработала и испытала несколько ЭЭУ мощностью от 0,1 до 5 кВт, имеющих ресурс около 4000 часов.

Впервые успешная попытка использования ЭЭУ с ЭХГ в качестве источника энергии для подводного аппарата была предпринята в США фирмой United Technologies Corp. (UTC), которая по заказу ВМС США создала в 1974 году ЭЭУ на базе ТЭЩЭ для подводной лодки «Дип квест», спроектированного фирмой «Локхид» [5]. В составе ЭЭУ были использованы водородно-кислородные топливные элементы со щелочным электролитом. Водород и кислород хранились в газообразном состоянии под давлением в стальных сферических емкостях.

Первый позитивный опыт американских фирм послужил толчком к активизации разработок ЭЭУ с ЭХГ в европейских странах, в первую очередь в ФРГ, которые в наибольшей степени заинтересованы в развитии подводных лодок с неатомной энергетикой.

Фирма Siemens в 1980-е годы на базе матричных водородно-кислородных ТЭ разработала транспортные ЭЭУ мощностью 6, 17,5 и 48 кВт, а также ЭЭУ для подводного аппарата мощностью более 300 кВт. ТЭ фирмы Siemens работали при температуре 95 оС, давлении водорода и кислорода 300 кПа и имели ресурс в пределах 10000 часов.

Параллельно с разработкой ЭХГ в Германии в 80-х годах были успешно решены технические вопросы по разработке систем хранения водорода и кислорода на борту подводной лодки. Эти исследовательские и опытно-конструкторские работы были выполнены консорциумом, созданным фирмами Howaldtswerke-deutche Werft AG (HDW), Ferrostaal AG (FS) и Inggenieurcontor Lubek (IKL). Проведенные вариантные проработки систем хранения водорода и кислорода показали, что наиболее приемлемыми вариантами являются: хранение кислорода в криогенном состоянии в специальных емкостях, а водорода – в адсорбированном виде в интерметаллидных (металлогидридных) соединениях [5]. Создание систем хранения водорода и кислорода таких типов представляло собой совершенно новую техническую задачу, так как опыт применения на подводных аппаратах такой техники отсутствовал.

На основании успешных результатов наземных испытаний Федеральное бюро ФРГ по военной технологии (BWB) вынесло решение об установке ЭЭУ с ЭХГ на подводных лодках проекта 205 (U-1). К корпусу была добавлена секция, содержащая энергоустановку с ЭХГ.

В 1988 г. модернизированная лодка сошла со стапелей и успешно прошла ходовые испытания [5].

В 90-х годах немецкие фирмы прекратили разработки корабельных ЭЭУ с ТЭЩЭ и сконцентрировались на создании ЭЭУ на базе ТЭ с твердополимерным электролитом (ТПТЭ).

В СССР (а затем в России) разработкой ЭЭУ с ТЭЩЭ для подводных лодок занималось ленинградско-петербургское ОАО «Специальное конструкторское бюро котлостроения» (СКБК), назначенное правительством в 1978 году головным предприятием страны по ЭЭУ с ЭХГ для морских объектов. До 1986 года было разработано несколько типов энергоустановок с доведением их до макетных и опытных образцов основного оборудования.

В дальнейшем работы по одной из энергоустановок – ЭЭУ «Кристалл-20» с низкотемпературными ТЭ с жидким щелочным электролитом и газобаллонными системами хранения водорода и кислорода под давлением до 40 МПа мощностью 130 кВт были продолжены и завершены в полном объеме в 1991 году, ЭЭУ отработала в стендовых условиях и была сдана Госкомиссии [2, 6]. Продолжением работ ОАО «СКБК» по ЭЭУ явилась разработка энергоустановки с низкотемпературными ТЭ со щелочным матричным электролитом, интерметаллидной системой хранения водорода и криогенной системой хранения кислорода мощностью 300 кВт – ЭЭУ «Кристалл-27» (рис. 3) [2].

Объем выполненных работ по состоянию на конец 2000 года составил около 70%, включая незавершенный технический проект ЭЭУ и значительный объем опытных работ по основным системам и оборудованию ЭЭУ.

В 2002 году на экспериментальной базе ОАО «СКБК» была создана действующая стендовая модель ЭЭУ на базе ТЭ со щелочным матричным электролитом, интерметаллидной системой хранения водорода и криогенной системой хранения кислорода мощностью 25 кВт и проведены демонстрационные испытания, результаты которых позволили рекомендовать разработанную ЭЭУ к использованию в качестве энергоустановки для малой подводной лодки.

ЭЭУ на базе ТЭЩЭ также были разработаны для энергоснабжения пилотируемых космических объектов. В США такие ЭЭУ были созданы фирмой UTC [1], а в России – Уральским электрохимическим комбинатом (УЭХК) совместно с Российской космической корпорацией «Энергия» им. С.П. Королева [1, 7]. Эти ЭЭУ отличаются от корабельных меньшей мощностью, энергоемкостью и ресурсом ТЭ.

Анализ литературных источников свидетельствует о том, что к началу 1990-х годов большинство фирм и исследователей, работавших в области создания ЭЭУ с ЭХГ на базе ТЭЩЭ, эти работы прекратили. Это объясняется следующими причинами: необходимостью использования чистого водорода и кислорода, применения в больших количествах платиновых катализаторов, относительно невысоким ресурсом, сложностью использования низкопотенциальной теплоты, генерируемой в ТЭ, и в конечном счете высокими капитальными затратами (ориентировочная стоимость 1 кВт установленной мощности ЭЭУ составляет более 10000 долларов США).

В последнее время, например в [1], сообщается о возобновлении работ по использованию созданных для космических целей ЭХГ для электромобилей на базе автомобилей «Нива» и «Бычок» (совместные работы УЭХК, РКК «Энергия», ОАО «АвтоВАЗ» и ОАО «ЗИЛ»).

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА БАЗЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ТВЕРДОПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ

В топливных элементах с твердополимерным электролитом (ТПТЭ) ионным проводником является ионообменная мембрана с проводимостью по ионам водорода (протонам).

Впервые ЭХГ с ТПТЭ были разработаны американской фирмой General Electric Co. для космического корабля Geminy. ЭЭУ включала в себя ЭХГ, систему криогенного хранения топлива и окислителя и аккумуляторную батарею. В ЭХГ входили три батареи ТПТЭ мощностью 1,8 кВт и напряжением 25–30 В. Масса батареи была 31 кг, ресурс – 2000 ч.

Позднее наибольших успехов в разработке ЭЭУ с ТПТЭ достигли фирмы UTC совместно с Los-Alamos National Laboratory (США), Вallard Power Sources (Канада), Siemens (Германия) [1].

Так, фирмой Siemens в 1990-х годах была успешно завершена разработка ЭЭУ для подводной лодки U-1 на базе ЭХГ с ТПТЭ. Учитывая положительные результаты натурных испытаний подводной лодки U-1 с такой энергоустановкой, в ФРГ фирмы HDW и Thyssen выполнили проектирование и строительство новых лодок проекта 212. В настоящее время в составе ВМС Германии находятся две подводные лодки проекта 212 с комбинированной энергоустановкой, включающей энергоустановку с ЭХГ, а еще две готовятся к спуску на воду [6].

В 2001–2006 годах фирмы UTC (США), Вallard Power Sources (Канада), Siemens (Германия) создали также опытные образцы стационарных ЭЭУ с ТПТЭ мощностью от одного до сотен киловатт для объектов малой энергетики. Удельная мощность ЭЭУ при длительной нагрузке составляет 100–400 Вт/кг, ресурс – 5000–20000 часов, доля мощности на собственные нужды в зависимости от назначения и режима эксплуатации 10–20 %. Стоимость демонстрационных образцов ЭЭУ составляет по разным оценкам 4000–5000 долларов США. В СССР, а затем в России разработками ЭЭУ с ТПТЭ занимались в УЭХК, в Институте электрохимии РАН, в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (РФЯЦ ВНИИЭФ), в Российском национальном центре «Курчатовский институт», в Московском энергетическом институте (МЭИ), а также в ОАО «СКБК». Наибольших практических результатов по созданию действующих образцов ЭЭУ с ТПТЭ в России добились специалисты направления водородной энергетики ОАО «СКБК» под руководством В.Б. Авакова.

В 2003 г. направление водородной энергетики ОАО «СКБК» вошло в состав ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии» (ФГУП «ЦНИИ СЭТ»).

В настоящее время ФГУП «ЦНИИ СЭТ» является единственной в России организацией, обладающей совместно со сложившейся кооперацией соисполнителей реальным опытом создания и сдачи государственной комиссии ЭЭУ с ЭХГ. Так, в 2004–2005 годах были разработаны аванпроекты ЭЭУ для резервного электроснабжения потребителей мощностью 5 кВт и ЭЭУ для комбинированного электро- и теплоснабжения электрической мощностью 5 кВт и тепловой мощностью 7 кВт [2, 8]. На рис. 4 в качестве примера представлены некоторые проектные решения ФГУП «ЦНИИ СЭТ».

В 2005–2006 годах 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 и создан опытный образец блочно-модульной ЭЭУ с ТПТЭ мощностью 10 кВт, которая в настоящее время проходит испытания на стендах ФГУП «ЦНИИ СЭТ». Ее рабочая температура составляет 30–80 ОС; давление 0,12 МПа, ресурс – 10000 ч. Основой ЭЭУ являются разработанные по новой технологии ФГУП «ЦНИИ СЭТ» при участии ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» водородновоздушные топливные элементы с твердополимерным электролитом.

На рис. 5 представлено конструктивное исполнение батареи топливных элементов. Следует отметить, что в настоящее время ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» обладает значительным научным заделом по технологиям создания ТПТЭ, а между ФГУП «ЦНИИ СЭТ» и ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» существует соглашение о совместных исследованиях в области водородной энергетики, в том числе и по вопросам создания ЭЭУ.

В следующем номере журнала авторы рассмотрят устройство и практическую реализацию проектов ЭЭУ на базе топливных элементов с фосфорно-кислым электролитом, ЭЭУ на базе топливных элементов с расплавленным карбонатным электролитом и ЭЭУ на базе топливных элементов с твердооксидным электролитом.

**Список литературы**

Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 280 с.

Аваков В.Б. Об опыте работ ФГУП «ЦНИИ СЭТ» в области водородной энергетики // Материалы международного форума «Водородные технологии для производства энергии»/ Москва, 6–10 февраля 2006 г.

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.

Аваков В. Б., Зинин В. И., Ландграф И.К. Пути разработки и перспективы создания экономичной экологически чистой энергетики на топливных элементах // Российский химический журнал, т. XXXVIII. – 1994. – № 3. – С. 55–60.

Gunter Sattler. Air Independent Propulsion Systems for Submarines // Naval Forces, 1989, March, p. 71–74.

Аваков В.Б., Зинин В.И. Подводным лодкам XXI века – совершенные энергоустановки // Военный парад. – 1998. – № 5. – С. 26–28.

Худяков С.А. Энергоустановки на основе топливных элементов для пилотируемых космических кораблей // Известия РАН. Энергетика. – 2003. – № 5. – С. 48–60.

Ландграф И.К. Система получения и аккумулирования водорода и генерирования энергии на основе топливных элементов с твердополимерным электролитом как составная часть автономных источников энергоснабжения, использующих возобновляемую энергию ветра // Материалы III международного семинара «Топливные элементы и энергоустановки на их основе»/г. Екатеринбург, 31.01 – 03.02. 2006 г.