



УДК 629.06, 544.6

- © О.В. Агарков, заст. зав. відділу,
- © К. Я. Шевчук, зав. відділу (ДП “ДержавтотрансНДІпроект”)

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТВЕРДООКСИДНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

**Анотація.** Розглянуто можливість використання твердооксидних паливних елементів як допоміжної енергетичної установки в автомобільному транспорті.

**Ключові слова:** автомобільний транспорт; допоміжна енергетична установка; твердооксидні паливні елементи.

**Аннотация.** Рассмотрена возможность применения твердооксидных топливных элементов в автомобильном транспорте в качестве вспомогательной энергетической установки.

**Ключевые слова:** автомобильный транспорт; вспомогательная энергетическая установка; твердооксидные топливные элементы.

**Annotation.** In the present work, we discuss the use of solid oxide fuel cells in automobile transport as an auxiliary power unit.

**Keywords:** automobile transport; auxiliary power unit; solid oxide fuel cells.

### Вступ

Паливні елементи (далі – ПЕ) – електрохімічні пристрої, які безпосередньо перетворюють хімічну енергію вуглеводневого палива на електричну та теплову [1]. Через відсутність рухомих частин ці елементи мають істотно більший коефіцієнт корисної дії (ККД), ніж традиційні машинні способи перетворення енергії, ККД яких обмежений теоретичними значеннями для циклів Отто, Трінклера, Карно та інших [2]. Принцип роботи ПЕ – високоефективне “холодне” горіння палива. Усі ПЕ складаються з мембрани, яка розподіляє паливний і окислювальний газові об’єми, а також двох електродів: катода й анода. На катоді проходить реакція дисоціації окиснювача, а на аноді – палива. Основні переваги ПЕ порівняно з традиційними джерелами електроенергії – високий ККД (на рівні 60 %, а за утилізації теплової енергії – до 90 %), безшумність завдяки відсутності рухомих частин, масштабованість технології, тобто можливість створювати станції довільної потужності із стандартних блоків, відсутність сильної залежності ККД від потужності, а також екологічність, оскільки єдиними продуктами є повний оксид вуглецю  $\text{CO}_2$  і вода.

Розробники виділяють дві великі групи паливних елементів. Перша група – низькотемпературні ПЕ з робочою температурою до 200 °С: лужні ПЕ, ПЕ з протон-обмінною мембраною, метанольні ПЕ, а також ПЕ на основі ортофосфорної кислоти. Розподіл впроваджено за принципом іона, який мігрує через розділяючу мембрану. У разі лужних ПЕ – це аніон  $\text{OH}^-$ , створений в результаті дисоціації лужного електроліту, для ПЕ з протон-обмінною мембраною, метанольних ПЕ та ПЕ на основі ортофосфорної кислоти – протон  $\text{H}^+$ . До другої групи належать високотемпературні ПЕ з робочою температурою від 600 до 900 °С: ПЕ на основі розплавленого карбоната (через мембрану проходить карбонатний залишок  $\text{CO}_3^{2-}$ ) та твердооксидні паливні елементи (аніон кисню  $\text{O}^{2-}$ ).

Низькотемпературні ПЕ мають вищі значення ККД, але вони потребують істотно глибокої очистки палива, бо навіть вміст домішок на рівні тисячних часток про-

цента може призводити до отруєння електродів. Саме з цієї причини низькотемпературні елементи вперше знайшли своє застосування у сфері, де вартість очистки палива не є істотною – космічні технології [3-4].

Високотемпературні ПЕ мають дещо нижчий ККД і, відповідно, поверхневу щільність потужності, але вони працюють на дуже широкому наборі палив: від водню та природного газу до дизельного палива та газифікованого вугілля. Така невибірковість до якості палива реалізована завдяки можливості внутрішньої переробки пального за високої робочої температури елемента.

Твердооксидні паливні елементи (далі – ТОПЕ) – одна із найбільш перспективних і, відповідно, пророблених технологій із різних типів ПЕ [5]. Вони вже мають своє застосування у великих стаціонарних установках з потужністю від 1 МВт і вище (часто використовуються спільно з газотурбінними і паротурбінними пристроями, бо вихлопні гази мають температуру близько 600 °С), а також як побутові стаціонарні джерела потужністю від 1 до 10 кВт. У побутовому використанні ТОПЕ виробляють електроенергію та теплову енергію, яка застосовується, наприклад, для опалення чи підігріву води. Ще одна перспективна галузь застосування ТОПЕ – джерела електроенергії для станцій катодного захисту магістральних газопроводів задля перешкоди корозії.

Одиничні ТОПЕ – керамічні елементи, які складаються з мембрани твердого електроліту (найчастіше це стабілізований оксидами скандію, церію чи ітрію кубічний оксид цирконію), а також катодного і анодного електродів. Типові розміри одиничних ТОПЕ – 100-200 мм, а типова товщина – не більше 0,5 мм. Для мультиплікації потужності одиничні ТОПЕ збираються в батареї, до складу яких також входять біполярні струмові колектори, серед їх функцій – розподіл паливного газу і окисника, а також отримання струму з ТОПЕ. Одиничний ТОПЕ та біполярний струмовий колектор виробництва компанії Greenlight Innovation (Канада) показано на **рис. 1** [6]. На **рис. 2** зображена батарея ТОПЕ виробництва компанії Sunfire (Німеччина) [7].



Систематичні розробки батарей ТОПЕ та енергоустановок на їх основі ведуться в США [8], Великобританії [9], Німеччині [10], Естонії [11], Італії [12], Данії [13], Фінляндії [14], Кореї [15], Японії [16] та Росії [17]. В Україні, наразі, розробки перебувають на рівні пошуку нових електродних матеріалів [18-19].

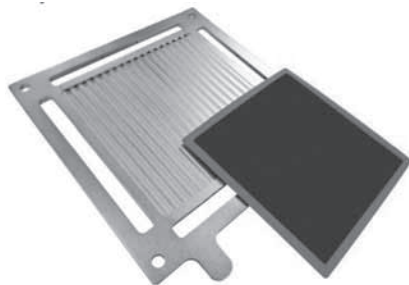


Рис. 1. Одиничний ТОПЕ виробництва компанії Greenlight Innovation (Канада)

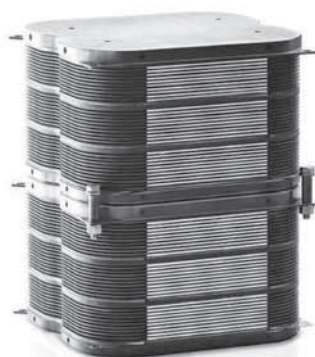


Рис. 2. Батарея ТОПЕ виробництва компанії Sunfire (Німеччина)

#### Основна частина

Останнім часом набуває популярності використання батарей ТОПЕ як допоміжних силових станцій для автомобільного транспорту. Такі ТОПЕ не змагаються з двигуном внутрішнього згоряння, а доповнюють його

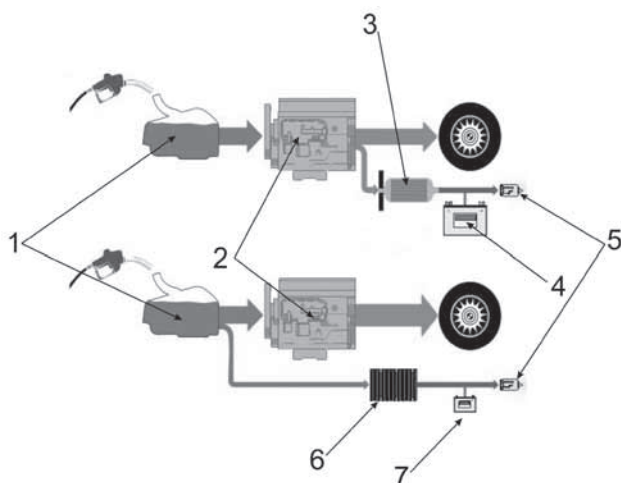


Рис. 3. Традиційна система електропостачання (згори) і представлена система на базі допоміжної енергосистеми на базі ТОПЕ (знизу)

можливості. Справа в тому, що сучасні автомобілі нашпиговані великою кількістю електрообладнання, значна частина якого потрібна навіть під час стоянки. Нині для використання електрообладнання необхідно залишати двигун заведеним. Допоміжна енергосистема на базі батареї ТОПЕ дає змогу уникнути такої потреби. Традиційна схема електропостачання і система на базі допоміжної електросистеми на ТОПЕ показані на рис. 3 згори і знизу відповідно [20].

Як під час використання традиційної, так і допоміжної енергосистеми джерелом енергії є хімічна енергія палива з бака автомобіля (1). При використанні традиційної схеми все пальне подається на двигун (2), який у випадку руху передає основну частину енергій на колеса, а при зупинці з необхідністю роботи бортових систем – на електричний генератор (3), який передає струм на бортові системи (5), а у разі зниженого енергоспоживання – на акумулятор (4). При цьому велика частина енергії пального втрачається з причини низького ККД двигуна, генератора, а також ККД заряду/розряду акумулятора.

У разі використання схеми енергопостачання на базі допоміжної системи на ТОПЕ при стоянці пальне не подається на двигун і він не вмикається. За необхідності використання бортових електричних систем пальне подається на допоміжну систему (6), яка подає струм на бортові прилади (5). Якщо енергоспоживання знижене, то є можливість заряджати допоміжний акумулятор зниженої ємності (7). Використання такої схеми дає змогу уникнути втрат енергії завдяки низькому ККД двигуна, а також не задіяному генератору. Оскільки системи на базі ТОПЕ генерують постійний струм, немає необхідності його випрямляти. Також важливою стає особливість технології ТОПЕ до масштабування по струму і напрузі. Із одиничних ТОПЕ є можливість зібрати батарею на довільний струм і напругу (наприклад, звичні для автомобільних електроприладів 12 В) завдяки різній комутації елементів.

Ще одна причина перспективності впровадження допоміжних силових станцій для енергопостачання під час стоянки без увімкнення двигуна – набуття популярності законодавчих ініціатив у Європі та США щодо заборони використання двигуна вантажних автомобілів на холостому ході під час стоянки [21].

Один із найбільших світових виробників автомобільних запчастин – компанія Delphi (США) – з 1998 року займається розробкою і виробництвом енергетичних установок на основі ТОПЕ для застосування їх як допоміжних енергетичних станцій для автомобільного транспорту [22-23]. Наразі компанія виробила більше 30 000 одиничних ТОПЕ, поверхнева щільність потужності яких досягає 500 мВт/см<sup>2</sup>. Підтверджений робочий ресурс батареї складає 40 000 годин або 3 000 000 миль в умовах дорожньої вібрації, вона витримує більше 200 теплових циклів нагрівання-охолодження. Батарея ТОПЕ може працювати на бензині чи дизельному паливі, що проходять попередню підготовку безпосередньо в енергоустановці. Також можливими видами палива є природний



газ, водень та різні види біологічного палива. Батарея ТОПЕ виробництва компанії Delphi, встановлена на вантажному автомобілі, зображена на **рис. 4**.



**Рис. 4.** Батарея ТОПЕ виробництва компанії Delphi, встановлена на вантажному автомобілі

Наразі компанія Delphi виробляє два типи батарей ТОПЕ (табл. 1).

**Таблиця 1**

**Характеристики батарей Delphi**

Характеристика	Батарея Delphi Gen 3 Stack	Батарея Delphi Gen 4 Stack
Потужність, кВт	1.5	9
Поверхнева щільність потужності, мВт/см <sup>2</sup>	500	500
Активна поверхня одиничних ТОПЕ, см <sup>2</sup>	105	403

Із **табл. 1** видно, що потужності батареї Gen 3 достатньо для функціонування більшості бортових пристроїв автомобіля, а потужність Gen 4 істотно більше, ніж всі можливі потреби бортових систем. Таким чином, ця система дає змогу користуватись всім обладнанням під час стоянки без використання двигуна з суттєвим економічним та екологічним ефектом і є перспективною з погляду використання як допоміжної енергетичної станції для автомобільного транспорту.

**Висновки**

У роботі показано, що батареї та енергетичні установки на базі технології твердооксидних паливних елементів є перспективними з погляду використання їх в автомобільному транспорті як допоміжні силові установки. Ця технологія дає змогу використовувати всі бортові системи під час стоянки транспорту з виключеним двигуном. Із використанням технології ТОПЕ можна отримати суттєвий позитивний економічний та екологічний ефект завдяки тому, що ККД ТОПЕ суттєво перевищує ККД теплових двигунів (60-70 % проти 20 %), а вихлопні гази містять тільки повний оксид вуглецю CO<sub>2</sub> та пару.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Revankar S.T., Majumdar P. Fuel Cells: Principles, Design, and Analysis // ISBN 978-1420089684.  
2. Pearson G., Leary M., Subic A., Wellnitz J. Performance comparison of hydrogen fuel cell and hydrogen internal combustion

engine racing cars // Sustainable Automotive Technologies, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference (2011).

3. Warshay M., Prokopius P.R. The fuel cell in space: yesterday, today and tomorrow // NASA-TM-102366 E-5084 NAS 1.15:102366

4. Jha A.R. Next-generation Batteries and Fuel Cells for Commercial, Military, and Space Applications, ISBN 978-1439850664.

5. Singhal S.C. High Temperature Solid Oxide Fuel Cells // ISBN: 978-1-85617-387-2.

6. [http://www.greenlightinnovation.com/fuel\\_cell/sofc\\_testing/articles/52.php](http://www.greenlightinnovation.com/fuel_cell/sofc_testing/articles/52.php)

7. <http://www.sunfire.de/en/produkte/stacks/mk200-sofc-stack>

8. Kuznezoff M., Alexander M.m, Johanness S. Solid Oxide Fuel Cell Industry and Technology in Europe, Japan and the USA // CFI-Ceramic Forum International, Vol. 90, Iss. 6-7, pp. E27-E33 (2013).

9. Bance P., Brandon N.P., Girvan B., Holbeche P., O'Dea S., Steele B.C.H. Spinning-out a fuel cell company from a UK University – 2 years of progress at Ceres Power // Journal of Power Sources, Vol. 131, Iss. 1-2, pp. 86-90 (2004).

10. Steinberger-Wilckens R., Blum L., Buchkremer H.P., Gross S., de Haart L., Hilpert K., Nabelek H., Quadackers W., Reisinger U., Steinbrech R.W., Tietz F. Overview of the development of solid oxide fuel cells at Forschungszentrum Juelich // International Journal of Applied Ceramic Technology, Vol. 3, Iss. 6, pp. 470-476 (2006).

11. Lust E., Nurk G., Moeller P. Development of Medium-Temperature Solid Oxide Fuel Cell Materials and Single Cells in Estonia // ECS Transactions, Vol. 57, Iss. 1, pp. 521-527 (2013).

12. Bertoldi M., Bucheli O., Modena S., Larrain D., Ravagni A. Manufacturing and Market-Oriented Development of SOFC generators at SOFCpower SpA // ECS Transactions, Vol. 35, Iss. 1, pp. 127-138 (2011).

13. Christiansen N., Holm-Larsen H, Primdahl S., Wandel M., Ramousse S., Hagen A. Recent Progress in Development and Manufacturing of SOFC at Topsoe Fuel Cell A/S and Riso DTU // ECS Transactions, Vol. 35, Iss. 1, pp. 71-80 (2011).

14. Ollikainen T., Saarinen J., Halinen M., Hottinen T., Noponen M., Fontell E., Kiviahio J. Dynamic Simulation Tool ARPOS in SOFC Power Plant Modeling at Wärtsilä and VTT // ECS Transactions, Vol. 7, Iss. 1., pp. 1821-1829 (2007).

15. Jeong K. Reduction of Carbon-Dioxide Emission Applying Carbon Capture and Storage (CCS) Technology to Power Generation and Industry Sectors in Korea // Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 30, Iss. 9, pp. 961-972.

16. Hosoi K., Ito M., Fukae M. Status of National Project for SOFC Development in Japan // ECS Transactions, Vol. 25, Iss. 1, pp. 11-18 (2011).

17. Burmistrov I., Agarkov D., Bredikhin S., Nepochatov Yu., Tiunova O., Zadorozhnaya O. Multilayered Electrolyte-Supported SOFC Based on NEVZ-Ceramics Membrane // ECS Transactions, Vol. 57, Iss. 1, pp. 917-923 (2013).

18. Vashook V., Vasylenko L., Zosel L, Gruner W., Ullmann H., Guth U. Crystal structure and electrical conductivity of lanthanum-calcium chromites-titanates La<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>Cr<sub>1-y</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>3-delta</sub> (x=0-1, y=0-1) // Journal of Solid State Chemistry, Vol. 177, Iss. 10, pp. 3784-3794.

19. Muecke U.P., Akiba K., Infortuna A., Salkus T., Stus N.V., Gauckler L.J. Electrochemical performance of nanocrystalline nickel/gadolinia-doped ceria thin film anodes for solid oxide fuel cells // Solid State Ionics, Vol. 178, Iss. 33-34, pp. 1762-1768 (2008).

20. Mukerjee S. Solid Oxide Fuel Cell Auxiliary Power Unit: Status and challenges for automotive applications // SM Secacore (2001).

21. [https://en.wikipedia.org/wiki/Idle\\_reduction](https://en.wikipedia.org/wiki/Idle_reduction)

22. Subhasish M., Haltiner K., Kerr R. Latest Update on Delphi's Solid Oxide Fuel Cell Stack for Transportation and Stationary Applications // ECS Transactions, Vol. 35, Iss. 1, pp. 139-146 (2011).

23. Singhal S.C., Dokiya M. The revolution through evolution: Delphi solid oxide fuel cell for APU and hydrogen reformation // Electrochemical Society Series, Vol. 2003, Iss. 7, pp. 16-30 (2003).