

застосовувати в якості джерел живлення автомобільного транспорту.

1. Газогенератор УГК-150 на дровах: [Електронний ресурс] // Фирма "Наша Энергия", 2005-2010. URL: <http://www.gazogenerator.ru> (Дата звернення: 18.02.2013).

2. The GEK project: [Електронний ресурс] // ALL Power Labs, 2002-2013. URL: <http://www.gekgasifier.com/> (Дата звернення: 18.02.2013).

3. Victory grid CHP gasifier: [Електронний ресурс] // Victory gasworks, 2007-2012. URL: <http://gasifier.wpengine.com/personal-energy-grid> (Дата звернення: 18.02.2013).

4. Автомобиль на дровах: [Електронний ресурс] // Автомобильный завод "Урал", 1997-2012. URL: <http://www.uralaz.ru/company.php?id=60> (Дата звернення: 18.02.2013).

5. Кураев А.В., Семенов П.Л. Автомобиль ЗиЛ – 130 и его модификации: Инстр. по эксплуат. – М.: Машиностроение, 1974. – 148с.

6. Токарев Г.Т. Газогенераторные автомобили. – М.: Изд. Мин. ком-хоз. РСФСР, 1948. – 160 с.

7. Юдушкин Н.Г. Газогенераторные трактора / Н.Г. Юдушкин. – М.: Машгиз, 1955. – 244 с.

8. Мезин И.С. Транспортные газогенераторы / И.С. Мезин – М.: Сельхозгиз, 1948. – 311 с.

9. Черномордик Б.М. Теория и расчет транспортных газогенераторов / Б.М. Черномордик. – М.: Свердловск, ГНТИ НКТП СССР, 1943. – 176 с.

10. Кюнэ Г., Кох Ф. Испытания автомобильных газогенераторов / Г. Кюнэ, Ф. Кох; пер. с нем. П. П. Москвина; ред. М. Д. Артамонова. – М.: Гострансехиздат, 1938. – 84 с.

11. Коллеров Л.К. Газомоторные установки / Л.К. Коллеров – М.: Машгиз, 1951. – 240 с.

12. Енергетичні палива: Навч. посіб. / В.М. Горбов; Укр. держ. мор. техн. ун-т ім. адмірала Макарова. – Миколаїв, 2003. – 328 с.

13. Забарний Г.М., Кудря С.О., Кондратюк Т.Г., Четверик Г.О. Термодинамічна ефективність та ресурси рідкого біопалива України. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2006. – 226 с.

14. Кудря С.О., Тучинський Б.Г., Щокін А.Р. Перспективи зміщення традиційних паливно-енергетичних ресурсів за рахунок використання енергії, виробленої на об'єктах альтернативної енергетики // Енергосбереження. – 2007. – № 1. – С. 14-23.

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. II. Передбачувані області застосування, біотехнологічні перспективи

В огляді розглянуто сучасний стан, області застосування, наявні проблеми та визначено біотехнологічні перспективи розвитку паливних і біопаливних елементів.

В обзоре рассмотрены современное состояние, области применения, имеющиеся проблемы и определены биотехнологические перспективы развития топливных и биотопливных элементов.

Як уже відзначалось у першій частині огляду [1], паливний елемент (ПЕ), як і будь-який рукотворний пристрій, не є досконалим, але він має певні переваги, які роблять подальше інтегрування ПЕ в різноманітні сфери застосування вельми привабливим. Серед основних переваг можна виділити найбільш суттєві. У ПЕ немає жорсткого обмеження на коефіцієнт корисної дії (ККД), як у теплових машин (ККД циклу Карно є максимально можливим ККД серед усіх теплових машин з

такими ж мінімальними і максимальними температурами). Високий ККД досягається завдяки прямому перетворенню енергії палива в електроенергію. Тоді як у дизель-генераторних установках паливо спочатку спалюється, отриманий газ або пара обертає турбіну або вал двигуна внутрішнього згоряння, які в свою чергу обертають електричний генератор. Результатом стає ККД максимум в 42%, частіше ж становить 35-38%. В існуючих ПЕ максимальний ККД становить

60-80%, проте ККД ПЕ, які використовуються сьогодні, сягає лише 35-45%. При подальшій розробці технологій, заснованих на використанні ПЕ, планується збільшення їх ККД до 70-85%; енергія виробляється безперервно за наявності в елементі пального; як продукти ПЕ, так і він сам є екологічно чистими, вони не завдають шкоди навколишньому середовищу, що є досить суттєвою перевагою у наш час; ПЕ працює безшумно; ПЕ може використовувати будь-яке паливо, в якому міститься водень або карбон; в ПЕ відсутні рухомі частини, за рахунок чого суттєво збільшується термін їх експлуатації порівняно з іншими джерелами енергії; ПЕ можуть використовуватися за досить несприятливих умов (забруднене оточуюче середовище, низькі температури і т.п.).

До недоліків паливного елемента можна віднести наступні: ПЕ зараз ще потребують порівняно великих витрат на своє виробництво та експлуатацію; наприклад, каталізatori, що використовуються в них, є досить дорогими; хоча паливо, що використовується в ПЕ, є доволі різноманітним, але транспортна база для нього поки що розвинута слабо.

Високотемпературні ПЕ непридатні для використання в автомобілях, оскільки їхня робоча температура перевищує 950°C. Для низькотемпературних ПЕ потрібні ефективні каталізatori, що призводить у даний час до необхідності використання платини або платинових металів. Однак, застосування платини не дозволить широко використовувати ПЕ на практиці.

Проблеми, пов'язані з платиною, наступні. По-перше, ціна платини і нестача її ресурсів. Сучасні оцінки вартості компонентів ПЕ приводять до значень від 200 до 2000 доларів США на кВт виробленої енергії [2]. При цьому на кожен кВт необхідно до 2 г платини. Тобто двигун середнього автомобіля потужністю 50 кВт буде коштувати 10000-100000 доларів США і буде включати до 100 г платини. Світове виробництво автомобілів досягло в 2002 р. 60 млн одиниць. Для того щоб обладнати всі автомобілі ПЕ, потрібно 6000 тонн платини. Навіть якщо вміст платини буде знижено до теоретичної межі, що становить 0,2 г/кВт, платини буде потрібно набагато більше її річного видобутку (190 тонн). А кількість платини, яка

необхідна для заміни всіх двигунів внутрішнього згоряння на ПЕ, порівнянна з її світовим запасом (100000 тонн), при тому, що існує також потреба у ПЕ для інших видів транспорту і для домашніх автономних джерел електроенергії. По-друге, чутливість до домішок окису вуглецю і сірковмісних сполук. Платинові каталізatori отруюються окисом вуглецю в концентрації більше 0,01%. Так, при вмісті окису вуглецю 0,1% платиновий електрод незворотно втрачає 99% активності за 10 хвилин. У той же час технічний водень, одержаний конверсією вуглеводнів, може містити до 2% CO, що приводить до необхідності додаткового очищення.

Впровадженню ПЕ на транспорті також заважає відсутність водневої інфраструктури. Більшість елементів при роботі виділяють ту чи іншу кількість тепла. Це вимагає створення складних технічних пристроїв для його утилізації (парові турбіни та ін.), а також організації потоків палива і окиснювача, систем управління відібраною потужністю, забезпечення довговічності мембран, запобігання отруєнню каталізatori деякими побічними продуктами окиснення палива та інших завдань. Але при цьому ж висока температура процесу дозволяє виробляти теплову енергію, що істотно збільшує ККД енергетичної установки. Паливні елементи через низьку швидкість хімічних реакцій мають значну інертність і для роботи в умовах пікових або імпульсних навантажень вимагають певного запасу потужності або застосування інших технічних рішень (використання суперконденсаторів, акумуляторних батарей). Також існує проблема отримання і зберігання водню. По-перше, він повинен бути достатньо чистим, щоб не сталося швидкого отруєння каталізatori; по-друге, досить дешевим, щоб його вартість була рентабельною для кінцевого споживача.

Існує безліч способів виробництва водню, але в даний час близько 50% водню, виробленого в усьому світі, отримують із природного газу. Всі інші способи поки що дорого коштують. Існує думка, що зі зростанням цін на енергоносії вартість водню також має зростати, оскільки він є вторинним енергоносієм. Але собівартість енергії, виробленої з відновлюваних джерел, постійно знижується. Наприклад, середня ціна на електро-

енергію в США зросла в 2007 р. до 0,09 \$ за кВт·год, тоді як собівартість електроенергії, виробленої з вітру, становить 0,04-0,07 \$ США. В Японії кіловат-година електроенергії коштує близько 0,2 \$ США, що можна порівняти з вартістю електроенергії, виробленої фотоелектричними елементами. Оскільки у водні, добутому з природного газу, присутній СО і сірководень, тому для зменшення отруєння каталізатора необхідно підвищити температуру ПЕ. Вже при температурі 160°C у паливі може бути присутній лише 1% СО. Тобто зі зростанням цін на енергоносії виробництво водню електролізом води стає більш конкурентоспроможним. Але на цьому недоліки ПЕ з платиновими каталізаторами не закінчуються. Сюди слід віднести високу вартість платини, ціни на яку постійно зростають, складності з очищенням водню від вищезазначених домішок і, як наслідок, дорожнечу газу, обмежений ресурс елемента внаслідок інгібування каталізатора домішками. Крім того, платина – невідновлюваний ресурс; вважається, що її запасів вистачить на 15-20 років виробництва ПЕ.

Обнадійливу перспективу щодо вирішення цих проблем відкривають останні роботи вчених. Так, біметалічні нанодендрити виявилися в 2,5-5 разів ефективнішими нинішніх комерційних каталізаторів. Про це важливе досягнення повідомив Юнань Ся (Younan Xia) з університету Вашингтона в Сент-Луїсі (Washington University in St. Louis), який отримав новий матеріал разом із колегами по університету, а також фахівцями з Національної лабораторії Брукхевена (Brookhaven National Laboratory) [3].

Передбачувані області застосування. У числі виробників ПЕ особливо активними є такі компанії: General Motors (США), Ballard Power Systems (Канада), FCFCP (Китай), Cellkraft AB (Швеція), European fuel cell GmbH (Німеччина), Heliocentris Energiesysteme GmbH (Німеччина), Honda (Японія), h-tec Hydrogen Energy Systems (Німеччина), New Japan Eco-System Corporation (Японія), Protonex Technology Corporation (США), UTC Power (США), Astris Energi Inc, (Канада), Fuji Electric (Японія), Korea Gas (Корея), Acumentrics (США), Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL, Австралія), Mesoscopic Devices LLC (США), Siemens

Westinghouse (Німеччина), Ansaldo Fuel Cells SpA (Італія), FuelCell Energy (США), GenCell Corporation (США), Angstrom, Aquafairy, Teckion, Millennium Cell, МТІ, Toshiba.

Як уже відмічалось, першими ринками ПЕ були "закриті" сектори оборонного комплексу: авіація і космос, надводний і підводний флот, армійські засоби зв'язку. Мілітаризація технології була також пов'язана з високою вартістю ПЕ, при якій комерційний успіх на цивільних ринках був неможливий. Тепер перспектива ПЕ пов'язана з великими можливими ринками збуту, що залежать від потужності ПЕ.

Бум навколо водневої енергетики виник за часів активного освоєння космічного простору, і перше практичне використання ПЕ знайшли саме на космічних кораблях. Вони були основними енергоустановками для живлення бортової апаратури і забезпечували космонавтів водою і теплом. У 60-ті роки були створені ПЕ потужністю до 1 кВт для американських програм "Джеміні" та "Аполлон", у 80-ті – 10-кіловатні для "Шатла". Ракетно-космічний комплекс "Енергія" розробляв РАFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) елементи для радянської місячної програми. З 1987 року по 2005 "Енергія" виготовила близько 100 паливних елементів, які напрацювали сумарно близько 80000 годин. Під час робіт над програмою "Буран" досліджувалися лужні AFC (Alcaline fuel cell) елементи. На "Бурані" були встановлені 10-кіловатні паливні елементи.

Наступний етап бурхливого розвитку ПЕ почався в 90-ті роки минулого століття і продовжується зараз. Він викликаний потребою в нових ефективних джерелах енергії у зв'язку, з одного боку, з глобальною екологічною проблемою викиду парникових газів при згорянні органічного палива та, з іншого боку, з вичерпанням запасів такого палива. Оскільки в ПЕ кінцевим продуктом згоряння водню є вода, то вони вважаються найбільш чистими з точки зору впливу на навколишнє середовище. Основна проблема полягає тільки в знаходженні ефективного і недорогого способу отримання водню і недорогого та високо-ефективного каталізатора. Мільярдні фінансові вкладення в розвиток ПЕ і генераторів водню повинні привести до технологічного прориву і зро-

бити реальністю їх використання у повсякденному житті (в елементах для стільникових телефонів, в автомобілях, на електростанціях). Вже у даний час такі автомобільні гіганти, як "Хонда", "Даймлер Крайслер", "Дженерал Моторс" демонструють легкові автомобілі та автобуси, що працюють на ПЕ потужністю 50 кВт, розроблені демонстраційні електростанції на ПЕ з твердооксидним електролітом потужністю до 500 кВт.

У ті ж самі роки побудовано електростанції потужністю 100 кВт на фосфорно-кислотних ПЕ. В Японії та США є дослідні 10-мегаватні електростанції. Від 90-х років і донині триває розробка ПЕ потужністю від 1 кВт до 10 МВт для стаціонарної автономної енергетики. Крім того, тепер розробляються портативні джерела електроенергії (потужністю менше 100 Вт) для комп'ютерів, стільникових телефонів, фотоапаратів тощо. Як паливо у них використовується спирт (метанол), з якого одержують водень.

Гарні перспективи розвитку також має використання ПЕ у транспортній сфері. Саме вони "вдихнули нове життя" в розробку технологій на базі ПЕ. Особливо актуальним це питання стає у світлі сьогоденних проблем, пов'язаних із паливом, зокрема з бензином. Перший автомобіль на ПЕ був продемонстрований у 1994 році компанією Daimler-Benz. У 2004 році компанія розробила більш досконалу модель NECAR-4. Автомобіль на основі ПЕ має динаміку, здатну конкурувати з машинами на бензинових або дизельних двигунах. Німецька філія компанії Ford Forschungszentrum Aachen у співпраці з 40 університетами 12 країн створила модель Mondco P2000 HFC на платформі сімейного седану Ford Taigus. Це лише декілька фактів, але навіть вони дають можливість задекларувати, що вигідний з екологічної точки зору автомобіль на ПЕ – вже не мрія, а реальність. Проте і в цій сфері існують проблеми видобування, зберігання і транспортування пального для ПЕ. Також існує проблема заправки таких автомобілів: хоча заправочні станції вже існують у Німеччині, США, Канаді, Японії, але поки що вони мають

лише експериментальний характер і не розраховані на велике навантаження.

На сьогодні більше 30 тисяч компаній, корпорацій, інститутів і національних лабораторій за кордоном працюють над створенням нових мініатюрних енергетичних установок із використанням ПЕ, і з кожним роком, при зростанні інвестицій та підвищенні якості їх виготовлення, кількість останніх зростає. Розробленням ПЕ займаються Casio, MTI Micro Fuel Cells, Motorola, Panasonic, Samsung, Smart Fuel Cells, Toshiba та інші. Такий інтерес до ПЕ пояснюється можливістю їх використання в комп'ютерах потужністю 5-50 Вт, мобільних телефонах потужністю 1-3 Вт, побутовій техніці (відеомагнітофонах, відеокамерах тощо) потужністю 2-5 Вт. Японська компанія Casio представила ПЕ для використання в ноутбуках, який розміщується в петлях, що з'єднують клавіатуру і дисплей. Маса елемента удвічі менша порівняно з масою літій-іонної батареї. У якості пального використовується метиловий спирт, причому однієї капсули вистачає більш ніж на 20 годин безперервної роботи.

Для великої енергетики перспективним є також використання ПЕ для накопичення енергії у великих обсягах (наприклад, отримання водню). Сонячна енергія та енергія вітру, які є відновлюваними джерелами енергії, нерівномірно розподілені по всій нашій планеті. Для використання цієї енергії необхідні акумулятори з великою ємністю для запасаання енергії в тій чи іншій формі. Одним із варіантів такого накопичувача і є ПЕ у поєднанні з електролізерами і газгольдерами (резервуар для накопичення і зберігання великого об'єму газу). Одним із вирішальних факторів, що говорить на користь ПЕ, є також їх економічність.

Як підсумок, можна виділити такі основні області використання ПЕ як автономна енергетика, велика енергетика, автомобільний транспорт, морський транспорт, залізничні локомотиви, гірська, сільськогосподарська та будівельна техніка, вантажно-розвантажувальна техніка (складські автотранспортні засоби), мобільні та комп'ютерні технології. Приклади використання ПЕ у різних галузях наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Сфери застосування і характеристика паливних елементів

Сфера застосування	Характеристика ПЕ	
	Номінальна потужність	Приклади використання
Стационарні установки	5-250 кВт і вище	Автономні джерела тепло- та електропостачання житлових, громадських та промислових будівель, джерела безперебійного живлення, резервні та аварійні джерела електропостачання (лікарні, пологові будинки, оборона і т.д.)
Мобільні установки	25-150 кВт	Автомобілі (дослідні зразки створили, наприклад, DaimlerCrysler, FIAT, Ford, General Motors, Honda, Hyundai, Nissan, Toyota, Volkswagen, VA3), автобуси (наприклад, MAN, Neoplan, Renault) та інші транспортні засоби, військові кораблі та субмарини
Портативні установки	1-50 кВт	Космічні кораблі і супутники, вантажні та залізничні рефрижератори, інвалідні коляски, візки для гольфу, дорожні покажчики тощо
Мініатюрні установки (мікропристрої)	1-500 Вт	Мобільні телефони, ноутбуки, кишенькові комп'ютери (PDA), побутова портативна техніка (відеомагнітофони, відеокамери тощо), сучасні військові прилади

Біотехнологічні перспективи паливних елементів. На даний момент вельми перспективним бачиться біотехнологічний шлях просування на ринок ПЕ за рахунок застосування ферментів у якості катализатора. Ферменти є відновлюваним матеріалом, який можна виробляти в необмежених кількостях. Вони дешеві, не отруюються основними домішками в дешевому паливі, володіють специфічними перевагами. Нечутливість ферментів до CO і сірководню зробила можливим отримання водню з біологічних джерел, наприклад, при конверсії органічних відходів.

Вчені вже навчилися вбудовувати різні типи бактерій у ПЕ, змушуючи їх виробляти струм. Експериментатори певним чином вклинюються в природні електрохімічні процеси, які супроводжують дихання і харчування бактерій, щоб направляти електрони, вироблені бактеріями, в зовнішній ланцюг [4–7].

Такий тип ПЕ називають біопаливними елементами (БПЕ, biofuel cell – BFC) – це пристрої, в яких енергія хімічних зв'язків безпосередньо перетворюється в електричний струм у результаті біохімічних перетворень. Біопаливні елементи потенційно можуть вирішити, окрім енергетичної, й екологічні проблеми утилізації відходів, оскільки ферментні системи мікроорганізмів здатні до деструкції практично всіх природних і синтетичних сполук. Наприклад, при роботі таких установок може відбуватися очищення стоків і одночасна генерація електричного струму. Так, за прогнозом американських вчених із Пенсільванського

університету масштабне використання БПЕ для очищення стічних вод з одночасним отриманням електричної енергії дозволить США щорічно економити близько 25 млрд доларів [8]. Своє застосування БПЕ можуть знайти і в електроніці та медицині, оскільки ці галузі вимагають мініатюрних джерел енергії, які здатні витримувати тривалу експлуатацію без втручання людини.

За біоактивною складовою БПЕ поділяють на ферментні паливні елементи (ФПЕ, enzymatic fuel cell – EFC) та мікробні паливні елементи (МПЕ, microbial fuel cell – MFC). У першому випадку застосовуються виділені ферменти, а в другому – цілі мікробні клітини. Незважаючи на певні переваги та недоліки, кожен із цих типів БПЕ здатен зайняти свою нішу у вирішенні енергетичних проблем. Для ФПЕ необхідно відмітити ряд недоліків: вони мають високу вартість, оскільки отримання, виділення і очищення ферментів пов'язане із суттєвими матеріальними і часовими витратами; мають обмежений термін роботи у зв'язку з постійною інактивациєю ферментів; ферментам притаманна вузька субстратна специфічність і схильність до інгібування, що обмежує їх застосування для мультикомпонентного середовища (наприклад, відходів). Усе перераховане накладає достатньо жорсткі вимоги до апаратурного оформлення ФПЕ і до складу субстратів. На відміну від чистих ферментів, цілі мікроорганізми у МПЕ здатні до саморегуляції, тому можуть адаптуватися до субстратів змінного складу і самостійно коригувати інгібування ферментів. На нашу думку,

сама можливість застосування МПЕ для очищення стоків та простота конструкції надає їм переваги у порівнянні з ферментними паливними елементами.

Так, Кайлі Вінсент (Kylie Vincent) та її колеги з Оксфорда (University of Oxford) створили ПЕ з використанням ферментів, який у багато разів дешевший, ніж ПЕ традиційної конструкції. Перший зразок водневого ПЕ на ферментах поки що виробляє напругу всього в 0,7 В і слабенький струм – достатній лише для приведення в дію цифрових годинників. Проте потенційно ця технологія може забезпечити енергією різноманітну портативну електроніку. В цьому елементі немає ні платинового каталізатора, ні обмінної мембрани. Британські вчені використали два недорогих ферменти: один взятий від бактерії (гідрогеназа), а інший – від гриба (лакказа), які здатні виступати каталізаторами тих же самих реакцій. Кожен електрод покритий одним із цих двох ферментів. А оскільки кожен фермент прискорює саме свою реакцію, даний ПЕ не потребує і мембрани, тому що обидва компоненти (повітря і водень) у ньому можуть вільно змішуватися [9].

Дослідники з Тихоокеанської північно-західної національної лабораторії Pacific Northwest National Laboratory побудували перший біологічний паливний елемент (БПЕ), що працює на основі метаболізму бактерій, але без самих бактерій. Експериментатори виділили із зовнішньої мембрани бактерії *Shewanella oneidensis* білки під назвою с-тип цитохром А (с-type cytochrome А або ОмсА), очистили їх і перенесли на підкладку з мінералу гематиту. Підживлюючи ОмсА природним для клітин паливом (нікотинамідаденіндинуклеотидом – NADH), автори дослідження отримали електроенергію. Використання чистого білка замість бактерій відкриває можливість зменшення розмірів БПЕ і, тим самим, робить їх придатними для приведення в дію крихітних електронних пристроїв. Правда, поки що пристрій видає піковий струм лише кілька секунд, зате величина струму порівнянна з такою для раніше створених звичайних БПЕ без мембрани [10].

Вчені на чолі з Матсхіко Нісізавою (Matsuhiko Nishizawa) з університету Тохоку (Tohoku University) створили мініатюрний БПЕ. У

його конструкції не використовуються жодні отруйні речовини, що відкриває шлях для застосування приладу в штучному серці та інших імплантатах. БПЕ використовує енергію глюкози, розчиненої в крові. Експериментальний елемент має розмір крихітної монети і генерує потужність 0,2-10-3 Вт, що є достатнім, щоб приводити в дію імплантований датчик рівня цукру в крові [11].

Вчені з університету Техасу в Остіні (University of Texas at Austin – UT) змусили виноград виробляти електроенергію завдяки застосуванню БПЕ. Елемент складається з двох вуглецевих електродів (катода і анода), кожен з яких тонший від людської волосини, і вилучає енергію, що виробляється рослинами в результаті метаболізму глюкози і кисню. Цей БПЕ поки що виробляє всього лише 2,4 мкВт, тобто для звичайної лампочки їх знадобиться кілька мільйонів. Краще всього пристрій працює там, де багато глюкози – як у винограді. Тепер вчені намагаються змусити БПЕ працювати в комах або маленьких тваринах, правда випробування на кониках нічого не дали. У майбутньому вдосконалені БПЕ могли б забезпечувати живлення крихітних автономних датчиків і чипів, але говорити про це поки що надто рано [12].

Як уже відмічалось, мікроорганізми можуть ефективно виробляти електрику зі стічних вод, і тут цікаво відмітити наступну особливість таких БПЕ. Так, Віллі Верстрет (Willy Verstraete) і його колеги з бельгійського університету Гента (Universiteit Ghent) побудували дослідну установку, в якій з'єднали шість оригінальних БПЕ послідовно або паралельно, щоб перевірити здатність мікробної колонії генерувати і пропускати через себе струм. У якості живих генераторів застосували групу з кількох видів бактерій. Головне відкриття вчених полягає в тому, що в процесі роботи їх блоку (а апарат тестували більше 200 діб) у мікробній асоціації, що жила всередині установки, пройшла активна боротьба за оволодіння доступними ресурсами, в результаті чого процентний склад асоціації (за видами) різко змінився. Так, якщо спочатку там було порівняно багато видів бактерій родів *Geobacter* і *Shewanella*, то в кінці досліду в колонії переважа-

ли бактерії виду *Brevibacillus agri*, що виявилися найбільш продуктивними в справі конвертуванні органічних відходів в електрику. Максимальні параметри установки також були досягнуті в кінці експерименту, коли більш ефективні бактерії відвоювали простір і їжу у менш ефективних побратимів. На початку ж експерименту вихідні дані установки були приблизно в 3 рази гіршими. Так що сталося так, ніби вона самотужки оптимізувалася [13].

Висновки. 1. Виходячи з виконаного аналізу переваг і недоліків ПЕ та БПЕ, можна визначити такі основні області використання ПЕ як автономна енергетика, велика енергетика, автомобільний транспорт, морський транспорт, залізничні локомотиви, гірська, сільськогосподарська та будівельна техніка, вантажно-розвантажувальна техніка (складські автотранспортувачі), мобільні та комп'ютерні технології.

2. Розгляд сучасного стану розроблення ПЕ та БПЕ засвідчив, що ці електрохімічні енергоперетворюючі пристрої є досить вигідним і надійним джерелом виробництва енергії, їх конструкція доволі проста і надійна, а паливна база багата і різноманітна. І хоча сьогодні для їх широкого практичного застосування ще не всі проблеми вирішені, але перспективи використання ПЕ і, перш за все, БПЕ є досить обнадійливими, а розвиток технологій на їх основі обіцяє людській спільноті багато корисних нововведень.

1. Кузьмінський Є.В., Щурська К.О., Самаруха І.А. Паливні елементи. І. Сучасний стан розроблення // Відновлювана енергетика. – 2013. – №1. – С. 90–96.

2. O'Hayre R., Cha S-W., Colella W., Prinz B.F. Fuel Cell Fundamentals. – John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. – 2009. – 576 p.

3. Lim B., Jiang M., Camargo P. H.C., Cho E.C., Tao J., Lu X., Zhu Y., Xia Y. Pd-Pt Bimetallic Nanodendrites with High Activity for Oxygen Reduction // Science. – 2009. – Vol. 324. – № 5932. – P. 1302–1305.

4. 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.

5. Кузьмінський Є.В., Голуб Н.Б., Лесько І.О. Електрохімічні аспекти біоенергетики // Відновлювана енергетика. – 2006. – №3. – С. 87–93.

6. 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.

7. 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.

8. Logan B.E. Simultaneous wastewater treatment and biological electricity generation // Wat. Sci. Technol. – 2005. – № 52(1-2). – P. 31–37.

9. Vincent K.A., Barton S.C., Canters G.W., Heering H.A. 'Electrocatalysis for fuel cells at protein-modified electrodes' in Koper, M. (Ed.) Fuel Cell Catalysis: A Surface Science Approach. – John Wiley & Sons. – USA. – 2009. – 720 p.

10. Chen B., Markillie L.M., Xiong Y., Mayer M.U., Squier T.C. Increased Catalytic Efficiency Following Gene Fusion of Bifunctional Methionine Sulfoxide Reductase Enzymes from *Shewanella oneidensis* // Biochemistry. – 2007. – №46. – P.14153–14161.

11. Sato F., Togo M., Islam M. K., Matsue T., Kosuge J., Fukasaku N., Kurosawa S., Nishizawa M. Enzyme-Based Glucose Fuel Cell Using Vitamin K3-Immobilized Polymer as an Electron Mediator // Electrochemistry Communications. – 2005. – №7. – С. 643–647.

12. Mano N., Mao F., Heller A. Characteristics of a miniature compartment-less glucose-O₂ biofuel cell and its operation in a living plant // Journal of the American Chemical Society. – 2003. – № 125 (21). – P. 6588–6594.

13. Aelterman P., Rabaey K., Pham H. T., Boon N., Verstraete W. Continuous Electricity Generation at High Voltages and Currents Using Stacked Microbial Fuel Cells / Environ. Sci. Technol. – 2006. – 40 (10). – P. 3388–3394.