

# ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 621.039.546.8:662.769.2

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Гаур Т.А., Машин В.Н.

Учебно-научный институт морского флота  
Одесского национального морского университета

В статье рассматривается вопрос поиска альтернативного вида топлива в противовес традиционным органического происхождения и намечаются пути реализации его на практике в виде топливных элементов. В качестве наиболее перспективных энергетических установок для малой энергетики могут быть рассмотрены получающие все большее распространение в мире установки на основе топливных элементов.

**Ключевые слова:** водородная энергетика, топливный элемент, электролитическая мембрана, электродно-мембранный блок.

**Постановка проблемы.** Одной из актуальных задач современного общества является поиск альтернативных источников энергии. Наиболее перспективным в этом плане считается водород, многие ученые называют его «топливом XXI века», способным решить энергетические и экологические проблемы, связанные как с выбросом ядовитых веществ в атмосферу, так и с накоплением двуокиси углерода, приводящим к нарушению биоценоза.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** В данной работе рассматривается вопрос о необходимости сосредоточения внимания на топливных элементах, которые используются в качестве эффективных источников для электротранспорта.

**Цель работы.** Целью данной работы является выработка концепции развития автономных энергетических систем (блоков) для наземного промышленного транспорта, обладающих высокими удельными характеристиками, удобством эксплуатации.

**Изложение основного материала.** Традиционные газопоршневые, дизельные и газотурбинные установки имеют множество недостатков, главным из которых являются довольно низкий КПД и экологический вред.

Если бы все те материальные и интеллектуальные расходы, которые человечество израсходовало на создание двигателей внутреннего сгорания, были направлены на создание топливных элементов, то сейчас мы не знали бы о глобальных экологических катастрофах и энергетических кризисах.

За XX век потребление энергии в мире выросло более чем в 15 раз (1900 год – 21 экодж, 2000 год – 320 экодж, 1 экодж =  $27 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> нефти, что для 2000 г. составляет 7 млрд 344 млн тонн) и будет расти дальше. Первичные природные источники энергии по большей части невозобновляемы, использование традиционных источников существенно загрязняет окружающую среду. Трудно точно рассчитать, на сколько лет еще хватит запасов нефти. Если существующие тенденции сохранятся, то годовое потребление

нефти в мире к 2018 достигнет 3 млрд. Даже допуская, что промышленные запасы существенно возрастут, геологи приходят к выводу, что к 2030 будет исчерпано 80% разведанных мировых запасов нефти.

Таким образом, современное общество стоит перед дилеммой – без энергии невозможно существовать, но сохранение темпов роста и методов производства энергии приведет к разрушению окружающей среды. Наиболее обоснованным выходом из данной ситуации является использование водорода как основного энергоносителя и топливных элементов как генераторов электроэнергии с резким сокращением потребления ископаемых ресурсов.

Водородная энергетика является одним из основных направлений для развития устойчивых, экологически чистых, открытых энергетических систем в мире, так как водород в чистом виде, а также в сочетании с некоторыми другими видами топлив наиболее эффективно преобразуется в энергию [1].

Водород рассматривается как энергоноситель, который вполне может заменить существующие природные энергоносители. Водород – это легкий газ, но он превращается в жидкость при 253°. Теплотворная способность жидкого водорода в 2,75 раза больше, чем природного газа. Основной предпосылкой этого являются практически неограниченные запасы водорода в природе. Кроме того, при сгорании водорода образуются пары воды, и таким образом поддерживается аналогичный природному кругооборот, что создает условия для поддержания окружающей природной среды в сбалансированном состоянии. В этом заключаются уникальные, не имеющие альтернативы свойства водорода.

Водород как энергоноситель имеет ряд других положительных качеств:

- нетоксичен, а продуктами его сгорания с кислородом являются пары воды;
- имеет по сравнению с другими видами топлив наиболее высокую теплоту сгорания на единицу массы (120 МДж/кг);
- его можно транспортировать и хранить как природный газ (по трубопроводам, в емкостях или в сжиженном виде);

– с его помощью можно аккумулировать излишки электроэнергии, вырабатываемой электростанциями, в том числе атомными и гидроэлектростанциями (например, в ночные часы и выходные дни), а также энергию возобновляемых источников (ветра, воды, солнца и др.);

– водород и получаемые на его основе виды топлива можно применять в двигателях и энергоустановках различного назначения.

Водород не является первичным источником энергии, как уголь или газ. В природе он присутствует в связанном состоянии в виде углеводородов и воды. Современный подход получения водорода основан на централизованном его получении из ископаемых топлив с использованием улавливания и безопасного хранения двуокиси углерода. Перспективным источником водорода является биогаз из городских отходов и станций очистки сточных вод. Возобновляемые источники энергии: энергия солнца, ветра, океана, биомассы – могут быть использованы для электролиза воды и получения водорода и кислорода.

Основными эксплуатационными недостатками являются низкая плотность жидкого водорода ( $70 \text{ кг/м}^3$ ) и низкая температура кипения. Переход на водородную энергетику не только даст дополнительный широкодоступный источник энергии, но и позволит решить как чисто экономические проблемы – на определенном уровне развития технологии водород станет самым дешевым источником энергии, так и экологические – этот вид энергии не только не загрязняет окружающую среду, но и в некоторых случаях (получение водорода разложением воды) формирует аналогичный природному кругооборот.

Топливные элементы (ТЭ) представляют собой очень эффективный, надежный, долговечный и экологически чистый способ получения энергии [2].

Простейший топливный элемент состоит из специальной мембраны, известной как электролитическая мембрана, по обе стороны которой расположены каталитические электроды, анод и катод. Для протекания таких электродов на пористые материалы, обладающие большой удельной поверхностью, наносят каталитически активные металлы, такие как Ni, Pt, Ag. Такая конструкция – электролит, окруженный двумя электродами, представляет собой единичный мембранно-электродный блок. Водород подается на анод, а кислород (или воздух) – на катод. На каждом электроде протекают разные химические реакции.

На аноде водород под действием катализатора, в качестве которого обычно используют платину, распадается на смесь протонов ( $\text{H}^+$ ) и электронов ( $\text{e}^-$ ). На катоде топливного элемента протоны и электроны вступают в реакцию с подаваемым на катод кислородом с образованием воды,  $\text{H}_2\text{O}$ .

Работа топливного элемента основана на том, что электролитическая мембрана представляет собой протонный проводник, т.е. материал, по которому протоны могут двигаться от анода к катоду. Хорошими протонными проводниками являются щелочи, кислоты, а также твердополимерные мембраны. Электроны движутся к катоду по внешнему проводящему контуру. Это движение электронов создает электрический ток, который может быть использован для при-

ведения в действие внешнего устройства, подсоединенного к топливному элементу, такого как электродвигатель или лампочка.

Единичный электродномембранный блок выдает напряжение около 1 В. Требуемое напряжение получают путем последовательного соединения блоков. Чтобы создать большой ток, элементы соединяются параллельно.

Хотя и аккумуляторные батареи, и топливные элементы вырабатывают электричество химическим путем, они выполняют две совершенно разные функции. Батареи – устройства с накопленной энергией, а электричество, которое они вырабатывают, является результатом химической реакции вещества, которое находится внутри них. Топливные элементы не хранят энергию, а преобразуют химическую энергию топлива в электрическую. В этом отношении топливный элемент скорее похож на обычную электростанцию.

Топливные элементы открывают перспективы для создания малогабаритных [3], с большим сроком службы источников тока для развития электротранспорта, не создающего при движении вредных выхлопов и шума. При сравнении топливных элементов с ядерными электростанциями преимуществом топливного элемента является отсутствие радиоактивных продуктов реакции, захоронение которых само по себе является одной из серьезных проблем атомной энергетики.

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;

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

В настоящее время разработано большое количество топливных элементов, отличающихся принципом действия и конструктивным исполнением. В соответствии с принятой в электрохимии классификацией топливные элементы могут быть разбиты на четыре основные группы:

1 – низкотемпературные элементы с рабочей температурой до  $100^\circ\text{C}$ ;

2 – среднетемпературные от  $100^\circ$  до  $300^\circ\text{C}$ ;

3 – высокотемпературные от  $300^\circ$  до  $1000^\circ\text{C}$ ;

4 – регенеративные или редокс-элементы [4].

Существуют две сферы применения ТЭ: автономная и большая энергетика.

Для автономного использования основными показателями являются удельные характеристики и удобство эксплуатации. Стоимость вырабатываемой энергии не является основным показателем.

Для большой энергетики решающим фактором является экономичность. Кроме того, установки должны быть долговечными, не содержать дорогих материалов и использовать природное топливо при минимальных затратах на подготовку.

Наибольшие выгоды сулит использование ТЭ в области внедорожного промышленного транспорта (автомобили, электротягачи, электропогрузчики и т.д.). Здесь, как нигде, скажется ком-

пактность ТЭ. При непосредственном получении электроэнергии из топлива экономия последнего составит порядка 50%.

Наиболее привлекательны элементы с твердым полимерным электролитом (ТПЭ). Эти элементы работают при относительно низкой температуре (около 90°C), имеют высокую плотность энерговыделения, могут быстро изменять выходную мощность для удовлетворения меняющейся потребности в энергии и подходят для работы в таких условиях, где требуется быстрый запуск, например в автомобилях. В качестве топлива они могут использовать как водород, так и метанол. Области их использования является главным образом, автомобильный транспорт (до 70% потенциального рынка), а также системы автономного энергоснабжения передвижных объектов. В Европе готовится испытание установки в автотранспорте мощностью 100кВт. В Японии уже испытаны два небольших блока на твердооксидных топливных элементах для транспортных целей мощностью 25 кВт.

Для обеспечения потребителей водородом в ближайшее время необходимо создать водородную инфраструктуру (сеть водородных заправочных станций для автомобилей на топливных элементах и т.п.) При реализации этой задачи незаменимы электролизеры воды с ТПЭ.

Основное препятствие для коммерциализации топливных элементов и электролизеров с ТПЭ заключается в использовании электрокатализатора на основе платины. Использование данного металла приводит к ряду значительных проблем, ограничивающих применение топливных элементов.

Во-первых, стоимость платины достаточно высока, и ее ресурсы недостаточны. Современные оценки стоимости компонентов топливных элементов дают значения от 200 до 2000 долларов США на кВт производимой энергии.

Во-вторых, существенным недостатком платины является то, что она легко и необратимо окисляется окисью углерода (СО) и сероводородом ( $H_2S$ ) – примесями, неизбежно присутствующими в дешевых топливах, таких как ре-форминг-газ (продукты конверсии органического топлива) и биогаз (биотехнологический  $H_2$ , полученный из отходов органического происхождения с помощью бактерий). Поэтому топливные элементы, использующие платиновые катализаторы, не могут рассматриваться как единственная перспектива для широкого использования в энергетике будущего. Необходимо искать альтернативный катализатор.

При значительном повышении температуры можно отказаться от катализа платиной. Так, например, высокотемпературные топливные элементы и электролизеры на основе оксидов металлов и керамики не содержат благородных металлов.

Одним из путей решения проблемы катализа в низкотемпературных топливных элементах является использование природных катализаторов – ферментов. В проекте «Исследования и разработка неплатиновых электрокатализаторов для водородного электрода топливных элементов и электролизера на основе иммобилизованных ферментов», которым занимаются ученые химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова совместно с Федеральным государственным учреждением Российский научный центр «Курчатовский институт» (ФГУ РНЦ «Курчатовский

институт»), предлагается использовать ферменты в качестве альтернативных электрокатализаторов для водородных электродов.

Топливные элементы признаны одним из высочайших приоритетов мира, развитием которого опекаются первые лица развитых стран.

Лидерами во внедрении топливных элементов является Япония, США, Германия, Канада, Россия.

В Украине топливные элементы [3] связывают с именем автора первой в мире книги о топливных элементах (1946 г.) – Оганеса Карапетовича Давтяна, который начал соответствующую деятельность в Одесском университете им. И. Мечникова в 1953 году. Там же в 1962 году была основана лаборатория, где была создана серия генераторов, мощностью от 100 Вт до 5 кВт и вместе с Черкасским «Ротором» начала работать над созданием гибридного автомобиля на топливных элементах.

В Украине целенаправленная деятельность в сфере топливных элементов началась лишь в последнее время.

Институт проблем материаловедения и ООО «Циркония Украины» изготовили первую украинскую модель твердо-оксидного топливного элемента.

В системах на твердых оксидах вместо жидкого электролита обычно используется твердый керамический материал, состоящий из смеси различных окислов, что позволяет достичь рабочих температур до 900°C. КПД при выработке энергии может достигнуть 60%. В качестве топлива используются различные углеводороды. Такие топливные элементы могут быть использованы в качестве больших мощных установок, включая промышленные и крупные центральные станции, вырабатывающие электричество. Некоторые разработчики считают, что твердооксидные топливные элементы могут также использоваться и в автомобильном транспорте.

Украина владеет единым в Европе, наибольшим во всем Северном полушарии и одним из крупнейших в мире месторождением песка-циркона и имеющимся научным потенциалом, который умеет изготавливать циркониевую керамику, и имеет все основания стать одним из ведущих экспортеров энергетических установок на топливных элементах.

Сейчас в мире насчитывается больше 250 мощных топливных энергетических установок, общей мощностью более 600 МВт.

Двигатели на основе топливных элементов уже устанавливаются на самолетах «Стелс» и «Сесна», на подводных лодках, легковых автомобилях, грузовиках, автобусах и т.п.

Практически все ведущие автомобильные компании мира работают над разработкой конкурентоспособных легковых автомобилей на топливных элементах, а Honda Motors, General Motors, Ford Motors, Mazda, Toyota, Daimler Chrysler начали выпуск экспериментальных образцов.

Использование топливных элементов открывает новые перспективы в автомобилестроении [2]. Наиболее убедительно это продемонстрировано в концептуальной модели AUTOnomy фирмы Дженерал Моторс. Автомобиль выполнен в виде четырехколесной платформы толщиной около шести дюймов, в которой размещена вся двигательная установка, состоящая из водородо-воздушного топливного элемента типа PEMEC и четырех электромоторов. Полностью электрические привод, рулевая и тор-

можная системы снимают необходимость использования моторных масел, рулевой и тормозной жидкостей. Управление автомобилем компьютеризировано и предельно упрощено. Размеры платформы достаточны для размещения кузова четырехдверного седана, минивана, или легкового грузовика. Установка кузова занимает всего несколько часов. За время эксплуатации платформы (15-20 лет) они могут меняться неоднократно (по желанию владельца). Необходимый для питания водород получается из природного газа на стационарных риформерах.

Топливный элемент Ballard Mark 902 и 300-вольтная электрическая батарея фирмы Sanyo использованы в качестве энергетической установки в новой версии Форд FOCUS. Мощность автомобиля увеличена со 110 л/с для обычных моделей с двигателем внутреннего сгорания до 117 л/с. Новая конструкция топливного бака для водорода позволяет довести пробег до 200 миль.

Технология, которую еще несколько лет назад рассматривали лишь в качестве далекой перспективы, сегодня наконец обретает конкретные формы. Работающее на водороде транспортное оборудование уже готовится занять место в сфере общественного и промышленного транспорта. Still GmbH, дочерняя фирма концерна Linde [5], недавно представила первый виловый погрузчик, работающий на топливных элементах (fuel cell), источником энергии в которых стал самый легкий газ. Топливные элементы были установлены на уже существующем оборудовании, в аккумуляторном отсеке серийно выпускаемого электропогрузчика, и опробованы в реальных условиях эксплуатации.

Если сравнивать погрузчики с топливными элементами и аккумуляторными батареями, преимущества первых очевидны. Для них:

- используется вместо зарядки трехминутная заправка газом;

- возможна последующая дозаправка при любой степени заполнения бака;

- не требуется ни основной батареи, ни сменной;
- отсутствует необходимость в перерывах в работе погрузчика;

- достигается более высокая плотность по мощности и энергии;

- отсутствует эмиссия любых вредных веществ (например, CO<sub>2</sub>);

- ресурс больше.

В настоящее время, актуальной представляется работа по следующим трем направлениям:

1. исследование топливных элементов нового поколения на основе твердополимерных электролитических мембран и каталитических электродов, изготовленных из нанокompозитов, состоящих из углеродных наноструктурных материалов и металлических наночастиц;

2. дальнейшее изучение возможностей щелочных топливных элементов с исследованиями и разработкой новых видов каталитических электродов, не содержащих дорогостоящих металлов платиновой группы;

3. создание научно-технического задела для новых технологий электро-химического сжигания жидких и газообразных (природный газ) органических топлив.

**Выводы и предложения.** Разработка и коммерциализация топливных элементов и реакторов производства водорода к ним является одним из перспективных направлений, в рамках которого существует вероятность совершить инновационный технологический прорыв. Возможность и необходимость сосредоточения внимания на топливных элементах обусловлена тем, что, по-видимому, время начала их массовой коммерциализации в качестве эффективных источников исчисляется несколькими годами.

## Список литературы:

1. Автономные энергоустановки на топливных элементах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ess-ltd.ru/toplivnye\\_elementy/](http://www.ess-ltd.ru/toplivnye_elementy/).
2. Энергетические установки на базе топливных элементов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.km.ru/referats/4776351DB2054E078AE0B5CD1AFBE220>.
3. Новые разработки в сфере мини-ТЭЦ. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», № 4, апрель, 2003 г., с. 3-8.
4. Бродач М.М., Шилкин Н.В. Использование топливных элементов для энергоснабжения зданий. Журнал «АВОК», № 2, 2004 г., рубрика «Энергоснабжение», с. 11-17.
5. Вместо выхлопных газов – водяной пар. Станет ли водород топливом будущего. Ж. Склад и техника № 8, 2005 г. По материалам зарубежной печати. Перевод с немецкого Л. Цинкевича. [www.sitmag.ru](http://www.sitmag.ru), с. 5-15.

Гаур Т.О., Машин В.М.

Навчально-науковий інститут морського флоту  
Одеського національного морського університету

## ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

### Анотація

У статті розглядається питання пошуку альтернативного виду палива на противагу традиційним органічного походження і намічаються шляхи реалізації його на практиці у вигляді паливних елементів. В якості найбільш перспективних енергетичних установок для малої енергетики можуть бути розглянуті отримуючі все більше поширення у світі, установки на основі паливних елементів.

**Ключові слова:** воднева енергетика, паливний елемент, електролітична мембрана, електродно-мембранний блок.

**Gaur T.A., Mashin V.N.**

Maritime Training and Scientific Institute  
Odessa National Maritime University

## **PERSPECTIVES OF CREATING SMALL-FUEL FUEL ELEMENTS FOR ELECTRIC TRANSPORT**

### **Summary**

The article deals with the question of finding alternative fuels as opposed to traditional organic origin and the ways of implementing it in practice in the form of fuel cells. As the most promising energy plants for small-scale power can be considered is becoming increasingly common in the world of plants based on fuel cells.

**Keywords:** hydrogen energy, fuel cell, electrolytic membrane, the electrode-membrane unit.