

УДК 66.098:546.11

Є.В.Кузьмінський, докт.хім.наук, **К.О.Щурська**, **І.А.Самаруха** (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Паливні елементи. I. Сучасний стан розроблення

В огляді розглянуто сучасний стан, класифікацію та стислу характеристику паливних елементів на сучасному етапі розроблення.

В обзорe рассмотрено современное состояние, классификацию и краткую характеристику топливных элементов на современном этапе разработки.

Першим конструктором паливного (біопаливного) елемента була не людина. Як встановили біохіміки, біологічний воднево-кисневий паливний елемент (ПЕ) міститься в кожній живій клітині. У живому організмі джерелом енергії слугує їжа. У травній системі вона розкладається до мономерів, які внаслідок хімічних перетворень дають водень. Кисень потрапляє в кров через легені, з'єднується з гемоглобіном і транспортується до всіх тканин організму. Процес сполучення водню з киснем є основою біоенергетики організму [1].

Таким чином, все створене природою є доцільним і працює з максимальним коефіцієнтом корисної дії (ККД), тому не дивно, що паливним елементом зацікавилася людина. ПЕ відносяться до хімічних джерел струму, які здійснюють пряме перетворення енергії палива в електричну енергію, минаючи малоефективні, що йдуть з великими втратами, процеси горіння. ПЕ – це електрохімічний пристрій, який у результаті високоефективного "холодного" горіння палива безпосередньо виробляє електроенергію. В свою чергу, рукотворний біопаливний елемент (БПЕ) – це біоелектрохімічний пристрій, який у результаті високоефективного "холодного" горіння палива безпосередньо може продукувати як електроенергію, так і біоводень [2–6].

ПЕ і БПЕ мають здійснити революцію в споживанні енергії. Люди мають дійти висновку, що, виробляючи тепло й електроенергію традиційними способами з вуглеводневого палива, вони можуть використати лише близько третини тієї енергії, що міститься в паливі, а решта просто втра-

чається. Це означає, що людська спільнота повинна задовольнятися лише однією третиною всіх органічних видів палива, що зараз використовуються. ПЕ дають унікальну можливість використовувати цю втрачену частку енергії в дуже гнучкій формі – у формі електроенергії. Крім істотної економії енергії, ПЕ дозволяють серйозно зменшити викиди шкідливих забруднень, які є типовими для електростанцій і транспорту на двигунах внутрішнього згорання.

Паливні елементи були відкриті ще в далекому 1839 році В.Грове, коли він вивчав електроліз води [7]. Відкриття процесу електрохімічного "холодного" горіння водню стало знаменною подією в енергетиці, і в подальшому відомі електрохіміки В.Оствальд і В.Нернст відіграли визначальну роль у розвитку теоретичних основ і практичній реалізації ПЕ та передбачили їм велике майбутнє. Багато науковців зацікавилися новим винаходом і почали його досліджувати, але тут світ побачило ще одне велике відкриття – усім відомий двигун внутрішнього згорання. Цей факт, у поєднанні зі стрімким розвитком інфраструктури добування нафти, відтіснив ПЕ на задній план.

Сьогодні, озираючись назад, розумієш, що В.Нернст і В.Оствальд занадто випередили свій час. Якими б геніальними не були винахідники часів В.Оствальда, вони не могли впоратися з проблемою, що стоїть на стику декількох областей знання, і вирішити завдання, що вимагає організації спільної роботи вчених різних спеціальностей – електрохіміків, фізиків, мікробіологів, математиків, фахівців з електроніки, хімічної тех-

нології, електротехніки та ін. Усьому цьому навчилися пізніше: при роботі над атомними і космічними проектами. Ніби передчуваючи всі ці труднощі, В.Оствальд не дарма назвав проблему ПЕ "філософським каменем електрохімії".

В середині минулого століття почався новий штурм проблеми створення ПЕ. Частково це пояснюється появою нових ідей, матеріалів і технологій у результаті оборонних досліджень [8, 9].

Класифікація і стисла характеристика паливних елементів. Існують різні класифікації ПЕ: за вихідними речовинами електродних реакцій (водень-кисневі, метано-кисневі та ін.), за видом перетворення вуглеводневого палива (внутрішня чи зовнішня конверсія), за значенням робочої температури (низько-, середньо- та високотемпературні), за складом електроліту (лужні, кислотні, полімерні, твердооксидні, з розтопленим електролітом), типом палива і окиснювача. Найбільш вдалою з точки зору авторів є класифікація

ПЕ за складом електроліту, оскільки вона визначає і робочу температуру, і йонний характер електродних реакцій, і вид перетворення палива [10, 11].

За типом окиснювача ПЕ умовно поділяють на кисневі та повітряні (в останньому випадку в якості окиснювача використовують кисень повітря). За типом палива виділяють водневі, метанолні і ПЕ на природному газі, хоча останні з "хімічної" точки зору слід віднести до "водневих", тому що природний газ попередньо піддається конверсії. За температурою експлуатації їх умовно ділять на низькотемпературні (до 100-150°C), середньотемпературні (близько 200-400°C) і високотемпературні (більше 500°C).

У даний час відомо декілька видів ПЕ, що розрізняються за типом використаного електроліту і палива. Виходячи з аналізу становлення ПЕ, найбільшого поширення набули наступні типи (таблиця 1):

Таблиця 1. Типи паливних елементів

Технологія ПЕ	Тип електроліту – тип палива	Робочі температури, °С	ККД вихідної електричної енергії, %	Стан технології. Сумарний ККД, %
ПЕ з протоннообмінною мембраною PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	Полімерна мембрана – водень	60÷160	30÷35	Найбільш активно ведуться розробки в сегменті автомобілебудування. Найбільш потужна установка – 300 кВт. Гарні перспективи портативних установок. 50÷70
ПЕ з прямим окисненням метанолу DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	Полімерна мембрана – метанол	50÷120	до 40	Ще недавно розробки в цьому напрямку вважалися найбільш перспективними для ринку портативної електроніки. Зараз акцент зміщений у бік DBFC
Лужні ПЕ AFC (Alkaline Fuel Cell), DBFC (Direct borohydride fuel cells)	Гідроксид калію – водень (борогідрид натрію)	25÷250	до 50÷60	Основне застосування в космічній галузі, гарні комерційні перспективи у зв'язку з дешевизною систем
ПЕ на основі ортофосфornoї (фосфорної) кислоти PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Фосфорна кислота – водень	150÷220	35÷45	Найбільш "зріла" технологія. Промислове застосування у великих установках. У даний час найбільший парк ПЕ побудований на основі технології PAFC. 70÷85
Твердотільні оксидні паливні елементи SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	Керамічний елемент – водень, природний газ, метанол, етанол та ін.	650÷1000	50÷60	Проекти для електро- і тепlopостачання приміщень. 60÷70
Паливні елементи на основі розплавленого карбонату MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells)	Карбонати літію і натрію – природний газ, біогаз, синтетичний газ, метан, пропан	600÷700	45÷60	Лідер сегменту великих промислових установок. 70÷80

ПЕ з протонообмінною мембраною (PEMFC – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Proton Exchange Membrane Fuel Cell). У якості електроліту в таких ПЕ використовується полімерна мембрана. Відновником виступає чистий водень. Розробка цього типу ПЕ була розпочата компанією *General Electric* ще в кінці 50-х років минулого століття, і однією з основних проблем стало створення хімічно стійкої протонообмінної мембрани з низьким питомим опором і високою механічною міцністю.

Протонпровідні мембрани – це полімери з іоногенними (дисоціюють на іони) групами, що утворюють водонерозчинні іонообмінні мембрани за рахунок просторової зшивки полімерних ланцюгів. При контакті з водою мембрана набухає і відбувається дисоціація іоногенних груп, у результаті чого іони водню отримують можливість переміщуватися між фіксованими в полімері кислотними, зокрема, сульфогрупами. В даний час у ПЕ застосовуються фторовані та перфторовані протонпровідні мембрани, які мають відносно низький опір, високої механічну міцність і хімічну стійкість. Хоча така мембрана тонка (близько 120 мкм), вона має низьку газопроникність і знижує ймовірність змішування вибухонебезпечних реагентів у порівнянні з лужними ПЕ. В якості електрокаталізаторів використовують платинову чернь на вуглецевому носії та інші метали платинової групи. Електричний контакт, підведення газів-реагентів і відведення води, що утворюється, здійснюють за рахунок щільного притиснення пористих колекторів струму з вуглеграфітових тканин або паперу. Оскільки мембрани і каталізатори не взаємодіють з CO, в якості окиснювача може бути використане атмосферне повітря. Екологічна чистота, висока питома потужність і низька інерційність роблять ці ПЕ досить перспективними для використання не тільки в космосі та підводному флоті, а й у побуті, в першу чергу, для транспортних засобів. У даний час в Канаді створені і проходять випробування екологічно чисті автобуси на ПЕ цього типу потужністю до 250 кВт та ККД енергоустановки до 55%. Низькі робочі температури і високий ККД роблять ці ПЕ перспективними для децентралізованого енергопостачання, зокрема для енергоустановок на основі ві-

Відновлювана енергетика. 2013. № 1

дновлюваних джерел енергії (фотобатареї, вітроенергоустановки тощо), для отримання електроенергії з природного газу з попередньою конверсією. Великий інтерес представляє створення оборотного пристрою електролізер-паливний елемент, де твердополімерні системи є також вельми перспективними.

Подальший розвиток ПЕ цього типу багато в чому пов'язаний зі зниженням вартості ПЕ і витрат платини, які до теперішнього часу в реальних установках вже знижено до 0,6 мг/см у порівнянні приблизно з 10 мг/см на початку 60-х років. Тобто витрата платини стала меншою (1 г/кВт) і продовжує знижуватися. Певною проблемою твердополімерних (як і лужних) ПЕ є чутливість електрокаталізаторів до оксиду вуглецю, присутнього в конверсійному водні. Однак прогрес у технології отримання водню, поряд із розробкою каталізаторів, вже зараз дозволяє працювати при вмісті CO менше 0,1%, що дає надію на успішне вирішення цієї проблеми. Серед усіх паливних елементів PEMFC знайшли сьогодні найбільше застосування: вони використовуються в транспортних засобах (майже 100% всіх автомобілів, що працюють на водні), у портативній електроніці.

ПЕ з прямим окисненням метанолу (DMFC – Direct Methanol Fuel Cell). ПЕ цього класу є одним із варіантів реалізації елементів з іонообмінною мембраною. У них використовується той же електроліт, що і в найбільш поширених PEMFC, але як паливо використовується водний розчин метанолу, а не водень у чистому вигляді. Безумовна перевага DMFC в порівнянні з PEMFC – можливість використання метанолу в рідкому вигляді, який більш зручно зберігати і перевозити, ніж водень. На відміну від інших технологій, у яких використовується рідина замість газу, в DMFC немає необхідності в застосуванні зовнішнього конвертора для отримання чистого водню та здійснення процесу "реформінгу" – виділення водню з метанолу відбувається безпосередньо на електроліті.

Недоліком DMFC в порівнянні з PEMFC є більш висока температура функціонування (120°C), яка, однак, не є достатньою для ефективного хімічного перетворення. У зв'язку з цим виникає необхідність у використанні дорогих ката-

лізаторів на основі платини, що неминуче призводить до збільшення вартості ПЕ. Крім того, метанол отруйний і токсичний.

Лужні ПЕ (AFC – Alkaline Fuel Cell; DBFC – Direct borohydride fuel cells). У якості електроліту в лужних елементах використовується концентрований гідроксид калію або його водний розчин. Матеріалом для виготовлення електродів слугує нікель. Лужні елементи значно поступаються PEMFC за питомою потужністю, внаслідок чого їх габарити значно більші. У AFC в якості палива повинен використовуватися чистий водень, як окисник – чистий кисень. У цьому і полягає їх основний недолік, оскільки вміст у паливі або окиснювачі домішок вуглекислого газу призводить до карбонізації лугу. Лужні ПЕ інтенсивно розроблялися в рамках космічних програм і донині є основними у цій області. У США лужні ПЕ успішно використовувалися для програм *Apollo* і *Space Shuttle*, як, наприклад, розроблена в 1979 р. установка потужністю до 36 кВт, що пройшла випробування в багатьох польотах. У СРСР в рамках програми "Енергія-Буран" була створена і пройшла успішні випробування установка "Фотон" з номінальною потужністю одиничного модуля до 16 кВт і ККД 65% (при 10 кВт).

Недоліками цих ПЕ є: необхідність застосування великої кількості благородних металів для активації електродів; висока чутливість каталізаторів до каталітичних отрут; певна нестійкість електроліту, зокрема, неможливість застосування повітря в якості окиснювача (через реакцію лугу з діоксидом вуглецю) і вимивання водою, що утворюється, лугу з азбестової матриці; невисокий ресурс (для установки "Фотон" він склав 5000 годин) і загальна висока вартість. Це робить недоцільним їх застосування в енергетиці. Однак накопичений досвід стимулював розробку транспортних засобів на лужних ПЕ. Але подальшого розвитку ці роботи не отримали. Перевагами AFC є низька собівартість їх виробництва, можливість використання більш дешевих нікелевих і срібних каталізаторів, а також абсолютна екологічна чистота гарячої води, одержуваної в якості відходів. До останнього часу технологія прямого окиснення метанолу вважалася найбільш перспективною для живлення портативної мікроелектроніки. Одроджується енергетика. 2013. № 1

на наявні в сегменті DMFC проблеми (токсичність метанолу і висока вартість каталізаторів) стимулювали розвиток досліджень у галузі технології AFC.

ПЕ з прямим окисненням борогідриду натрію (DBFC – Direct borohydride fuel cells). У порівнянні з метанолом, борогідрид натрію і тетраборат натрію менш токсичні, борогідрид має велику густину енергії. Крім того, його використання дозволяє скоротити витрати на каталізатори з благородних металів.

ПЕ на основі ортофосфорної (фосфорної) кислоти (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell). В цих ПЕ у якості електроліту використовується рідка фосфорна кислота. Підвищення температури ПЕ всього до 200-300°C забезпечує вирішення кількох задач: зменшується перенапруга реакцій на електродах, зменшується кількість каталізаторів на основі благородних металів та їх чутливість до отрути, полегшується процес видалення води та ін. На жаль, твердополімерні ПЕ (PEMFC) не можуть поки що працювати при температурах більше 100-120°C через деструкцію мембран та інших елементів ПЕ. У принципі для збільшення температури можна використовувати концентровані розчини різних неорганічних кислот, але при температурі вище 100-120°C більшість таких розчинів нестійкі або мають дуже високу окиснювальну чи корозійну активність, тому в середньотемпературних ПЕ з фосфорнокислим електролітом температура складає близько 200°C. Електродами у фосфорнокислих ПЕ слугують вуглеграфітові пластини з платиновим каталізатором. Електроліт знаходиться в пористій термостійкій матриці, наприклад, з карбиду кремнію і тефлону. В даний час тільки на основі фосфорнокислих ПЕ створені дослідні енергоустановки потужністю в кілька МВт. PAFC застосовуються на великих стаціонарних об'єктах і служать для виробництва як електроенергії, так і теплоти. Працюють ці ПЕ на водні, однак вимоги щодо його чистоти значно менш суворі, ніж у випадку використання PEMFC. У більшості випадків водень отримують з природного газу або біогазу. Окисно-відновний процес перебігає при температурах 150-220°C. Ефективність процесу вироблення електроенергії оцінюється в 35-45% і до 85% при використанні тепло-

вої енергії, що відводиться. Сегмент PAFC вважається самим відпрацьованим серед усіх технологій ПЕ. PAFC стабільно розвивається завдяки можливості використовувати водень із домішками. Сумарна потужність усіх світових установок, що функціонують на основі рідкої фосфорної кислоти, перевищує 75 МВт. Інноваційними можна вважати декілька спроб використання PAFC в автомобільних застосуваннях.

Твердотільні оксидні паливні елементи (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell). ПЕ з твердим керамічним електролітом. Відмінність від раніше розглянутих видів полягає у високих температурах реакції (650-1000°C) і різноманітності застосованого палива: природний газ, водень, пропан, біогаз, інші вуглецевмісні ПЕ. ККД електрохімічного перетворення становить 50-60%, з урахуванням теплової енергії – до 80%. Основною сферою застосування цієї технології вважається виробництво джерел електричної і теплової енергії для різноманітних житлових, адміністративних та інших приміщень. Деякі компанії ведуть розробки систем для промислового використання. SOFC широко застосовуються в якості первинних і портативних резервних джерел енергії великої ємності. Останнім часом ведуться розробки щодо використання SOFC в автомобільній промисловості, проте, на відміну від PEMFC, мова йде тільки про допоміжні системи, а не про двигун. Спільно з PEMFC ця технологія активно використовується в малих стаціонарних областях застосування виробничих установок. У великих стаціонарних областях застосування є досвід виробництва комерційних установок потужністю 1 МВт.

ПЕ на основі розплавленого карбонату (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cells). ПЕ на основі розплавленого карбонату (солі натрію або літію) функціонують при достатньо високих температурах – 600-700°C. Збільшення робочої температури ПЕ веде до росту швидкості електродних процесів і дозволяє зменшити поляризацію електродів (тобто різницю між E і U) і трохи компенсувати зменшення ЕРС воднево-кисневих ПЕ. При таких температурах можна застосовувати менш активні, ніж платинові метали, електрокаталізатори і в перспективі позбутися благородних металів. Високі температури також дозволяють

Відновлювана енергетика. 2013. № 1

розширити діапазон застосовуваних палив, тому що високопотенційне тепло, що генерується установкою, може бути ефективно, з мінімум додаткових енерговитрат, використане як для зовнішньої, так і внутрішньої (відбувається безпосередньо у ПЕ) конверсії природного газу, метанолу тощо. При високих температурах знижується чутливість електродів до домішок у паливі, які є каталітичними отрутами. Ці ПЕ можуть бути використані для комбінованого виробництва електричної і теплової енергії, що дозволяє підвищити їх "сумарний ККД". В якості електролітів у ПЕ цього типу використовують розплави карбонатів лужних металів (при температурі 650°C), зокрема електроліти в матриці з пористої кераміки на основі оксидів металів. У цих ПЕ застосовуються неплатинові електроди – пористий нікель, оксиди нікелю, ферити, манганати. Однак висока корозійна активність електроліту створює проблеми ресурсу роботи електродів і конструкційних матеріалів. У даний час відбуваються дослідні та демонстраційні випробування кількох енергоустановок, одна з яких – установка компанії *MTU* (Німеччина) – має максимальну потужність одного модуля – 280 кВт. Область застосування цих ПЕ – стаціонарні установки на 1 МВт і вище, тому що при менших потужностях робочі значення ККД знизяться до 30-40%. Такі робочі температури дозволяють використовувати паливо безпосередньо в самій комірці. ПЕ на основі розплавленого карбонату вимагають значного часу запуску і не дозволяють оперативно регулювати вихідну потужність, тому основна область їх застосування – великі стаціонарні джерела теплової та електричної енергії. Вони відрізняються високою ефективністю перетворення палива – ККД вихідної електричної енергії – до 60%.

Широке промислове використання такої технології зумовлюють три чинники: електрохімічні процеси в MCFC не вимагають використання дорогих каталізаторів; як паливо може використовуватися цілий ряд натуральних і синтетичних палив; високі температури перебігу процесів не потребують додаткових реформерів для перетворення палива.

Недолік MCFC полягає в тому, що вони не можуть працювати на чистому водні, а високі

температури і хімічні реакції можуть призвести до корозії і прискорити процес зносу елементів конструкції.

Елементи на твердому паливі (MAFC – Metal Air Fuel Cells). В якості електроліту ПЕ використовується гідроксид калію, а паливом можуть слугувати різні метали: алюміній, магній, кальцій, цинк, залізо. Тверді електроліти на основі оксидів металів – це керамічні матеріали, провідність яких обумовлена транспортом іонів по дефектах кристалічної ґратки. Хоча відома досить велика кількість оксидів, які володіють як кисневою, так і водневою провідністю при підвищених температурах, реальні ПЕ створені поки що на основі ZrO, стабілізованого, наприклад, YO, ScO або CaO, які утворюють з ним тверді розчини і забезпечують ефективну іонну провідність по кисневих вакансіях (робоча температура 800-1000°C). Як у розплавлених карбонатних, так і в твердооксидних ПЕ проводиться попередня конверсія природного газу і реально паливом є все той же водень. Але, оскільки конверсія може проводитися безпосередньо в ПЕ, то формально паливом вважають природний газ.

Ці ПЕ вкрай привабливі, тому що можуть використовувати неплатинові каталізатори (пористий нікель на аноді та змішані оксиди – кобальтити, манганіти, хроміти на катоді), що розширює діапазон видів палива. Вони відносно легко вбудовуються в різні енергетичні цикли за рахунок високопотенційного тепла продуктів реакції.

Однак високі температури вимагають вирішення низки конструкційних проблем, таких як, наприклад, "сумісність використовуваних матеріалів при температурному розширенні". Поки що потужність одиничних модулів твердооксидних ПЕ та енергоустановок на їх основі одна з найменших.

Компанія *Westinghouse Electric Corporation* ще в 1992 році побудувала в Японії дві установки потужністю 25 кВт, що працювали на природному газі, і до 1994 року закінчила випробування однієї з установок, яка напрацювала ресурс більше 7000 годин. На іншій установці напрацьовано безперервний ресурс 13000 годин, причому було проведено 11 циклів пусків-зупинок, які є найбільш небезпечними для цих ПЕ через можли-

вість чисто механічних пошкоджень при настільки великому інтервалі зміни температур. Цією ж компанією був досягнутий ресурс роботи ПЕ на основі керамічних елементів трубчастої конструкції більше 50000 годин. Зараз закінчено виготовлення установки на 100 кВт для демонстраційного проекту в Нідерландах і розробляється установка на 250 кВт для експлуатації в США. Елементи трубчастої конструкції мають ряд недоліків: товсті стінки трубок з електроліту, необхідні для надання їм механічної міцності, володіють високим опором, є проблеми комутації одиничних елементів.

Висновки. 1. На основі проведеного аналізу сучасного стану розроблення паливних елементів за умовами експлуатації, електролітом та паливом, що використовується, матеріалом електродів та коефіцієнтом корисної дії процесу зроблено висновок, що передбачуваними сферами застосування ПЕ є малі стаціонарні об'єкти та автомобілебудування, хоча високотемпературні паливні елементи можуть бути застосовані в енергоустановках високої потужності.

2. Можливість прямого одержання електроенергії з природного газу, в тому числі "за домашніх умов", досягнення високих значень ККД (60-70% при комбінуванні твердооксидних ПЕ з газовою турбіною) роблять стаціонарні установки з високотемпературними ПЕ перспективними для "великої енергетики". Проте, на сьогоднішній день даний напрямок залишається швидше теоретичним, оскільки ПЕ на твердому паливі практично не випускаються.

3. Для подальшого широкого впровадження паливних елементів у повсякденне життя, поряд зі здешевленням компонентів, потрібно очікувати нових оригінальних ідей і підходів. Зокрема, великі надії пов'язують із застосуванням наноматеріалів та нанотехнологій; з'явилися повідомлення про конструкцію ПЕ без мембран, у яких рідке паливо подається в ПЕ разом з окиснювачем.

4. Вельми цікавою і багатообіцяючою є також концепція біопаливних елементів, за використання яких колосально розширюється спектр палива, що може бути спожите. Так, наприклад, біопаливні елементи, які працюють у забруднених водах і споживають у якості окиснювача розчинений кисень повітря, а органічні домішки в якості

палива, що і буде предметом наступної частини огляду.

1. Кузьмінський Є.В., Колбасов Г.Я., Тевтуль Я.Ю., Голуб Н.Б. Нетрадиційні електрохімічні системи перетворення енергії. Фото-, термо- та біопаливні елементи. – Чернівці: Рута. – 2003. – 95 с.
2. Кузьмінський Є.В., Гвоздяк П.І., Голуб Н.Б. Біопаливні елементи – проблеми і перспективи розвитку. 1. Ферментні паливні елементи // Мікробіологія і біотехнологія. – 2008. – №3. – С. 21–30.
3. Кузьмінський Є.В., Гвоздяк П.І., Голуб Н.Б. Біопаливні елементи – проблеми і перспективи розвитку. 2. Мікробні паливні елементи // Мікробіологія і біотехнологія. – 2009. – №3. – С. 15–30.
4. Кузьмінський Є.В., Щурська К.О. Біоелектрохімічне генерування водню в мікробному паливному елементі. 1. Загальна частина // Відновлювана енергетика. – 2010. – №4(23). – С. 87–97.
5. Кузьмінський Є.В., Голуб Н.Б., Лесько І.О. Елект-

рохімічні аспекти біоенергетики // Відновлювана енергетика. – 2006. – №3. – С. 87–93.

6. Заявка на корисну модель №201006778 "Спосіб отримання електричної енергії за допомогою мікробного паливного елемента" Голуб Н.Б., Кузьмінський Є.В., Андруховець В.М., дата подання 01.06.2010, позитивне рішення від 01.11.2010.
7. O'Hayre R., Cha S-W., Colella W., Prinz B. F. Fuel Cell Fundamentals. – John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. – 2009. – 576 p.
8. Давтян О. К. Проблема непосредственного превращения химической энергии топлива в электрическую. – М.: Изд-во АН СССР. – 1947. – 237 с.
9. Васильєв О.Д., Баклан В.Ю., Макоордей Ф.В. Керамічні паливні комірки: український досвід // Вісник Одеського національного університету. – 2010. – Химия. – Т. 15, вып. 3. – С. 98–106.
10. Перфильев М.В., Демин А.К., Кузин Б.Л., Литилин А.С. Высокотемпературный электролиз газов. – М.: Наука. – 1988. – 232 с.
11. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 264 с.

**ХІ МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА
ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВОСТІ-2013**

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА І ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ • ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА • СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА В ЕНЕРГЕТИЦІ
ПРОМИСЛОВЕ ОСВІТЛЕННЯ • АСУ ТП, КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ І ДІАГНОСТИКА • КАБЕЛЬ. АРМАТУРА. ДРОТИ

**ХІ МІЖНАРОДНИЙ ФОРУМ
ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС УКРАЇНИ:
СЬОГОДЕННЯ ТА МАЙБУТНЄ**



МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, 02660
Київ, Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"
тел./факс: (044) 201-11-57
e-mail: nsilova@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua
www.tech-expo.com.ua



ОРГАНІЗАТОРИ:
Міністерство енергетики
та вугільної промисловості України
Міжнародний виставковий центр

Офіційне видання форуму: 
Технічний партнер: 

**24-26
вересня**