



## АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА ТЕХНИЧЕСКИТЕ ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ НА ГОРИВНИ КЛЕТКИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИЯ ТРАНСПОРТ

Иван Миленов<sup>1</sup>, Теодоро Тодоров<sup>2</sup>, Ирина Асенова<sup>1</sup>  
[milenov55@abv.bg](mailto:milenov55@abv.bg), [tedi\\_610624@abv.bg](mailto:tedi_610624@abv.bg), [irka\\_honey@yahoo.com](mailto:irka_honey@yahoo.com)

<sup>1</sup> ВТУ „Тодор Каблешков“, 1574 София, ул. „Г. Милев“ 158;  
<sup>2</sup> „БДЖ АД“ – София, ул. „Чам кория“ 9;  
БЪЛГАРИЯ

**Ключови думи:** горивни клетки, енергоефективност, електрически транспорт.

**Резюме:** За удовлетворяване на постоянно растящите енергийни потребности е необходимо да се използват все повече различни алтернативни енергийни източници. В същото време независимо от какъв източник е получена електрическата енергия, нейното съхраняване в големи мащаби си остава неразрешим проблем. Това налага търсенето не само на нови енергийни източници, но и ефективни пътища за съхраняване и разпределение на енергията.

В доклада е направен обзор на развитието на горивните клетки – от откриването на принципа на действие на горивната клетка до създаването на различни видове устройства, работещи на този принцип. Показани са техническите характеристики и параметри на основните видове горивни клетки в зависимост от вида на електролита. Анализирани са резултатите от най-новите научни проучвания, пътищата за тяхното усъвършенстване, както и ефектът от използването им. Избрани са критерии за оценка на енергоефективността на горивните клетки. Направен е икономически анализ на варианти на използване на различни видове горивни клетки и е оценена тяхната конкурентоспособност. Очертани са перспективите за приложението на горивните клетки в електрическия транспорт.

### РАЗДЕЛ 1

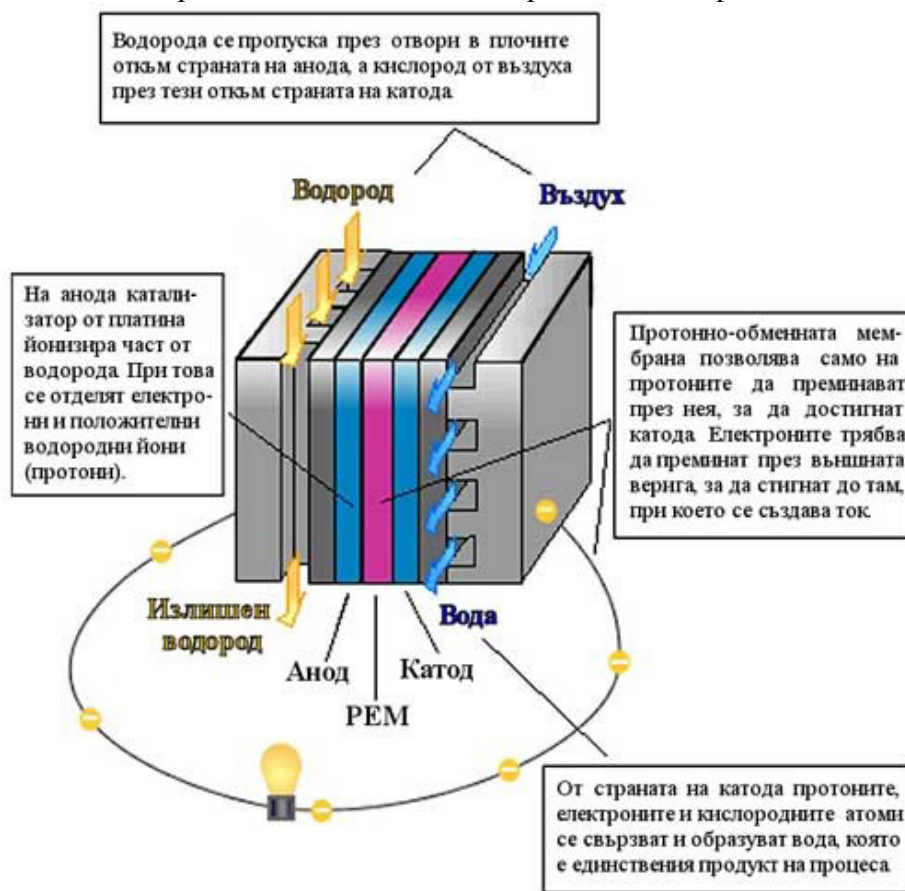
#### КРАТКИ ИСТОРИЧЕСКИ БЕЛЕЖКИ ЗА ПОЯВАТА НА ГОРИВНИТЕ КЛЕТКИ. ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ И ОСНОВНИ ВИДОВЕ.

За откривател на принципа на действие на горивната клетка през далечната 1838 г. се счита швейцарският учен Кристиан Фридрих Шоенбайн, а първото устройство, работещо на този принцип, е изобретено от Уилям Робърт Гроув през 1845г. Апаратът на Гроув се захранва с водород и кислород, произвежда електричество и краен продукт вода. Устройството се състои от платинов електрод, потопен в азотна киселина и цинков електрод, потопен в цинков сулфат, което генерира ток с големина около 12 А и напрежение около 1.8 V. През 1896г. Уилям Жак разработва първата горивна клетка за домакинска употреба, а в 1900г. Нернст първи използва цирконий като електролит на твърдо вещество. През 1921г. Емил Ба конструира първата горивна клетка с разтопен карбонат. В края на 30-те години на миналия век Франсис Бейкън започва работа по

алкално-електролитна горивна клетка и до 1939 г. построява клетка, използваща мрежовидни никелови електроди, работеща под високо налягане. По време на втората световна война, Бейкър работи върху горивни клетки за подводниците на Британската Кралска Флота и през 1958г. показва работеща алкална клетка, използваща голям брой 10 инчови електроди. През 1962г. изследванията в технологията твърдо оксидно вещество започва да се ускорява в САЩ и Холандия; компанията за производство Allis-Chalmers демонстрира, че горивна клетка с 20 конски сили може да задвижи трактор.

Конструктивно горивните клетки се състоят от два електрода, разделени от електролит. Последният може да бъде течен или твърд. Като твърд електролит най-често се използва специална йонообменна мембрана, която пропуска протоните само в едната посока.

В най-общ вид принципът на действие е представен на фиг. 1.



Фиг.1 Принцип на действие на горивна клетка

При водородната горивна клетка в анода постъпва водород, изпълняващ ролята на гориво, а на катода - кислород или най-често въздух. Подпомогнат от катализатор, молекулният водород първоначално се дисоциира върху електродната повърхност на два електродни атома. Отдавайки електрон, водородните атоми се превръщат в водородни катиони (протони). За да достигнат до катода, получените електрони и протони изминават различни пътища. Протоните преминават през мембраната, а електроните се улавят от външната верига на клетката и представляват готовата за консумация електрическа енергия. От страната на катода протоните, заедно с част от електроните и кислорода, формират отпадния продукт (водна пара или чиста вода) от работата на горивната клетка.

Разработени са различни видове горивни клетки. В основата на всички тях лежи един и същ електрохимически закон (екзотермична химична реакция). В зависимост от

електролита, който използват и междинните реакции, протичащи в горивната клетка, те биват:

- ◆ Алкални горивни клетки (AFC – Alkaline Fuel Cell);
- ◆ Фосфорно – киселинни горивни клетки (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell);
- ◆ Горивни клетки с протонно-обменна мембрана (PEMFC – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell);
- ◆ Горивни клетки със стопен карбонат (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell);
- ◆ Горивни клетки с твърд оксид (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell);
- ◆ Горивни клетки с директно използване на метанол (DMFC – Direct – Methanol fuel Cell);
- ◆ Регенеративни горивни клетки (RFC – Reverse Fuel Cell).

## РАЗДЕЛ 2

### ТЕХНИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ОСНОВНИТЕ ВИДОВЕ ГОРИВНИ КЛЕТКИ. КРИТЕРИИ ЗА ОЦЕНКА. ПРЕДИМСТВА И НЕДОСТАТЪЦИ.

Направеният сравнителен анализ върху техническите параметри и характеристики на основните видове горивни клетки показва, че като *основни критерии* за оценка следва да се посочат: работна ефективност - %; работна температура - °C; развивана мощност – W; цена, а като *допълнителни критерии*: габарити, тегло, надеждност при работа и др.

#### 2.1 Алкални горивни клетки (AFC – Alkaline Fuel Cell)

Това са едни от най-старите типове горивни клетки. Използвани са в космическата програма на Съединените щати от 1960 год. В космическите кораби „Аполо” AFC са използвани едновременно за получаване на електрическа енергия и питейна вода. Използва се скъп катализатор от платина. Тези горивни клетки използват чист кислород и водород, тъй като са много чувствителни към замърсяванията. Работят със съгъстен водород и кислород. За електролит използват воден разтвор на калиева основа (KOH). Работната им ефективност е около 60%, като работната температура е в интервала от 50 °C до 200 °C. Новите модели работят с по - ниска температура от 23 °C до 70 °C и намират приложение в превозните средства.

Недостатък на този тип горивни клетки е, че нормалната им работа се нарушава при наличие на малко количество на въглероден диоксид във въздуха. AFC работят стабилно до 8000 часа. За да бъдат икономически изгодни, трябва времето на стабилна работа да бъде повече от 40 000 часа.

#### 2.2 Фосфорно – киселинни горивни клетки (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell)

Този тип горивни клетки използват като електролит фосфорна киселина. Произведената ел. енергия е с ефективност от 36 до 42%. Работят при температури от 160 °C до 220 °C. При по-ниски температури фосфорната киселина е слаб йонен проводник. Мощността на такива клетки е до 200 kW. Тези горивни клетки понасят концентрации от въглероден оксид до 1,5%, което позволява да се използват горива като водород, метан, метанол и пропан.

Недостатък на този тип горивни клетки е, че се използват скъпи платинови катализатори, които генерират ниска токова плътност и са с големи размери и тегло. Намират приложение за стационарни генератори в частни болници, хотели, офис сгради и др.

#### 2.3 Горивна клетка с протонно-обменна мембрана (PEMFC – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)

При този тип горивна клетка се използва протонно-обменна мембрана, която от двете страни е инпрегнирана с метални платинени частици. Мембраната разделя

анодната и катодната страна и пропуска само протоните да минават през нея, за да достигнат катода. Електроните преминават по външната ел. верига, доставяйки енергия. На катализатора на катода молекулите кислород реагират с електроните и протоните, за да образуват вода, при която се отделя топлина. Единственият отпадъчен продукт е водна пара – вода. Електролитът, който се използва, е твърд ограничен полимер, който намалява корозията и проблемите при производството им.

Недостатък – тези горивни клетки са чувствителни към чистотата на горивото. Тези клетки работят при ниски температури, около 80°С. Максималната си работна мощност достигат бързо, като генерират ток с голяма плътност. Изходната мощност е от 3 до 250 kW. Ефективността при производството на ел. енергия е от 25 до 40%.

#### **2.4 Горивна клетка със стопен карбонат (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell)**

Този тип горивни клетки използват като електролит стопени соли най - често  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Mg CO}_3$ . Работната им ефективност е 55%, а работната им температура е 650°С. MCFC произвеждат освен електроенергия и водна пара, която може да се използва за получаване на допълнителна енергия. Те могат да достигнат мощности от 250 kW до 10 MW. При тези горивни клетки могат да се използват никелови катализатори, които са по - евтини от платиновите.

Недостатък – трайността им. Високите температури ускоряват корозията и намаляват живота на елементите на MCFC. Те не са податливи на въглероден оксид и диоксид, с което могат да се зареждат с различни горива като природен газ, пропан и газове, произведени от въглища.

#### **2.5 Горивна клетка с твърд оксид (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell)**

Като електролит в тези горивни клетки се използват керамични материали, съдържащи в структурата си циркониев оксид в смес с малко количество итрий. Те работят при много високи температури до 1000°С. Употребяват се различни въглеводороди като гориво и работят в режим на когенерация. Получената при работата им прегрята пара се използва за задвижване на електрически микротурбини, където се генерира допълнително количество ел. енергия. Ефективността на SOFC при получаване на ел. енергия е около 60%.

Този тип горивни клетки са устойчиви на сяра и въглероден оксид – може да се използват газове, произведени от въглища. Изходната им мощност е от 100 до 200 kW.

Недостатък е високата работна температура. Пусковият процес протича бавно, изисква се добра изолация за задържане на топлината и използването на температурноустойчиви материали.

#### **2.6 Горивни клетки с директно използване на метанол (DMFC – Direct-Methanol Fuel Cell)**

Тези горивни клетки използват протонно-обменна мембрана като електролит. При тях самият аноден катализатор извлича водорода от течния метанол и така отпада необходимостта от преобразувател.

Недостатъци: метанолът който е отровен, ниска ефективност – около 40% и високата цена на полимерната мембрана в клетката.

DMFC са ограничени в мощността, която отдават, но могат да съхраняват високо енергийно съдържание в малко пространство. Те могат да произвеждат малко количество енергия в продължение на дълъг период от време. Работната им температура е ниска - от 50 до 120°С. Намират приложение за хранване на портативни електронни устройства като мобилни телефони, цифрови камери и преносими компютри.

#### **2.7 Регенеративни горивни клетки (RFC – Reverse Fuel Sell)**

Тези горивни клетки представляват една затворена система. С помощта на електролизатор, хранван от слънчевата енергия, водата се разлага на водород и

кислород. Те се подават в горивната клетка, където се генерира електричество, топлина и вода. Получената вода се връща обратно за следващо разлагане в електролизатора. Кръгът се затваря.

### **РАЗДЕЛ 3**

#### **ПРИЛОЖЕНИЕ НА ГОРИВНИ КЛЕТКИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИЯ ТРАНСПОРТ. ПЕРСПЕКТИВИ.**

При горивните клетки технологичният процес завършва с генериране на електричество, което се използва за захранване на електродвигател (електродвигатели), задвижващ транспортното средство. В този смисъл се говори за електрическо транспортно средство – електромобил, електробус, на който електрическата енергия се генерира на самото возило от разположената на него горивна клетка. Такива електромобили в последните години бяха разработени от почти всички водещи автомобилпроизводители - „BMW”, „Toyota”, „Mazda”, „Honda”, „Ford”, „Volkswagen Polo”, „Saab”, „Smart”, „Opel Zafira” и др.

„Ford” започват да разработват водородните технологии в началото на 90-те години. Първият им прототип, работещ с водородни горивни клетки, е представен през 2001 г. и е базиран на олекотен седан с алуминиево купе. В момента 30 автомобиля, задвижвани с водородни горивни клетки, се движат по пътищата по цял свят, като част от тестовата програма на компанията за прилагането на технологията в реални условия.

Производителят „Honda” е разработил нова кола, която е два пъти по-икономична от бензиново-електрическите хибриди и три пъти спрямо традиционната кола с бензинов двигател, като използва ново поколение по-ефикасни и изключително компактни горивни клетки. В тях водородът реагира през мембрана с атмосферния кислород и при реакцията се получава електрическа енергия, която се складира в акумулаторите на колата, откъдето се черпи за задвижването ѝ. Допълнителна енергия се добива и при процеса на спиране, при който кинетичната енергия на автомобила се преобразува отново в електричество. В сравнение с досегашните разработки 100-киловатовата батерия е с 20% по-малки габарити и е 30% по-лека. Електродвигателят също е с намалено тегло и размери, като развива мощност от 125 конски сили. Батерията, в която има горивни клетки, отделящи ток при взаимодействие на водорода от резервоара и кислорода от въздуха, е монтирана в средата на автомобила на мястото на кардана при моделите със задно предаване. Резервоарът за водород се намира зад задната седалка и може да събере 171 литра от газа под налягане от 350 атмосфери. Honda FCX Clarity е снабдена и с литиево-йонни батерии, които съхраняват отделената при спиране електроенергия, разположени под задните седалки. С едно зареждане автомобилът може да измине до 430 километра. Максималната скорост на движение е 160 км/ч. Подобно решение може да се види и на един от моделите на Мерцедес.

#### **Предимства на новата технология:**

- ◆ Нулеви емисии на въглероден диоксид;
- ◆ Екологичен енергиен източник с неограничен ресурс за добив;
- ◆ Ниски нива на шум (или нулево) при работа на горивните клетки;
- ◆ Насоки за използване на местни разнообразни ресурси;
- ◆ Висока горивна ефективност.

#### **Недостатъци:**

- ◆ В газообразно състояние водородът има прекалено голям обем;
- ◆ Изисква специално оборудване при складиране (може да се компресира или втечнява);
- ◆ Разходите при водородните технологии са високи;

- ◆ За по-голям пробег на автомобила е необходим допълнителен запас от водород.

## ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ◆ В газообразно състояние водородът има прекалено голям обем;
- ◆ Водородните технологии намират все по-широко приложение, като една от перспективните области е електрическият транспорт;
- ◆ Продължава работата на учените за разработване на по-ефективни и конкурентни горивни клетки;
- ◆ Съхранението на водорода, особено на самите транспортни средства, продължава да бъде технически проблем;
- ◆ Новите технически решения и технологии водят до намаляване на цената на водорода и на способите за неговото съхранение и транспортиране;
- ◆ Бъдещето развитие е насочено към екологичните и възобновяеми източници на енергия.

## ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Евтимов И. , Иванов Р. Електромобили, Русе, 2011
- [2] Евтимов И. , Иванов Р., Попов Г., Възобновяеми енергийни източници, Русе, 2013
- [3] Калчевски Ст., Възобновяеми енергийни източници, вторични енергийни ресурси в промишлеността и съвременни аспекти при тяхното оползотворяване, София, 2013
- [4] Hoffman P., Tomorrow's Energy. Hydrogen, Fuel Cells and the Prospects for a Cleaner Planet, The MIT Press, Cambridge, 2002
- [5] World Energy Outlook 2004, International Energy Agency, Paris, 2004

## ANALYSIS AND EVALUATION OF TECHNICAL OPTIONS FOR APPLICATION OF FUEL CELLS IN THE ELECTRIC TRANSPORT

Ivan Milenov, Teodoro Todorov, Irina Asenova  
[milenov55@abv.bg](mailto:milenov55@abv.bg), [tedi\\_610624@abv.bg](mailto:tedi_610624@abv.bg), [irka\\_honey@yahoo.com](mailto:irka_honey@yahoo.com)

<sup>1</sup>*Todor Kableshkov University of Transport – Sofia, 158 Geo Milev Str., Sofia 1574,*  
<sup>2</sup>*„BDZ AD” – Sofia, ул. „9 Cham koria Str.”,*  
**BULGARIA**

**Key words:** *fuel cells, energy efficiency, electrical transport.*

**Abstract:** *To meet the constantly growing energy needs must be increasingly used various alternative energy sources. At the same time, from whatever source received electrical energy, its storage in large scale remains an unsolvable problem. This requires not only the demand of new energy sources, but also effective ways of storing and distribution of energy.*

*The report gives an overview of the development of fuel cells - the discovery of the principle of operation of the fuel cell to create different types of devices operating on this principle. The technical characteristics and parameters of the main types of fuel cells depending on the type of electrolyte are shown. The results of the newest scientific studies ways for their improvement, and the effects of their use are analyzed. Selected are criteria for evaluating the energy efficiency of fuel cells. An economic analysis of options using different types of fuel cells and their competitiveness is evaluated. They outline the prospects for the application of fuel cells in electric transport.*