

- © **Агарков О. В.**, заступник завідувача відділу сертифікації колісних транспортних засобів;
 © **Шевчук К. Я.**, завідувач відділу сертифікації колісних транспортних засобів;
 © **Іванина Ю. І.**, в.о. провідного інженера (ДП «ДержавтотрансНДІпроект»)

ЄВРОПЕЙСЬКА ПРОГРАМА РОЗРОБКИ ДОПОМІЖНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ НА БАЗІ ТВЕРДООКСИДНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Анотація. В попередній статті ми розглядали перспективність використання енергетичних установок на базі твердооксидних паливних елементів (ТОПЕ) у ролі допоміжних силових установок для автомобільного транспорту [1]. В роботі був докладно розібраний досвід компанії Delphi (США) з розробки та втілення таких допоміжних силових установок для генерації електроенергії безпосередньо на борту вантажного автомобіля з дизельного пального. У цій статті розглянута аналогічна європейська програма з обладнання вантажівок екологічними та високоефективними силовими установками на базі ТОПЕ.

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

Аннотация. В предыдущей статье мы рассматривали перспективность использования энергетических установок на твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ) в качестве вспомогательных силовых установок для автомобильного транспорта [1]. В работе также был подробно разобран опыт компании Delphi (США) в разработке и внедрении таких вспомогательных силовых установок для генерации электроэнергии непосредственно на борту грузового автомобиля из дизельного топлива. В данной статье рассматривается аналогичная европейская программа по оборудованию грузовых автомобилей экологически чистыми и высокоэффективными силовыми установками на базе ТОТЭ.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, вспомогательная силовая установка, твердооксидные топливные элементы.

Abstract. In previous paper we considered perspective of application of power plants based on solid oxide fuel cells (SOFC) as auxiliary power units for automobile transport [1]. In that paper we also considered in details an experience of Delphi (USA) in development and application of such auxiliary power units for electricity generation directly at vehicle from the diesel fuel. In current paper, similar European program for application of ecologically clean and highly-efficient power units based on SOFC in freight transport.

Keywords: automobile transport, auxiliary power units, solid oxide fuel cells.

ВСТУП

У попередній статті нами докладно розглянути переваги та недоліки технології твердооксидних паливних елементів (ТОПЕ). Показано, що технологія ТОПЕ є надзвичайно перспективною, оскільки ККД перетворення енергій вуглеводневого палива таких батарей значно перевищує аналогічний показник інших конкурентоспроможних технологій, таких як дизельні генератори, теплоелектричні елементи тощо [2,3]. Основною причиною отримання високого ККД є відсутність рухомих частин, які обов'язково присутні в машинних методах перетворення енергії. В умовах використання ТОПЕ енергія палива перетворюється на

електроенергію безпосередньо – без проміжних станів. Очевидною перевагою технології також є модульність конструкції, тобто можливість створювати джерела енергії довільної потужності з однотипних базових блоків. Ще одна надважлива особливість технології ТОПЕ – екологічність, оскільки у випадку використання вуглеводневого палива єдиними продуктами роботи є вода та діоксид вуглецю. Для застосування в автомобільному транспорті досить істотною є перевага ТОПЕ порівняно з іншими видами паливних елементів: можливість безпосереднього використання вуглеводневого палива, зокрема дизельного без багатостадійної переробки та глибокої очистки, як, скажімо, у про-

тон-обмінних паливних елементів. Можливий так званий внутрішній риформінг, коли вся переробка палива проходить на анодному електроді ТОПЕ, так і неглибокий передрифформінг, який не потребує складних агрегатів чи дорогих матеріалів.

У роботі показано, що технологія твердооксидних паливних елементів є надзвичайно перспективною з точки зору використання для генерації електроенергії безпосередньо на борту вантажних автомобілів. Вироблена електроенергія може бути застосована для роботи бортових електроприладів, які широко використовуються в сучасних вантажівках, особливо в призначених для транспортування вантажів на далекі відстані. Такий варіант генерації є особливо важливим в останні роки, оскільки в країнах Європейського Союзу та Сполучених Штатів набуває чинності заборона на використання штатного двигуна вантажівок під час нічних стоянок, коли водію потрібно використовувати бортові електроприлади. Саме тому в Сполучених Штатах активно розвивається державний проект розробки допоміжних силових установок на базі ТОПЕ для вантажних автомобілів, втіленням якого займається компанія Delphi. Перспективита технічні особливості продукту докладно розглянуті в попередній роботі [1].

Країни Європейського Союзу також запустили єдиний проект розробки автомобільної допоміжної силової установки на базі ТОПЕ, втіленням якого займається консорціум під координацією австрійської компанії AVL [4-6].

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Міжнародний консорціум з розробки допоміжної силової установки для вантажних автомобілів

Розробкою, виготовленням та тестуванням допоміжних силових установок на базі ТОПЕ для вантажних автомобілів займається міжнародний консорціум компаній, що працюють у країнах Європейського Союзу.

Серцем будь-якої силової установки на базі ТОПЕ є окремі паливні елементи. Для їхньої розробки та виготовлення до консорціуму запрошена датська компанія Topsoe Fuel Cell, розташована в Копенгагені, член групи компаній Haldor Topsoe. Вона має 20-річний досвід розробки ТОПЕ та систем на їхній основі, в її штаті працюють 115 кваліфікованих співробітників. Компанія отримує потужну підтримку з боку датської наукової лабораторії Riso Lab.

З метою мультиплікації напруги та потужності окремі ТОПЕ збирають у батареї з використанням біполярних колекторів струму, які також виконують функцію рівномірного розподілу газових сумішей: палива по площі анодного електроду,

а також окисника по катодному. Конструкція колекторів повинна бути оптимізована з точки зору простої герметизації газових просторів, рівномірності розподілу температурних полів, струму, а також газових потоків. Науково-дослідний центр Forschungszentrum Juelich, розташований у Німеччині, виконує в консорціумі функцію розробника батарей ТОПЕ. Центр має понад два десятиліття досвіду розробок у цій галузі і блискучі результати.

Розробкою і моделюванням системи силової установки в цілому займається відома інжинірингова компанія J. Eberspacher GmbH & Co KG (Німеччина). Загальна координація, підготовка продукту для тестування та комерціалізації належить до компетенції австрійської компанії AVL, яка також виступає головною організацією у виконанні європейських науково-дослідних проектів.

Польове тестування готових продуктів бере на себе ще один член міжнародного консорціуму – шведська компанія Volvo. Під час виконання проекту ця всесвітньо відома організація, по-перше, надає консультації щодо технічних особливостей необхідного продукту, а по-друге, проводить польове тестування безпосередньо в умовах майбутнього використання. Крім того, шведи беруть участь у процесі доведення продукту до вимог ринку.

ОСНОВНІ ДАНІ ПРО ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ПРОЕКТ DESTA

Для розробки та втілення в життя допоміжних силових установок на базі ТОПЕ в Європейському Союзі запущений спеціальний науково-дослідний проект DESTA [7-8], метою якого є розробка та польові тести установок.

Для виконання проекту зібраний спеціальний міжнародний консорціум компаній, в який увійшли організації, що мають багаторічний досвід розробок у галузі:

Topsoe Fuel Cell, член групи компаній Haldor Topsoe, Копенгаген, Данія;
 Forschungszentrum Juelich, Юліх, Німеччина;
 J. Eberspacher & Co KG GmbH, Німеччина;
 AVL, Австрія;
 Volvo, Швеція.

Орієнтовний строк проекту становить 36 місяців, у разі необхідності закладено можливість розширення строку ще на півроку. Бюджет проекту – 9,8 мільйонів євро, 3,8 з них є власним внеском дослідницького центру Forschungszentrum Juelich.

Основні цілі проекту – демонстрація першої європейської допоміжної силової установки на базі ТОПЕ в роботі на вантажному автомобілі Volvo, тестування шести систем протягом одного року (3 в

Eberspacher і 3 в AVL), розробка оптимальної єдиної конструкції на основі результатів тестування в двох компаніях, загальний прогрес у розробці ТОПЕ, які працюють безпосередньо на дизельному паливі.

Технічні характеристики цільового продукту проекту DESTA представлені в *табл. 1*.

Отже, основними причинами, які мотивують європейські країни до запуску проекту DESTA, є і документи, що забороняють використовувати двигун під час довгої (більше п'ять хвилин) стоянки, збереження палива, зменшення викидів діоксиду вуглецю та зменшення шумності у процесі експлуатації автомобілів.

Допоміжна силова установка, встановлена на вантажівці, показана на *фото 1*.

Окремо внутрішня частина пристрою показана на *фото 2*.

ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ НА ТОПЕ

У процесі виконання проекту проведено економічний аналіз доцільності використання допоміжних силових установок на базі ТОПЕ для генерації електроенергії на борту вантажних автомобілів порівняно з допоміжними установками на базі дизельних двигунів [9].

Для економічного аналізу взяті вхідні дані, представлені в *табл. 2* (аналіз проведений у квітні 2013 року).

З таблиці видно, що вартість системи на ТОПЕ перевищує вартість аналога на базі дизельного генератора. Саме тому першим питанням, піднятим під час проведення економічного аналізу став період, після якого проект починає

Таблиця 1

**Технічні характеристики цільового продукту
європейського проекту DESTA**

Максимальна електрична потужність	3 кВт
Теплова потужність	10 кВт
Паливо	Дизельне пальне
Орієнтовний життєвий цикл	>20 000 годин
ККД системи по електроенергії	35%
Об'єм системи	150 л
Маса системи	120 кг
Зменшення викидів CO ₂ порівняно з використанням двигуна під час стоянки	75%
Час запуску системи	30 хвилин
Рівень шуму	65 дБ (А)

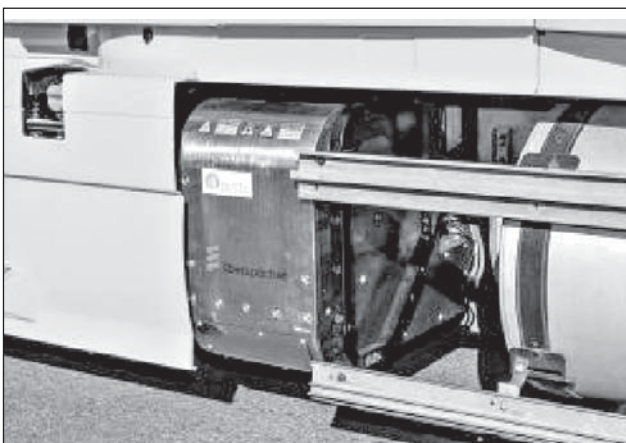


Фото 1. Допоміжна силова установка проекту Desta, встановлена на вантажівці

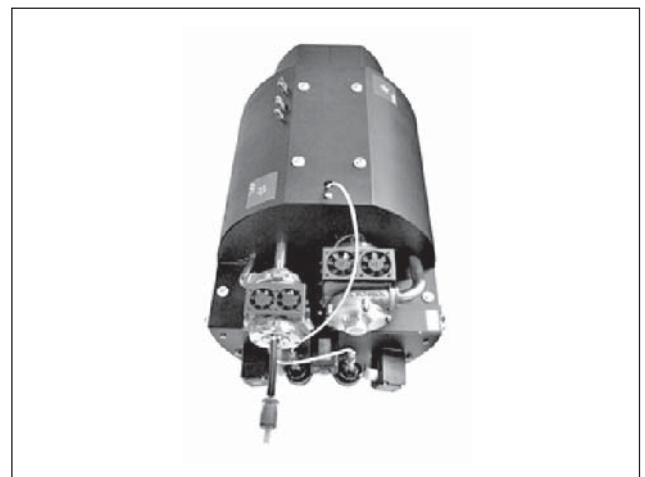


Фото 2. Внутрішня частина пристрою

приносити прибуток. Було проведено порівняння з вартістю генерації електроенергії безпосередньо від двигуна, а також від допоміжної системи на базі дизельного генератора. Результати порівняння представлені в *табл. 3*. В другому стовпці зазначено час для порівняння системи на ТОПЕ з двигуном вантажівки, а в третьому – з допоміжним дизельним генератором.

Для випадку цін на пальне рівня квітня 2013 року проведений аналіз строку виходу проекту на прибутковість для різного часу стоянки вантажівки на тиждень. Результати представлені в аналогічній формі в *табл. 4*.

Основна мета втілення допоміжних систем на базі ТОПЕ – отримання можливості для водія відмовитись від використання кімнати в готелі для відпочинку за рахунок того, що він може вільно користуватися всіма необхідними електроприла-

дами, розташованими безпосередньо на борту вантажного автомобіля. Саме цьому в процесі аналізу також проведено порівняння вартості використання допоміжної системи електропостачання на базі ТОПЕ з вартістю готелів. Аналізували випадки використання готелів протягом чотирьох та п'яти ночей на тиждень. Результати порівняння представлені в *табл. 5*.

Оцінка вартості розробки технології серійного випуску, валідації оптимальності роботи та сертифікації продукції становить 15,6 мільйонів €. Вартість запуску лінії з випуску продукції складає, приблизно, 2,6 мільйони. Ймовірна вартість одної допоміжної установки складає \$12 000.

У процесі проведення аналізу розглянуто три сценарії залежності кількості випущених станцій від року роботи заводу: «консервативний», «збалансований», а також «агресивний» (*табл. 6*).

Таблиця 2

Вхідні дані для проведення економічного аналізу доцільності використання допоміжних силових установок на базі ТОПЕ

Час стоянки на тиждень	30, 40, 50, 57.83 годин
Вартість дизельного пального	3.9-5.0 \$/галон (3.9 \$/галон = 0.79 €/л)
Потреба в пальному двигуна під час стоянки	0.75 гал./год.
Вартість допоміжної установки на ТОПЕ	\$12 000 (€9 230)
Вартість допоміжної установки на дизельному генераторі	\$10 000 (€7 700)

Таблиця 3

Час виходу проекту на генерування прибутку для різних цін на дизельне пальне

Вартість пального, \$/галон	ТОПЕ порівняно з двигуном, років	ТОПЕ порівняно з допоміжним дизельним двигуном
3,9	1,62	1,63
4,25	1,50	1,52
4,5	1,41	1,43
5	1,27	1,29

Таблиця 4

Час виходу проекту на генерування прибутку для різного часу стоянки на тиждень роботи вантажівки

Час стоянки на тиждень, годин	ТОПЕ порівняно з двигуном, років	ТОПЕ порівняно з допоміжним дизельним двигуном
57.83	1,62	1,62
50	1,86	2,01
40	2,20	2,07
30	2,95	2,64

Результати порівняння вартості допоміжної системи на ТОПЕ та використання готелів

Вартість кімнати в готелі	Період виходу на прибутковість у випадку використання готелю чотири рази на тиждень, років	Період виходу на прибутковість у випадку використання готелю три рази на тиждень, років
\$30	2,45	1,87
\$40	1,72	1,33
\$50	1,32	1,03
\$60	1,07	0,84

Залежності кількості проданих станцій від року роботи заводу для трьох сценаріїв

Рік	Сценарій		
	Консервативний	Збалансований	Агресивний
1	3 000	5 000	8 000
2	3 500	7 000	15 000
3	4 500	11 000	20 000
4	6 500	16 000	22 000
5	8 500	19 000	22 000
6	10 000	20 000	22 000

Для оцінки часу виходу проекту на прибутковість використані різні оцінки вартості виробництва одиниці продукту, включаючи вартість ліцензування, а також адміністрування проекту. Оцінка вартості для різних сценаріїв залежно від

року роботи виробництва представлена в *табл. 7*.

Для всіх комбінацій сценаріїв випуску продукції, а також собівартості виробництва була проведена оцінка часу виходу проекту на прибутковість. Результати розрахунків представлені в *табл. 8*.

Залежність вартості одиниці продукції від року роботи виробництва для різних сценаріїв

Рік	Собівартість		
	Нижча	Середня	Вища
1	\$8 190	\$9 100	\$10 010
2	\$7 605	\$8 450	\$9 295
3	\$7 020	\$7 800	\$8 580
4	\$6 727	\$7 475	\$8 223
5	\$6 482	\$7 202	\$7 922
6	\$6 482	\$7 202	\$7 922

Розрахунок терміну виходу проекту на прибутковість для всіх комбінацій сценаріїв випуску продукції, а також собівартості виробництва

Оцінка терміну виходу проекту на прибутковість, років		Сценарій		
		Консервативний	Збалансований	Агресивний
Собівартість	Нижча	1,30	0,83	0,51
	Середня	1,61	1,01	0,70
	Вища	2,01	1,30	0,98

Таким чином, з проведеного економічного аналізу доцільності можна зробити низку досить важливих висновків. Сценарій використання допоміжних силових систем електропостачання на базі ТОПЕ є надзвичайно сприятливим, період виходу

на прибутковість становить 1-2 роки. Оскільки чинності набуває заборона на роботу двигуна автомобіля під час стоянки довше п'яти хвилин, на ринок повинні вийти альтернативні системи для електропостачання незалежно від основного двигуна.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто досвід європейського консорціуму розробників допоміжних силових установок для вантажівок: від окремих паливних елементів до польових випробувань на вантажних автомобілях. Показано, що цей досвід є надзвичайно важливим – він дозволяє суттєво знизити витрати дизельного палива під час стоянок, викиди диоксида вуглецю та продуктів неповного згорання, а також шумність вантажівки під час стоянки. Також проведено економічний аналіз доцільності втілення результатів проекту. Розглянутий досвід є, безумовно, надзвичайно доречним і для України.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Агарков О. В., Шевчук К.Я.* Перспективи використання твердооксидних паливних елементів в автомобільному транспорті // «Автошляховик України», – 2015. – №4 (246) – с. 23.
2. *I. Burmistrov, D. Agarkov, S. Bredikhin, Yu. Nepochatov, O. Tiunova and O. Zadorozhnaya* Multilayered Electrolyte-Supported SOFC Based on NEVZ-Ceramics Membrane, ECS Transactions, Vol. 57, Iss. 1, 917–923 (2013)
3. *I.N. Burmistrov, D.A. Agarkov, F.M. Tsybrov, S.I. Bredikhin* Preparation of membrane-electrode assemblies of solid oxide fuel cells by co-sintering of electrodes, Russian Journal of Electrochemistry, Vol. 52, No. 7, pp. 669-677 (2016)
4. *J. Rechberger, M. Hauth, M. Reissig* AVL SOFC System Development and Testing, Fuel Cell Seminar 2012, Uncasville, CT, 7th of Nov. 2012
5. *J. Rechberger* SOFC APU Development at AVL Fuel Cell Seminar, Palm Springs, 18th of Nov. 2009
6. *J. Rechberger* Update of the AVL SOFC APU development program Fuel Cell Seminar 2015 18th of Nov. 2015
7. http://www.desta-project.eu/fileadmin/downloads/DESTA_website_press_release_Volvo_Eberspaecher_final.pdf
8. [http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/3.J.RECHBERGER-Desta%20\(ID%20193102\)%20\(ID%20193326\)%20\(ID%20193799\).pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/3.J.RECHBERGER-Desta%20(ID%20193102)%20(ID%20193326)%20(ID%20193799).pdf)
9. *P. Prenninger, J. Rechberger, M. Reissig* Scenarios towards the Industrialization of SOFC APUs A3PS Conference 2013 October 3. – 4, 2013, Vienna

