

НАУКОВІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ ПОЛІТИКИ

УДК 332.873: 658.18

С.В. ШУЛЬЖЕНКО канд. техн. наук, **В.А. ДЕНИСОВ**
Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172,
м. Київ, 03680, Україна

КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНІСТЬ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВІДНОСНО ТРАДИЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Проаналізовано рівень поточного технологічного розвитку паливних елементів, які можуть бути використані для стаціонарного виробництва електричної та теплової енергії. Наведено досягнуті на сьогодні техніко-економічні показники карбонатно-розплавних паливних елементів (molten-carbonate fuel cells — MCFC). Наведено формулювання математичної моделі життєвого циклу, з використанням якої здійснені варіантні розрахунки собівартості та відпускнуго тарифу на електричну та теплову енергію, що виробляється MCFC-технологічною установкою. Отримані результати розрахунків свідчать про потенційну конкурентоспроможність паливних елементів, зокрема, MCFC-технологічних установок відносно АЕС та газотурбінних установок у найближчій перспективі.

Ключові слова: паливний елемент, економічна ефективність, математична модель, електрична енергія, тепла енергія.

Обсяги і темпи впровадження новітніх та перспективних технологій виробництва електричної та теплової енергії в сучасних умовах регулювання діяльності енергетики, а саме за умов застосування ринкових принципів її регулювання, суттєво залежать від економічної привабливості їх використання впродовж життєвого циклу. Крім економічної ефективності важливим є також врахування фізико-технічних особливостей технології, що розглядається, оскільки це дозволяє її коректно порівняти з іншими, альтернативними, енергетичними технологіями. Насамперед, до цих, фізико-технічних, показників відносяться режимні особливості роботи технології. У випадку технології генерації електроенергії — це здатність змінювати потужність генерації відповідно до потреби, а також вид та обсяги палива, що споживається в процесі роботи технології. Саме з ураху-

ванням цих факторів у статті проаналізована конкурентоздатність технологій, що побудовані з використанням паливних елементів.

За принципом дії паливний елемент є генератором постійного електричного струму, який утворюється внаслідок хімічних реакцій за участю водню, що потенційно дозволяє його застосування з використанням усякої хімічної сполуки, до складу якої входить водень. Різні технології застосування паливних елементів дозволяють генерувати електричну енергію в широкому діапазоні — від декількох Вт до сотень кВт і, навіть більше, що зумовлює перспективи їх використання, зокрема і для промислового виробництва електроенергії. Комерціалізація технологій із застосуванням паливних елементів для стаціонарного генерування електроенергії особливо стрімко відбувається [1] впродовж останніх п'яти років (див. рис. 1). Серед різноманітних типів паливних елементів для використання їх як стаціонарно-

© С.В. ШУЛЬЖЕНКО, В.А. ДЕНИСОВ, 2014



Рис. 1. Обсяг продажу та встановлена потужність паливних елементів у світі

го джерела енергії особливо привабливими визнаються, зокрема, карбонатно-розплавні, що зумовлено, зокрема, відсутністю необхідності використання в них дорогих каталізаторів, наприклад, платинових.

Одночасно з нарощуванням темпів використання паливних елементів у світі відбувається також зниження питомої вартості встановленої потужності цієї технології (табл. 1), що за умов збереження тенденції до їх подальшого здешевлення зумовлює перспективність поширення цієї технології в майбутньому.

Оскільки для роботи паливного елемента

необхідний водень, то в ролі вхідної сировини може використовуватись теоретично будь-яка хімічна сполука, що містить його в собі. На сьогодні для використання в МСFC перспективними визнаються природний газ, а також біогаз, який, наприклад, може бути отриманий внаслідок анаеробного зброджування біологічних відходів, зокрема, на міських станціях аерації. Незважаючи на суттєву екологічну перевагу енергетичного використання біогазу зі станцій аерації як сировини для МСFC, необхідність його очищення від агресивних та токсичних сполук, таких як H_2S і важких мета-

Таблиця 1 – Динаміка розвитку технології карбонатно-розплавних паливних елементів

Рік	Питома вартість, дол. США/кВт	Максимальна потужність, кВт	Джерело інформації
2007	12 000 – 18 000	200 – 300	IEA Energy Technology Essentials
2009	5000 – 5500	Від 1000 та більше	Journal of Electrochemical Science and Technology, 2010
2011	3500	100 – 1000 та більше	Ballard Power Corporation

лів, негативно впливає як на економічну ефективність використання паливних елементів, так і на їх технологічну працездатність. Внаслідок цього в багатьох пілотних установках у ролі сировини використовується природний газ.

Для розрахунку техніко-економічних показників енергетичного використання паливних елементів була використана достатньо опрацьована технологічна схема їх компонов-

ки, яка нині використовується для комерціалізації (рис. 2). Як приклад конкретної системи, що має бути запроваджена та використовуватись вибрано установку потужністю 4×300 кВт, виробником якої є компанія FuelCell Energy Solutions GmbH, і яка планується до введення в експлуатацію в 2014 році (рис. 3) [2].

Для розрахунків були використані такі вхідні дані (див. табл. 1 та [3]):



Рис. 2. Технологічна блок-схема функціонування MCFC-технологічної установки на природному газі



Рис. 3. Вигляд установки з встановленою потужністю 4×300 кВт

- Питомі інвестиції 2000–5000 дол. США/кВт, в тому числі:
 - батарея 2000 – 4000 дол. США/кВт,
 - інфраструктура 1000 дол. США/кВт.
- Зниження продуктивності батареї 2,2% на рік.
- Тривалість служби об'єкта – 20 років, заміна батареї через кожні 5 років.
- Відрахування на заміну батареї 400 – 1000 дол. США/рік.
- Споживання природного газу 256 м³/год.
- Потужність установки 1200 кВт.
- Вартість природного газу 300 – 600 дол. США/тис м³.
- Кількість персоналу – 6 чоловік, зарплата 11000 дол. США/рік.
- Коефіцієнт використання встановленої потужності впродовж року – 90%.
- Корисний відпуск електроенергії 47%, теплової енергії 27%.
- Рівень інфляції 3%, процентна ставка дисконту 5%.

Розрахунки здійснювались з використанням наступної математичної моделі, яка враховує технологічні особливості експлуатації об'єкта протягом всього його життєвого циклу.

Початкові інвестиційні витрати:

$$I_1 = (C_{\text{обладнання}} + C_{\text{встановлення}}) \times P_0,$$

де I_1 – сумарні витрати на обладнання та встановлення (дол. США);

$C_{\text{обладнання}}$ – питома вартість обладнання (дол. США/кВт);

$C_{\text{встановлення}}$ – питома вартість встановлення (дол. США/кВт);

P_0 – початкова електрична потужність (кВт).

Операційні витрати на паливо:

$$P_{\text{загальна}} = P_0 / \text{ККДе},$$

$$v_{\text{палива}} = P_{\text{загальна}} / E_{\text{палива}},$$

$$V_{\text{палива}} = v_{\text{палива}} \times T_{\text{рік}} \times \text{КВВП},$$

$$K_{n+1}^{\text{інфляції}} = K_n^{\text{інфляції}} \times K_1^{\text{інфляції}},$$

$$I_1^{\text{палива}} = V_{\text{палива}} \times C_{\text{палива}}, \quad I_n^{\text{палива}} =$$

$$= I_1^{\text{палива}} / K_n^{\text{інфляції}},$$

$$I_{\Sigma}^{\text{палива}} = \sum_{n=1}^N I_n^{\text{палива}},$$

де $P_{\text{загальна}}$ – сумарна електрична плюс теплова потужність, кВт;

$v_{\text{палива}}$ – питомі витрати палива, м³/год;

$V_{\text{палива}}$ – витрати палива за рік, м³;

$K_1^{\text{інфляції}}, K_n^{\text{інфляції}}$ – коефіцієнти інфляції за перший та n -й роки;

$I_1^{\text{палива}}, I_n^{\text{палива}}$ – вартість палива за перший та n -й роки, дол. США;

$I_{\Sigma}^{\text{палива}}$ – сумарна вартість палива за період, що моделюється, дол. США;

$C_{\text{палива}}$ – ціна палива, дол. США.

Операційні витрати на воду:

$$V^{\text{води}} = v^{\text{води}} \times T_{\text{рік}} \times \text{КВВП},$$

$$I_1^{\text{води}} = V^{\text{води}} \times C^{\text{води}},$$

$$I_n^{\text{води}} = I_1^{\text{води}} / K_n^{\text{інфляції}}$$

$$I_{\Sigma}^{\text{води}} = \sum_{n=1}^N I_n^{\text{води}},$$

де $v^{\text{води}}$ – питомі витрати води, м³/год;

$V^{\text{води}}$ – витрати води за рік, м³;

$I_1^{\text{води}}, I_n^{\text{води}}$ – вартість води за перший та n -й роки, дол. США;

$I_{\Sigma}^{\text{води}}$ – сумарна вартість води за період, що моделюється, дол. США.

Інші витрати:

$$L_1 = l \times P_0, \quad L_n = L_1 / K_n^{\text{інфляції}},$$

$$L_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N L_n,$$

$$W_1 = w \times t, \quad W_n = W_1 / K_n^{\text{інфляції}},$$

$$W_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N W_n,$$

де l – питомі витрати на сервісне обслуговування протягом року, дол. США/кВт;

L_1, L_n – річні витрати на сервісне обслуговування протягом першого та n -го років, дол. США;

L_{Σ} – сумарні витрати на сервісне обслуговування протягом періоду, що моделюється, дол. США;

w – річна зарплата одного робітника, дол. США;

t – кількість робітників;

W_1, W_n – сумарна зарплата протягом першого та n -го років, дол. США;

W_{Σ} – сумарна зарплата протягом періоду, що моделюється, дол. США.

Сумарні операційні витрати:

$$OE_1 = I_1^{\text{палива}} + I_1^{\text{води}} + L_1 + W_1, \quad OE_n = OE_1 / K_n^{\text{інфляції}},$$

$$OE_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N OE_n,$$

де OE_1 – сумарні операційні витрати протягом першого року, дол. США;

OE_n – сумарні операційні витрати протягом n -го року, дол. США;

OE_{Σ} – сумарні операційні витрати протягом періоду, що моделюється, дол. США.

Вироблення та собівартість електроенергії:

$$K_{n+1}^{\text{падіння потужності}} = K_n^{\text{падіння потужності}} \times K_1^{\text{падіння потужності}},$$

$$A_1^E = P_0 \times T_{\text{рік}} \times K_{\text{ВВП}}, \quad A_n^E = A_1^E \times K_n^{\text{падіння потужності}},$$

$$A_{\Sigma}^E = \sum_{n=1}^N A_n^E,$$

$$D_{n+1} = D_n \times D_1,$$

$$WT_1 = I_1 \times K^{\text{аморт}}, \quad WT_{n+1} = WT_n \times (1 - K^{\text{аморт}}),$$

$$C_n^E = (OE_n \times D_n + WT_n) / A_n^E,$$

де A_1^E, A_n^E – обсяги вироблення електричної енергії протягом першого та n -го років, кВт·год;
 A_{Σ}^E – сумарний обсяг вироблення електричної енергії протягом періоду, що моделюється, кВт·год;

D_n – дисконт;

WT_n – обсяг амортизаційних відрахувань;

C_n^E – собівартість електричної енергії в n -му році.

Вироблення та собівартість теплової енергії розраховуються за аналогічними формулами.

Результати розрахунків собівартості електричної енергії, якщо всі затрати віднесені лише на випуск електричної енергії МСFC-технологічної установки, зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків собівартості електричної енергії МСFC-технологічної установки

Питомі інвестиції, дол. США/кВт	Вартість природного газу, дол. США / тис. м ³			
	300	400	500	600
2000	50	60	69	78
3000	65	75	84	94
4000	80	90	99	109
5000	95	105	114	124

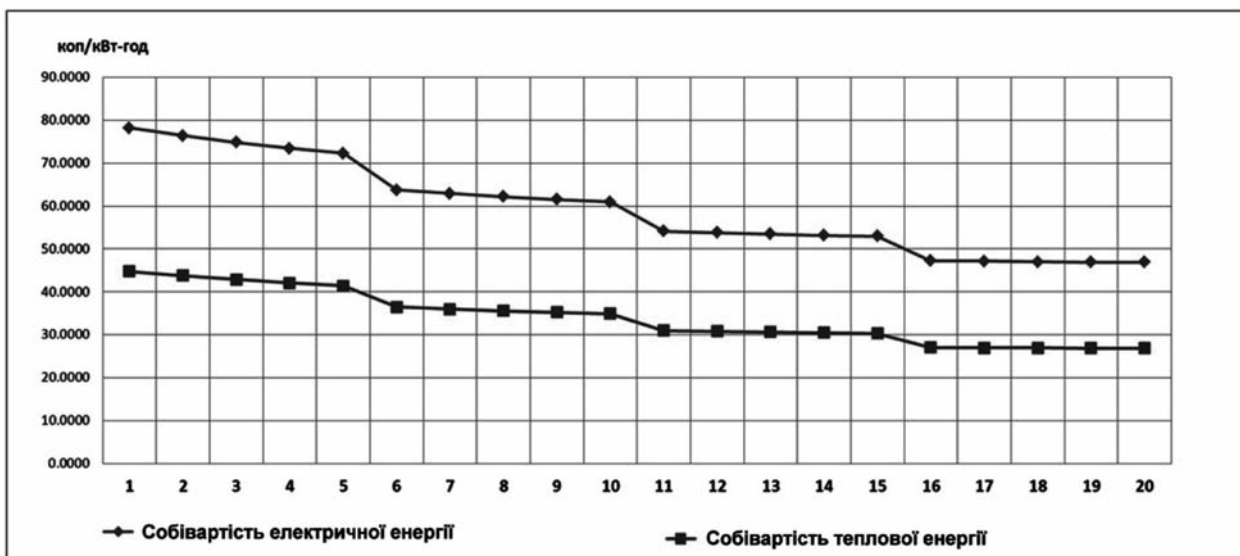


Рис. 4. Приклад результатів розрахунків собівартості електричної та теплової енергії протягом життєвого циклу МСFC-технологічної установки

Таблиця 3 – Результати розрахунків собівартості та ціни електричної та теплової енергії МСFC-технологічної установки

Питома інвестиція, дол. США / кВт	Собівартість (С) та ціна (Ц) електричної енергії, коп/кВт·год								Собівартість (С) та ціна (Ц) теплової енергії, грн/Гкал							
	При вартості природного газу, дол. США/тис. м ³								При вартості природного газу, дол. США/тис. м ³							
	300		400		500		600		300		400		500		600	
	С	Ц	С	Ц	С	Ц	С	Ц	С	Ц	С	Ц	С	Ц	С	Ц
2000	32	45	38	54	44	62	50	71	212	301	252	358	292	415	333	473
3000	41	58	47	67	53	75	59	84	276	392	316	449	356	506	396	562
4000	51	72	57	81	63	89	69	98	340	483	380	540	420	596	460	653
5000	61	87	67	95	73	104	79	112	404	574	444	630	484	687	524	744

Приклад результатів розрахунків динаміки собівартості електричної та теплової енергії протягом життєвого циклу МСFC-технологічної установки наведено на рис. 4.

Результати розрахунків собівартості та ціни (з урахуванням рентабельності 15%) на електричну та теплову енергії МСFC-технологічної установки зведені в табл. 3.

Порівняння одержаних значень собівартості з «Зеленими тарифами» [4]:

Установити «зелені» тарифи на електричну енергію, вироблену суб'єктами господарювання на об'єктах електроенергетики, що використовують альтернативні джерела енергії, на жовтень 2013 року згідно з додатком, без ПДВ, коп/кВт·год:

- Виробники електричної енергії з енергії вітру – 122,77.
- Виробники електричної енергії з біомаси – 134,46.
- Виробники електричної енергії з біогазу – 134,46.
- Виробники електричної енергії з енергії сонячного випромінювання (наземні об'єкти) – 505,09.
- Виробники електричної енергії мікро-, міні- та малими гідроелектростанціями – 126,27,

та тарифами інших технологій, що генерують електричну енергію [5]:

«Установити на жовтень 2013 року роздрібні тарифи на електроенергію з урахуванням граничних рівнів тарифів при поступовому переході до формування єдиних роздрібних тарифів для споживачів на території

України:... Енергопостачальні компанії... згідно з класом напруги без ПДВ, коп/кВт·год 1 клас напруги – 81,11, 2 клас напруги – 103,24»;

а також з тарифами на теплову енергію:

За даними Нацкомполитслужб середньозважений тариф на теплову енергію, який платить населення, становить 227 грн/Гкал. При цьому економічно обґрунтований рівень тарифу становить 312 грн/Гкал [5].

Вартість 1 Гкал теплової енергії в січні 2013 року становила: для населення – 403,49 грн, для бюджетних організацій – 742,48 грн, для інших споживачів – 875,63 грн з урахуванням ПДВ [6],

дозволяє зробити висновок про конкурентоспроможність МСFC-технологічних установок вже нині.

ВИСНОВКИ

Прогрес у розробці технологій використання паливних елементів для стаціонарного виробництва електричної та теплової енергії є суттєвим, особливо впродовж останніх 5–10 років. Наприклад, станом на 2013 рік питома вартість встановленої потужності карбонатно-розплавних паливних елементів становила 3500 – 5000 дол. США/кВт_e, і очікується її подальше зниження. Широкий діапазон одиночних потужностей паливних елементів дозволяє за модульним принципом створювати генеруючі потужності збалансовані до потреби споживачів, що є привабливим, наприклад, для організації енергозабезпечення офісних та тор-

гівельних будівель. Це потенційно зумовлює перспективність їх використання як елемента активної генерації енергії в розподілених мережах (smart-grid), який не потребує тривалих термінів розробки проектів їх використання, введення та виведення їх з експлуатації.

З використанням паливних елементів як стаціонарного джерела електричної та теплової енергії, для якого первинним джерелом енергії є біогаз, можливо підвищити екологічність процесів поводження з побутовими та сільськогосподарськими відходами, а також відходами харчової промисловості.

Найбільш ефективним способом використання паливних елементів є сумісна генерація електричної та теплової енергії, що вже на сучасному етапі технологічного розвитку дозволяє їм бути конкурентоздатними відносно традиційних енергетичних технологій, наприклад, відносно атомних електростанцій та газотурбінних установок.

1. *The Fuel Cell Industry Review 2013* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/industry-review/2013>
2. *Альтернативна енергетика* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://alte-energy.com/energy-efficiency/item/654-fuel-cell-energy-pobedy-dlya-ustanovki-toplivnykh-elementov-dlya-elektrostantsii-landmark>
3. *Shin Ae Song, Jonghee Han, Sung Pil Yoon, Suk Woo Nam, In-Hwan Oh and Dae Ki Choi Economic Feasibility Study for Molten Carbonate Fuel Cells Fed with Biogas* // Journal

of Electrochemical Science and Technology 2. – 2010. – Vol. 1, No. 102. – 111 p.

4. *Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики*. Постанова 26.09.2013 № 1278, в яку вносяться зміни постановами НКРЕ від 10.10.2013 № 1317, від 17.10.2013 № 1344, Київ, Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію на жовтень 2013 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/?id=7942>

5. *Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики*. Постанова 24.10.2013 № 1365, Київ, Щодо встановлення на листопад 2013 року роздрібних тарифів на електроенергію з урахуванням граничних рівнів тарифів при поступовому переході до формування єдиних роздрібних тарифів для споживачів на території України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/?id=8130>

6. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://from-ua.com/news/5c9c64f1b5210.html>

7. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/?id=8130>

Надійшла до редколегії 12.03.2014