

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

---

СБОРНИК  
НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИХ  
МАТЕРИАЛОВ

Книга двадцать вторая



Санкт-Петербург  
2013

В настоящем Сборнике нормативно-методических материалов публикуется информация о принципах действия и перспективах развития и использования энергетических установок на базе топливных элементов.

## СОДЕРЖАНИЕ

Энергетические установки на базе топливных элементов.  
Перспективы применения  
(по материалам, представленным ФГУП «ЦНИИ СЭТ»,  
г. Санкт-Петербург)

	Введение . . . . .	4
1	Физика процесса и определения . . . . .	4
2	Мировая практика. . . . .	5
3	Классификация установок. . . . .	6
4	Электрохимические энергоустановки на базе топливных элементов со щелочным электролитом . . . . .	7
5	Электрохимические энергоустановки на базе топливных элементов с твердополимерным электролитом . . . . .	8
	Список литературы . . . . .	10

## ВВЕДЕНИЕ

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 установки на основе топливных элементов (ТЭ).

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

значительно меньшие выбросы вредных веществ в окружающую среду;

низкие показатели уровня шума и вибрации;

эффективное использование топлива и высокий КПД;

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

плавные вольтамперные характеристики, высокая маневренность и эффективность во всем диапазоне нагрузок.

## 1 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 (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).

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

Топливный элемент (ТЭ) — одна из разновидностей электрохимических элементов. Существенным преимуществом ТЭ 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 ТЭ 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. Для увеличения напряжения, тока и электрической мощности отдельные ТЭ соединяют между собой в батареи.

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) — установка, состоящая из батареи ТЭ, систем хранения и подачи топлива и окислителя, отвода продуктов реакции и теплоты.

Электрохимическая энергоустановка (ЭЭУ) — 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 конечном цикле).

## 2 МИРОВАЯ ПРАКТИКА

Основные работы в области разработок ЭЭУ с ТЭ сосредоточены в трех регионах: 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 *Home 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 0,01 кВт — 1 МВт. Стоимость установленной мощности ЭЭУ

с ТЭ составляет 3000 — 10000 долл. США за 1 кВт. 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»). В рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 — 2012 годы» на решение этих задач выделены сотни миллионов рублей.

### 3 КЛАССИФИКАЦИЯ УСТАНОВОК

Классификация ЭЭУ может быть произведена по различным признакам: назначению, виду ТЭ, виду топлива и окислителя и т.п. Поскольку основой ЭЭУ является батарея ТЭ, то ЭЭУ принято классифицировать по видам и типам ТЭ.

ТЭ классифицируются по следующим признакам:

рабочим температурам (низкотемпературные ТЭ — до 100 °С, среднетемпературные — до 250 °С, высокотемпературные — до 1000 °С);

типу ионного проводника-электролита (щелочной, кислотный, твердополимерная мембрана, расплавленные карбонаты, твердооксидная керамика);

виду топлива (водород, метанол) и т.п.

Несмотря на то, что к настоящему времени разработано большое число различных типов ТЭ, интерес с точки зрения практического применения представляют лишь несколько типов, а именно:

низкотемпературные со свободным (жидкий раствор гидроксида калия — КОН) и со связанным (пропитанная водным раствором КОН асбестовая мембрана) щелочным электролитом;

с твердополимерной ионообменной (протонопроводящей) мембраной; среднетемпературные с фосфорно-кислым электролитом (ТЭФК);

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

#### 4 ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА БАЗЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЩЕЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ

ТЭ с щелочным электролитом работают при относительно низкой температуре (60 — 120 °С) и потребляют в качестве топлива и окислителя соответственно водород и кислород высокой чистоты. В качестве окислителя возможно использование воздуха, очищенного от диоксида углерода и примесей, отравляющих катализатор топливного элемента.

Единственным продуктом, образующимся при работе ЭХГ, является вода высокой чистоты, которая может быть использована для удовлетворения технологических и бытовых нужд. В 1950 — 1980-х гг. 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 г. Она работала при температуре 200 °С 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.

В 1970 — 1980-х гг. английская фирма *Varta* разработала и испытала несколько ЭЭУ мощностью 0,1 — 5 кВт, имеющих ресурс около 4000 ч.

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 г. ЭЭУ на базе ТЭЩЭ для подводной лодки. В составе ЭЭУ были использованы водородно-кислородные ТЭ со щелочным электролитом. Водород и кислород хранились в газообразном состоянии под давлением в стальных сферических емкостях.

В 90-х гг. 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 ОАО «Специальное конструкторское бюро котлостроения» (СКБК), назначенное правительством в 1978 г. головным предприятием страны по ЭЭУ с ЭХГ для морских объектов. До 1986 г. было разработано несколько типов энергоустановок с доведением их до макетных и опытных образцов.

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

## 5 ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА БАЗЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ТВЕРДОПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ

В ТЭ 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.

В 2001 — 2006 гг. фирмы *UTC* (США), *Ballard 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 ч, доля мощности на собственные нужды в зависимости от назначения и режима эксплуатации 10 — 20 %. Стоимость демонстрационных образцов ЭЭУ составляет по разным оценкам 4000 — 5000 долл. США.

В СССР, а затем в России разработками ЭЭУ с ТПТЭ занимались в Институте электрохимии РАН, Российском федеральном ядерном центре — Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (РФЯЦ ВНИИЭФ), Российском национальном центре «Курчатовский институт», Московском энергетическом институте (МЭИ), а также в ОАО «СКБК». Наибольших практических результатов по созданию действующих образцов ЭЭУ с ТПТЭ 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 реальным опытом создания ЭЭУ с ЭХГ. Так, в 2004 — 2005 гг. были разработаны аванпроекты ЭЭУ для резервного электроснабжения потребителей мощностью 5 кВт.

В 2005 — 2006 гг. по заказу Федерального агентства по науке и инновациям, в рамках Федеральной целевой научно-технической программы, в ФГУП «ЦНИИ СЭТ» совместно с ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» был разработан и создан опытный образец блочно-модульной ЭЭУ с ТПТЭ мощностью 10 кВт. Ее рабочая температура составляет 30 — 80 °С, давление 0,12 МПа, ресурс 10000 ч. Основой ЭЭУ являются разработанные по новой технологии ФГУП «ЦНИИ СЭТ» при участии ФГУ РНЦ «Курчатовский институт» водородновоздушные ТЭ с твердополимерным 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.

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.

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

Российский морской регистр судоходства  
**Сборник нормативно-методических материалов**  
**Книга двадцать вторая**

*Редакционная коллегия Регистра*  
Ответственный за выпуск *О. В. Кольшук*  
Главный редактор *М. Р. Маркушина*  
Редактор *Е. Б. Мюллер*  
Компьютерная верстка *И. И. Лазарев*

Подписано в печать 31.01.13. Формат 60 × 84/16. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,5. Тираж 150. Заказ 2449.

Российский морской регистр судоходства  
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8

[www.rs-class.org](http://www.rs-class.org)