

УДК 621.431

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup1.13

М. Р. ТКАЧ, Б. Г. ТИМОШЕВСЬКИЙ, О. С. МИТРОФАНОВ, А. Ю. ПРОСКУРІН

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв

ПОКАЗНИКИ ТВЕРДООКСИДНОГО ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТА В СКЛАДІ СІРКОВОДНЕВОЇ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОЇ УСТАНОВКИ

Предметом дослідження є процеси енергетичного перетворення водню, отриманого в результаті термохімічної деструкції сірководню, в твердооксидному паливному елементі в складі енерготехнологічної установки для видобутку та переробки сірководню з глибин Чорного моря. Метою роботи є оцінка ефективності використання твердооксидного паливного елемента для генерації електричної енергії в складі сірководневої енерготехнологічної установки та визначення основних показників його роботи залежно від параметрів процесу деструкції сірководню. У роботі використано методи математичного моделювання фізико-хімічних і електрохімічних процесів. Модель твердооксидного паливного елемента базується на рівняннях матеріального та енергетичного балансів, рівнянні Нернста для визначення електрорушійної сили, а також залежностях для оцінки омичних, активаційних і концентраційних втрат напруги. Розрахунок параметрів установки виконано для різних значень ступеня конверсії сірководню в термохімічному реакторі. Установлено закономірності зміни витрати водню та сірки залежно від ступеня розкладання сірководню. Визначено потребу в окиснювачі для забезпечення стабільної роботи твердооксидного паливного елемента. Отримано вольт-амперну характеристику паливного елемента за робочої температури 1023 К та тиску 111457,5 Па. Розрахунки показали, що за умов повної конверсії сірководню максимальна витрата водню становить 3,775 кг/год, що забезпечує вироблення електричної потужності до 92,4 кВт. Термодинамічний коефіцієнт корисної дії процесу енергоперетворення при цьому досягає значення 0,725. Проведене дослідження підтвердило доцільність використання твердооксидних паливних елементів у складі енерготехнологічних установок з видобутку та переробки сірководню. Отримані результати свідчать про можливість ефективного використання водню, що утворюється в процесі деструкції сірководню, для генерації електричної енергії з високими показниками енергетичної ефективності. Уперше для розглянутої установки визначено залежності електричної потужності та основних параметрів роботи твердооксидного паливного елемента від ступеня конверсії сірководню в реакторі деструкції.

Ключові слова: сірководень, водень, твердооксидний паливний елемент, термохімічний реактор, сірководнева енерготехнологічна установка.

Вступ

Одним із перспективних джерел відновлюваної енергії для України є сірководневі поклади Чорного моря, які сформувалися внаслідок природних біохімічних процесів і антропогенного впливу. Основна маса сірководню зосереджена на глибинах понад 150 м, хоча в окремих районах акваторії межа його поширення піднімається до 25...50 м від поверхні. За оцінками дослідників, загальні запаси сірководню в Чорному морі становлять близько 40...50 млрд т, а щорічне природне поповнення досягає 10^7 ... 10^8 т. Такий значний ресурсний потенціал дає змогу розглядати сірководень не лише як екологічний фактор, а й як перспективне джерело отримання енергії, еквівалентної приблизно 10 % встановленої потужності атомної енергетики України.

Особливий інтерес до використання сірководню зумовлений можливістю його перетворення на цінні продукти, насамперед водень і елементарну сірку. Водень, отриманий у процесі деструкції сірководню,

може бути використаний як екологічно чисте паливо для виробництва електричної та теплової енергії, а також як енергоносіє для паливних елементів. У свою чергу, вилучення сірководню з морських глибин сприятиме покращенню екологічного стану Чорного моря та зменшенню ризиків, пов'язаних із накопиченням токсичних сполук у водному середовищі.

На сьогодні запропоновано значну кількість технологічних рішень щодо видобування сірководню з морської води. Серед них розглядаються фізичні, хімічні та комбіновані методи, що відрізняються принципами роботи, рівнем енерговитрат і технічною складністю. Проте більшість таких технологій перебуває на стадії теоретичних досліджень або лабораторних випробувань і ще не отримала широкого промислового впровадження. Це пов'язано з необхідністю забезпечення високої енергетичної ефективності процесів видобутку, транспортування та подальшої переробки сірководню, а також зі складними умовами експлуатації обладнання в морському середовищі [1].



Одним із перспективних напрямів використання енергетичного потенціалу Чорного моря є застосування енерготехнологічної установки для видобування сірководню з морських глибин. Принцип її роботи ґрунтується на підніманні газорідинної суміші газліфтним способом із використанням хвильових імпульсів для інтенсифікації виділення сірководню в газоподібному стані [2]. Відокремлення сірководню від морської води здійснюється в коалесційному сепараторі, після чого очищена вода повертається в глибоководні шари моря.

Завдяки різниці густини морської води та газорідинної суміші на виході з підйомного трубопроводу формується підвищений тиск, що дозволяє подавати сірководень до сепаратора високого тиску. Отриманий сірководень може бути використаний у розширювальній машині для виробництва механічної енергії, необхідної для приводу допоміжного обладнання установки. Подальша переробка передбачає деструкцію сірководню з утворенням водню та сірки. Отриманий водень може накопичуватися в системах зберігання або безпосередньо використовуватися для виробництва електричної енергії.

Постановка задачі

З підсистеми видобутку та сепарації сірководень спочатку подається в теплообмінник-регенератор, де здійснюється попереднє нагрівання H_2S до початкової температури деструкції. Після цього H_2S подається до термохімічного реактора, де здійснюється його деструкція зі ступенем конверсії $\xi = 0,1 \dots 1$ з одержанням суміші водневмісного газу (суміші водню, твердої сірки та залишкового сірководню). Далі суміш водневмісного газу поступає до теплообмінника-регенератора, де вона охолоджується. У конденсаторі здійснюється подальше охолодження й відділення твердої сірки з суміші водню та залишкового сірководню. Далі суміш H_2 і H_2S , який не розклався в термохімічному реакторі, поступає в підсистему сепарації, де здійснюється відділення H_2S і повернення його в підсистему деструкції.

Таким чином, підсистема деструкції сірководню з отриманням водню має наступні складові:

- теплообмінник-регенератор, де здійснюється попереднє нагрівання сірководню до початкової температури реакції;
- термохімічний реактор розкладання сірководню, в якому відбувається деструкція за реакцією – $2\text{H}_2\text{S} = 2\text{H}_2 (\text{г}) + \text{S}_2 (\text{г})$, $\Delta \text{H}^0_{298} = 169,0 \text{ кДж/моль}$;
- конденсатор, у якому відбувається охолодження газу та відокремлення сірки.

Температура конверсії сірководню знаходиться в межах $1100 \dots 2300 \text{ К}$ (максимальна температура відповідає 100 % конверсії H_2S), що дозволяє ефек-

тивно застосовувати цей енергетичний потенціал у твердооксидних паливних елементах (ТОПЕ) для генерації електричної енергії. Цей тип паливних елементів є найбільш перспективним, а також має низку переваг порівняно з іншими типами. Зокрема, в ТОПЕ немає необхідності використовувати дорогий каталізатор на основі платини, а також цей тип елементів може використовувати будь-яке вуглеводневе паливо, що пройшло газифікацію (конверсію – утворення горючого водневмісного газу) [3–6].

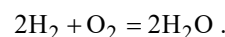
Мета даної роботи полягає в оцінці ефективності використання твердооксидних паливних елементів у складі сірководневої енерготехнологічної установки, а також показників її роботи.

Виклад основного матеріалу

Процеси, що відбуваються в паливному елементі з урахуванням багатьох факторів (геометрії поверхні паливного елемента, напрямку потоків, внутрішніх перетворень тощо), досить повно описано в існуючій літературі [7–14].

Умовно математичну модель ТОПЕ можна представити у вигляді масового та енергетичного балансів, а також моделі електрохімічних процесів, що пов'язує склад і температуру потоків палива та окиснювача з вихідною напругою та щільністю струму.

При використанні в ТОПЕ водню струмоутворювальна реакція буде мати вигляд



Напругу, яку генерує ТОПЕ, можна представити як [15–17]

$$U = E - (\eta_{\text{Ohm}} + \eta_{\text{conc}} + \eta_{\text{act}}),$$

де E – електрорушійна сила реакції в ТОПЕ;

η_{Ohm} – омичні втрати;

η_{conc} – концентраційні втрати (що є наслідком виникнення градієнта концентрацій реагентів у зоні проходження реакції та в каналах подачі);

η_{act} – активаційні втрати (відображають кінетику електрохімічної реакції та описуються рівнянням Батлера–Вольмера).

Електрорушійна сила (ЕРС) реакції в паливному елементі з урахуванням локальної температури та парціального тиску визначається за рівнянням Нернста [15, 17]

$$E = E_0 - \frac{T \cdot R_{\mu}}{n \cdot F} \ln \left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{O}_2}^{0.5} \cdot p_{\text{H}_2}} \right),$$

де E_0 – стандартна ЕРС, В;

R_μ – універсальна газова стала (8,314 Дж/(моль·К));

T – температура реакції, К;

F – постійна Фарадея (96 485 Кл·моль⁻¹);

p_{H_2O} , $p_{O_2}^{0,5}$, p_{H_2} – парціальні тиски, Па;

n – кількість електронів, що беруть участь у реакції.

Омічні втрати η_{Ohm} у паливному елементі пов'язані, насамперед, з опором провідності іонів та електронів, а також контактним опором складових паливного елемента.

Оскільки йонний потік у електроліті паливного елемента та електронний потік у електродах фактично підкоряються закону Ома, омічні втрати ТОПЕ можна представити як [15–17]

$$\eta_{Ohm} = jR_{Ohm},$$

де j – щільність струму, А/м²;

R_{Ohm} – внутрішній опір паливної комірки (включає в себе іонний та електронний опір), Ом·м².

Внутрішній опір можна визначити шляхом вимірювання опору паливної комірки або з певними припущеннями (нехтуючи контактними опорами) – теоретично (знаючи відстань між елементами та величини провідності) за формулою [15, 16]

$$R_{Ohm} = \frac{\tau_{anode}}{\sigma_{anode}} + \frac{\tau_{electrolyte}}{\sigma_{electrolyte}} + \frac{\tau_{cathode}}{\sigma_{cathode}},$$

де $\tau_{cathode}$, τ_{anode} , $\tau_{electrolyte}$ – товщина катода, анода та електроліту відповідно;

$\sigma_{cathode}$, σ_{anode} – питома електронна провідність катода та анода відповідно;

$\sigma_{electrolyte}$ – іонна провідність електроліту [18].

Концентраційні втрати виникають в умовах, коли підведення вихідних компонентів палива та відведення продуктів із зони проходження реакції відбуваються досить повільно та не відповідають даному значенню щільності струму. Концентраційні втрати можна оцінити наступним чином [15, 16, 19–21]:

$$\eta_{conc} = \eta_{conc}^{anode} + \eta_{conc}^{cathode},$$

$$\eta_{conc}^{anode} = \frac{T \cdot R_\mu}{n \cdot F} \ln \left(\frac{p_{H_2O}^{TPB} \cdot p_{H_2}^f}{p_{H_2O}^f \cdot p_{H_2}^{TPB}} \right),$$

$$\eta_{conc}^{cathode} = \frac{T \cdot R_\mu}{n \cdot F} \ln \left(\frac{p_{O_2}^a}{p_{O_2}^{TPB}} \right),$$

де $p_{H_2O}^{TPB}$, $p_{H_2}^f$, $p_{H_2O}^f$, $p_{H_2}^{TPB}$, $p_{O_2}^a$, $p_{O_2}^{TPB}$ – парціальні тиски компонентів на трифазних межах.

На активаційні втрати значний вплив має температура. Так, за високих температур електродні реакції протікають досить швидко, що призводить до незначних активаційних втрат, а нижчі температури – до зростання цього типу втрат і, відповідно, до падіння напруги.

Активаційні втрати, що відображають кінетику електрохімічної реакції, можна оцінити, використовуючи рівняння Батлера–Вольмера [15–17]

$$j = j_0^{electrode} \left[\exp \left(\frac{\alpha \cdot n \cdot F}{T \cdot R_\mu} \eta_{act}^{electrode} \right) - \exp \left(- \frac{(1-\alpha) \cdot n \cdot F}{T \cdot R_\mu} \eta_{act}^{electrode} \right) \right],$$

$$j_0^{electrode} = \frac{T \cdot R_\mu}{n \cdot F} k^{electrode} \exp \left(\frac{E^{electrode}}{T \cdot R_\mu} \right),$$

де $j_0^{electrode}$ – щільність струмообміну;

α – коефіцієнт перенесення заряду;

n – кількість електронів, що переносяться за один елементарний крок реакції;

$k^{electrode}$ – преекспоненціальний коефіцієнт щільності струмообміну;

$E^{electrode}$ – енергія активації щільності струмообміну.

Для енерготехнологічної установки з видобутку та переробки сірководню з глибин Чорного моря в кількості 0,0178 кг/с генерацію водню в залежності від ступеня конверсії в термохімічному реакторі представлено на рис. 1.

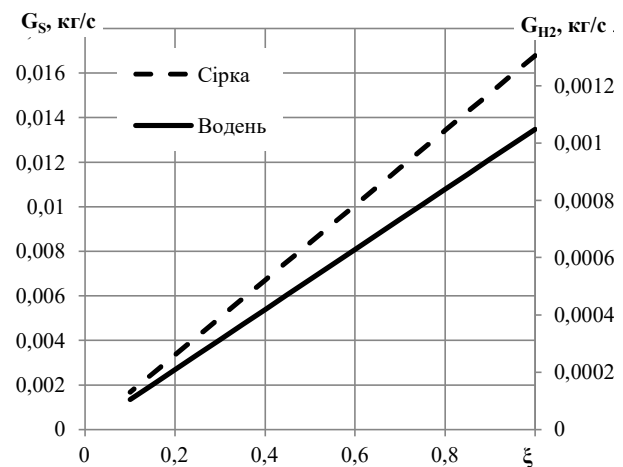


Рис. 1. Залежність витрати водню та сірки від ступеня конверсії сірководню в реакторі

Витрату окиснювача (повітря), необхідного для роботи ТОПЕ в залежності від ступеня конверсії, представлено на рис. 2.

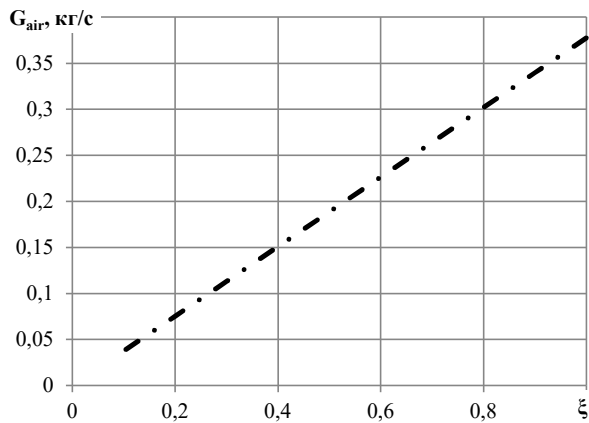


Рис. 2. Залежність витрати окиснювача від ступеня конверсії сірководню в реакторі

Основні параметри роботи ТОПЕ подано в табл. 1 та на рис. 3.

Таблиця 1

Основні параметри роботи ТОПЕ

Параметр	Значення
Температура реакції, К	1023
Тиск, Па	111457,5
Електрорушійна сила, В	0,932
Максимальна потужність, кВт	92,4
Термодинамічний ККД	0,725
Товщина катода, см	0,005
Товщина анода, см	0,05
Товщина електроліту, см	0,002
Електропровідність анода, Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	8400
Електропровідність катода, Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	80000
Коефіцієнт дифузії анода, м ² ·с ⁻¹	3,66·10 ⁻⁵
Коефіцієнт дифузії катода, м ² ·с ⁻¹	1,37·10 ⁻⁵

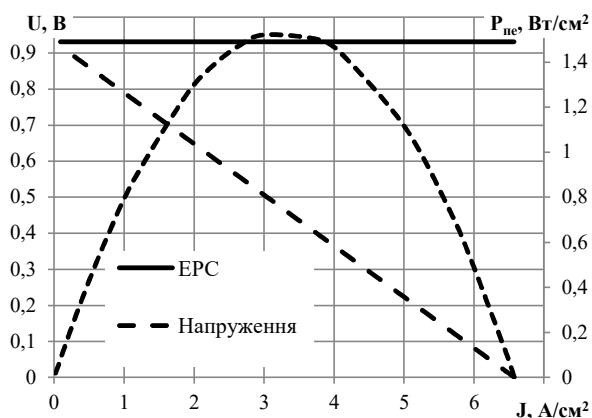


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика роботи твердо-оксидного паливного елемента

На рис. 4 представлено зміну вихідної потужності ТОПЕ в залежності від генерації водню в термохімічному реакторі енерготехнологічної установки з видобутку та переробки сірководню.

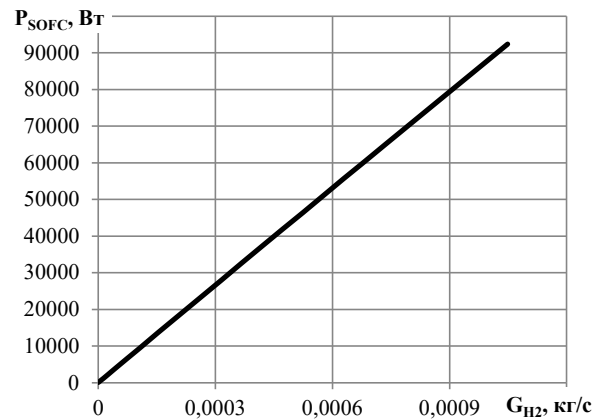


Рис. 4. Залежність потужності ТОПЕ від видобутку водню з сірководню

На номінальному режимі роботи енерготехнологічної установки з видобутку та переробки сірководню (витрата водню 0,001048 кг/с) потужність ТОПЕ складатиме 92,4 кВт (див. рис. 4), а термодинамічний ККД енергоперетворення при цьому складатиме 0,725.

Висновки

Розглянуто ефективність застосування твердооксидного паливного елемента в складі енерготехнологічної установки з видобутку та переробки сірководню з глибин Чорного моря продуктивністю 0,0178 кг/с. Встановлено, що термодинамічний ККД енергоперетворення отриманого водню в твердооксидному паливному елементі складає 0,725.

Отримано вольт-амперну характеристику твердооксидного паливного елемента за робочої температури 1023 К та тиску 111457,5 Па.

Визначено, що за умов повного розкладання сірководню (ступінь конверсії сірководню $\xi = 1$) у термохімічному реакторі та відповідно витраті водню $G_{H_2} = 3,775$ кг/год максимальна потужність твердооксидного паливного елемента становитиме $N_{max} = 92,4$ кВт.

Внесок авторів: формулювання наукової проблеми та визначення напрямку дослідження – М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський; розробка математичної моделі твердооксидного паливного елемента та методики розрахунку – О. С. Митрофанов; проведення чисельних експериментів, розрахунок

характеристик енерготехнологічної установки, побудова графічних залежностей і аналіз даних – **А. Ю. Проскурін**; інтерпретація результатів, формулювання висновків і підготовка статті до публікації – **усі автори**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження виконано в межах науково-дослідної роботи, що фінансується за рахунок коштів Державного бюджету України за темою «Науково-технічні засади водневих суднових та корабельних енергетичних установок» (номер державної реєстрації 0126U000740).

Наявність даних

Дані будуть надані за обґрунтованим запитом.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. Михайлюк, О. Л. Перспективи використання енергетичного потенціалу сірководню Чорного моря / О. Л. Михайлюк // *Науковий вісник ОНЕУ*. – 2012. – № 21 (173). – С. 91–100.
2. Спосіб видобування сірководню з глибинних вод Чорного моря : пат. 140551 Україна / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, А. Ю. Проскурін, Ю. М. Галинкін. – № u201905063 ; заявл. 13.05.2019 ; опубл. 10.03.2020, Бюл. № 5. – 3 с.
3. Ramadhani, F. A comprehensive review and technical guideline for optimal design and operations of fuel cell-based cogeneration systems / F. Ramadhani, M. A. Hussain, H. Mokhlis // *Processes*. – 2019. – 27 с.
4. A review of fuel cell systems for maritime applications / L. Van Biert, M. Godjevac, K. Visser, P. Aravind // *Journal of Power Sources*. – 2016. – Vol. 327. – P. 345–364.
5. Performance evaluation of an anode-supported SOFC ShortStack operating with different fuel blends as stationary-CHP system / M. Francesco, M. F. Andrea, S. Francesca et al. // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2024. – Vol. 171. – 13 p.
6. Stambouli, A. B. Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy / A. B. Stambouli, E. Traversa // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2002. – Vol. 6. – P. 433–455.

7. Ferguson, J. R. Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells / J. R. Ferguson, J. M. Fiaid, R. Herbin // *Journal of Power Sources*. – 1996. – Vol. 58. – P. 109–122.

8. Ahmed, S. Thermal-hydraulic model of a monolithic solid oxide fuel cell / S. Ahmed, C. McPheeters, R. Kumar // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1991. – Vol. 138. – P. 2712–2718.

9. Neophytides, S. G. The reversed flow operation of a crossflow solid oxide fuel cell monolith / S. G. Neophytides // *Chemical Engineering Science*. – 1999. – Vol. 54. – P. 4603–4613.

10. Numerical analysis of output characteristics of tubular SOFC with internal reformer / S. Nagata, A. Momma, T. Kato, Y. Kasuga // *Journal of Power Sources*. – 2001. – Vol. 101. – P. 60–71.

11. Iwata, M. Performance analysis of planar-type unit SOFC considering current and temperature distributions / M. Iwata, T. Hikosaka, M. Morita et al. // *Solid State Ionics*. – 2000. – Vol. 132. – P. 297–308.

12. Three-dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks / K. P. Recknagle, R. E. Williford, L. A. Chick et al. // *Journal of Power Sources*. – 2003. – Vol. 113. – P. 109–114.

13. Aguiar, P. Modelling of an indirect internal reforming solid oxide fuel cell / P. Aguiar, D. Chadwick, L. Kershenbaum // *Chemical Engineering Science*. – 2002. – Vol. 57. – P. 1665–1677.

14. Bessette II, N. F. A mathematical model of a solid oxide fuel cell / N. F. Bessette II, W. J. Wepfer, J. Winnick // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1995. – Vol. 142. – P. 3792–3800.

15. Aguiar, P. Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance / P. Aguiar, C. S. Adjiman, N. P. Brandon // *Journal of Power Sources*. – 2004. – Vol. 138. – P. 120–136.

16. Optimization design of marine solid oxide fuel cell/internal combustion engine hybrid power system considering degradation / C. Li, Z. Wang, C. Li et al. // *Journal of Power Sources*. – 2024. – Vol. 617. – P. 1–11. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235180>.

17. Electrochemical Characterization and Modeling of Anode and Electrolyte Supported Solid Oxide Fuel Cells / A. K. Padinjarethil, F. R. Bianchi, B. Bosio, A. Hagen // *Frontiers in Energy Research*. – 2021. – Vol. 9. – P. 1–19. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.668964>.

18. Petruzzi, L. A global thermo-electrochemical model for SOFC systems design and engineering / L. Petruzzi, S. Cocchi, F. Fineschi // *Journal of Power Sources*. – 2003. – Vol. 118. – P. 96–107.

19. Chan, S. H. A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness / S. H. Chan, K. A. Khor, Z. T. Xia // *Journal of Power Sources*. – 2001. – Vol. 93. – P. 130–140.

20. Polarization effects in intermediate temperature anode-supported solid oxide fuel cells / J. Kim, A. V. Virkar, K. Fung et al. // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1999. – Vol. 146. – P. 69–78.

21. The role of electrode microstructure on activation and concentration polarizations in solid oxide fuel cells / A. V. Virkar, J. Chen, C. W. Tanner, J. Kim // *Solid State Ionics*. – 2000. – Vol. 131. – P. 189–198.

References

1. Mykhailiuk, O. L. *Perspektyvy vykorystannia enerhetychnoho potentsialu sirkovodniu Chornoho moria* [Prospects for the use of the energy potential of the Black Sea hydrogen sulfide]. Naukovi visnyk ONEU, 2012, no. 21(173), pp. 91–100.

2. Tkach, M. R., Tymoshevskiy, B. H., Proskurin, A. Yu., Halynkin, Yu. M. *Sposib vydobuvannia sirkovodniu z hlybynnikh vod Chornoho moria* [Method for extraction of hydrogen sulfide from deep waters of the Black Sea]. Patent Ukr, № 140551, 2020.

3. Ramadhani, F., Hussain, M. A., Mokhlis, H. A comprehensive review and technical guideline for optimal design and operations of fuel cell-based cogeneration systems. *Processes*, 2019. 27 p.

4. Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., Aravind, P. A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 2016, vol. 327, pp. 345–364.

5. Marino, F., Ferrario, A. M., Santoni, F., Alfano, A., Noponen, M., Neubauer, R., Cigolotti, V., Jannelli, E. Performance evaluation of an anode-supported SOFC ShortStack operating with different fuel blends as stationary-CHP system. *Journal of The Electrochemical Society*, 2024, vol. 171. 13 p.

6. Stambouli, A. B., Traversa, E. Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, vol. 6, pp. 433–455.

7. Ferguson, J. R., Fiard, J. M., Herbin, R. Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 1996, vol. 58, pp. 109–122.

8. Ahmed, S., McPheeters, C., Kumar, R. Thermal-hydraulic model of a monolithic solid oxide fuel cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 1991, vol. 138, pp. 2712–2718.

9. Neophytides, S. G. The reversed flow operation of a crossflow solid oxide fuel cell monolith. *Chemical Engineering Science*, 1999, vol. 54, pp. 4603–4613.

10. Nagata, S., Momma, A., Kato, T., Kasuga, Y. Numerical analysis of output characteristics of tubular SOFC with internal reformer. *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 101, pp. 60–71.

11. Iwata, M., Hikosaka, T., Morita, M., Iwanari, T., Ito, K., Onda, K., Esaki, Y., Sakaki, Y., Nagata, S. Performance analysis of planar-type unit SOFC considering current and temperature distributions. *Solid State Ionics*, 2000, vol. 132, pp. 297–308.

12. Recknagle, K. P., Williford, R. E., Chick, L. A., Rector, D. R., Khaleel, M. A. Three-dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks. *Journal of Power Sources*, 2003, vol. 113, pp. 109–114.

13. Aguiar, P., Chadwick, D., Kershenbaum, L. Modelling of an indirect internal reforming solid oxide fuel cell. *Chemical Engineering Science*, 2002, vol. 57, pp. 1665–1677.

14. Bessette, N.F. II, Wepfer, W.J., Winnick, J. A mathematical model of a solid oxide fuel cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 1995, vol. 142, pp. 3792–3800.

15. Aguiar, P., Adjiman, C. S., Brandon, N. P. Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance. *Journal of Power Sources*, 2004, vol. 138, pp. 120–136.

16. Li, C., Wang, Z., Li, C., Xu, S., Wang, S., Wang, C., Ji, Y., Qin, J., Wei, L. Optimization design of marine solid oxide fuel cell/internal combustion engine hybrid power system considering degradation. *Journal of Power Sources*, 2024, vol. 617, article 235180, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235180>.

17. Padinjarethil, A.K., Bianchi, F.R., Bosio, B., Hagen, A. Electrochemical Characterization and Modeling of Anode and Electrolyte Supported Solid Oxide Fuel Cells. *Frontiers in Energy Research*, 2021, vol. 9, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.668964>.

18. Petrucci, L., Cocchi, S., Fineschi, F. A global thermo-electrochemical model for SOFC systems design and engineering. *Journal of Power Sources*, 2003, vol. 118, pp. 96–107.

19. Chan, S. H., Khor, K. A., Xia, Z. T. A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness. *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 93, pp. 130–140.

20. Kim, J., Virkar, A. V., Fung, K., Mehta, K., Singhal, S. C. Polarization effects in intermediate temperature anode-supported solid oxide fuel cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 1999, vol. 146, pp. 69–78.

21. Virkar, A. V., Chen, J., Tanner, C. W., Kim, J. The role of electrode microstructure on activation and concentration polarizations in solid oxide fuel cells. *Solid State Ionics*, 2000, vol. 131, pp. 189–198.

Надійшла до редакції 15.06.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 29.07.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 03.09.2026

**PERFORMANCE INDICATORS OF A SOLID-OXIDE FUEL CELL
IN A HYDROGEN-SULPHIDE ENERGY TECHNOLOGY PLANT****Mykhaylo Tkach, Boris Tymoshevskiy, Oleksandr Mytrofanov, Arkadii Proskurin**

The subject of the study is the energy conversion processes of hydrogen obtained through the thermochemical decomposition of hydrogen sulfide in a solid oxide fuel cell integrated into an energy-technological system for the extraction and processing of hydrogen sulfide from the depths of the Black Sea. The aim of this work is to evaluate the efficiency of using a solid oxide fuel cell for electricity generation within a hydrogen sulfide-based energy-technological system and to determine its main performance indicators as a function of the parameters of the hydrogen sulfide decomposition process. The study employs mathematical modeling methods for physicochemical and electrochemical processes. The solid oxide fuel cell model is based on mass and energy balance equations, the Nernst equation for determining the electromotive force, as well as relationships used to estimate ohmic, activation, and concentration voltage losses. The system's operating parameters were calculated for different hydrogen sulfide conversion rates in the thermochemical reactor. The relationships between hydrogen and sulfur production rates and the degree of hydrogen sulfide decomposition were determined. The oxidant demand required to ensure stable operation of the solid oxide fuel cell was established. The current–voltage characteristic of the fuel cell was obtained at an operating temperature of 1023 K and a pressure of 111,457.5 Pa. The calculations showed that under conditions of complete hydrogen sulfide conversion, the maximum hydrogen production rate reaches 3.775 kg/h, providing electrical power generation of up to 92.4 kW. The thermodynamic efficiency of the energy conversion process was found to reach 0.725. The conducted study confirmed the feasibility of using solid oxide fuel cells as part of energy-technological systems for hydrogen sulfide extraction and processing. The results demonstrate the potential to efficiently utilize hydrogen generated during hydrogen sulfide decomposition for high-energy-efficiency electricity production. For the first time, the relationships between electrical power output, the main operating parameters of the solid oxide fuel cell, and the hydrogen sulfide conversion rate in the decomposition reactor were determined for the considered system.

Keywords: hydrogen sulphide; hydrogen; solid oxide fuel cell; thermochemical reactor; hydrogen sulphide energy technology plant.

Ткач Михайло Романович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Тимошевський Борис Георгійович – доктор технічних наук, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Митрофанов Олександр Сергійович – доктор технічних наук, професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Проскурін Аркадій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Mykhaylo Tkach – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4944-711,

Boris Tymoshevskiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: borys.tymoshevskiy@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4649-702X,

Oleksandr Mytrofanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail mitrofanov.al.ser@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3460-5369,

Arkadii Proskurin – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5225-6767