

ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ПРОЦЕСУ ПЛАВЛІННЯ МЕТАЛУ В ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПЕЧАХ

Дан Л.О.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1954-4871 , e-mail: danleonid.alex@gmail.com ;
Трофімова Л.О.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4576-2589 , e-mail: trofimova.pstu@gmail.com ;
Грек К.Р.	студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

Представлена робота присвячена аналізу можливості повернення частки електричної енергії, що витрачається під час проведення плавки металів в електричних печах, конкретно – в електродугових. Відомо, що при виплавці металу в електродугових (особливо в електродугових) виділяється значна кількість пилу та газів, що мають високу температуру. Вихід газів та їх склад залежить від складу шихти, швидкості плавлення, технологічного та температурного режимів плавки, режиму кисневої продувки та ін. Для електросталеплавильного виробництва є характерним вміст у відхідних від печей газах дрібнодисперсного пилу, який найбільше виділяється під час продувки металу киснем. Інша сторона питання – теплові викиди в навколишнє середовище. Глобальне потепління вимагає швидкого та ефективного вирішення цієї проблеми. Використання тепла, що виноситься з плавильного об'єму електродугових печей, може, по-перше, дати можливість економити енергоресурси для технологічних цілей «in - situ», а, по-друге, – забезпечувати гарячою водою, парою, електроенергією як зовнішніх промислових, так і побутових споживачів. Одним із перспективних методів утилізації цього тепла є використання термоелектричних явищ, зокрема, ефекту Зеебека. Обладнання, що працює на цьому ефекті, дозволяє перетворювати теплову енергію в електричну і це може бути використано для підвищення енергоефективності виробництва. У роботі проаналізовані теоретичні засади використання термоелектричних перетворювачів у цілому та при утилізації тепла газів, що відходять від плавильних печей конкретно. На підставі передового досвіду розрахована електрична потужність блока перетворювачів, наведена принципова схема підключення термоелектричних перетворювачів до електромережі та їх монтажна схема.

Ключові слова: електродугова піч, енергетичний баланс, ефект Зеебека, термоелектричний перетворювач.

Постановка проблеми

Ефективність плавки, в тому числі в електричних печах, можна оцінити на підставі аналізу її енергетичного/теплового балансу. Енергетичний баланс складається з прибуткових і витратних частин, взятих за час однієї плавки.

Проаналізуємо статті підведення та витрат тепла, що мають місце при плавці сталі в електродуговій печі ДСП-3 [1].

Статті підведення: тепло, що виділяється при горінні електричної дуги, тепло екзотермічних реакцій.

Статті витрат зображено на діаграмі рис. 1. Як свідчить діаграма, основна частка витрат тепла припадає на тепло сталі (46,2%) і тепло, що йде з пічними газами (17%). Сумарні втрати тепла через стіни, подину і склепіння складають 12,7%. По даним авторів [2] піч ДСП-3 лише за період плавлення з газами виділяє 722 МДж тепла.

Загальна кількість тепла, що втрачається з газами, що відходять, за час плавки, порівняно мало залежить від режиму плавки. Частка цієї величини в енергетичному балансі ДСП зростає зі збільшенням місткості та потужності ДСП. На печах невеликої та середньої потужності місткістю 3-50 т за період плавки становить 15-20% [1].



Рис. 1 – Структурна діаграма витрат тепла [1]

Таким чином, вочевидь, тепло газів, що виходять з плавильного простору печі, є вельми перспективним енергоносієм.

Статистика свідчить, що приблизно одна третина теплової енергії, споживаної в промисловості, викидається у вигляді теплових втрат в атмосферу або в системах охолодження [3]. Ці втрати є наслідком недосконалості та неможливості використання й утилізації в

наявному процесі всіх теплових потоків. Значну частину з них становлять теплові відходи, які, однак, є непридатними для використання або розсіюються у вигляді випромінювання. Їх утилізація на сучасному рівні технологій не є доцільною ні з практичної, ні з економічної точок зору.

Утилізація тепла газів, що відходять від паливних печей, зазвичай базується на нагріванні в рекуператорах або в регенераторах повітря, яке використовується для спалення газу чи мазуту. Для електричних печей потреби нагрівати повітря немає, тому газ, що має температуру приблизно 1500°C, попросту викидають у навколишнє повітря. Інколи це тепло частково використовують для отримання пари при генерації електричної енергії. В цьому випадку в атмосферу потрапляє газ при температурі приблизно 300°C, що теж не є припустимим.

На наш погляд, цікавим з точки зору використання низькотемпературних теплових відходів під час вироблення електроенергії є використання термоелектричного ефекту (ефекту Зеебека). Ось ключові аргументи на користь цього:

1. Простота та надійність. Термоелектричні перетворювачі (ТЕП) не мають рухомих частин, що знижує витрати на обслуговування та підвищує довговічність; вони компактні та можуть бути інтегровані в існуючі системи без значних змін.

2. Утилізація низькопотенційного тепла. Плави́льні печі випромінюють велику кількість тепла (300–600°C і вище), яке часто просто виводиться через димар. ТЕП можуть перетворювати частину цієї енергії на електрику.

3. Екологічність за рахунок зменшення викидів CO₂ і використання відхідного тепла для генерації електроенергії.

4. Додаткове джерело енергії. Згенерована електроенергія може живити допоміжні системи печі (наприклад, вентилятори, датчики), знижуючи споживання з мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Явище Зеебека відкрито в 1821 р. і полягає в тому, що в термопарах, спаї яких перебувають за різних температур, виникає термоелектрорушійна сила (термоЕРС).

Відомо, що, якщо вздовж провідника існує градієнт температур, то електрони на гарячому кінці набувають вищих енергій і швидкостей, ніж на холодному; у напівпровідниках на додаток до цього концентрація електронів провідності зростає з температурою. У результаті виникає потік електронів від гарячого кінця до холодного і на холодному кінці накопичується негативний заряд, а на гарячому залишається некомпенсований позитивний заряд [4]. Процес накопичення заряду триває доти, доки різниця потенціалів, що виникла, не утворить потік електронів у зворотному напрямку, що дорівнює первинному, завдяки чому встановиться

рівновага [4]. В електричному колі, складеному з різних провідників, виникає термоЕРС, якщо місця контактів підтримуються при різних температурах. Коли коло замкнене, у ньому протікає електричний струм (визначається як термострум), причому зміна знаку у різниці температур спаїв супроводжується зміною напрямку термоструму. Величина термоЕРС залежить від абсолютних значень температур спаїв, різниці цих температур, а також від природи матеріалів, що утворюють термоелемент, оскільки саме вона визначає їх характеристики. Найважливішими характеристиками термоелектричних матеріалів є наступні [4].

Термоелектрична здатність (ZT). Визначається формулою:

$$ZT = (S^2 \sigma T) / \lambda, \quad (1)$$

де S – коефіцієнт Зеебека;

σ – електропровідність;

λ – теплопровідність;

T – температура, К.

Чим вище ZT, тим ефективніший матеріал.

Електропровідність (σ) – високе значення сприяє кращій генерації енергії.

Теплопровідність (λ) – низька теплопровідність підвищує ефективність.

Коефіцієнт Зеебека (S) – високе значення вказує на здатність матеріалу генерувати напругу при температурному градієнті.

Розглянемо найбільш використовувані матеріали, що мають термоелектричні властивості [5–8].

1. *Традиційні термоелектричні матеріали.*

Вісмуту телурид (Bi₂Te₃) та його сплави:

- Широко використовуються в кімнатних та низькотемпературних умовах.

- Висока термоелектрична здатність ($ZT \sim 1$).

- Використовуються для охолодження та генерації енергії.

Свинцю телурид (PbTe):

- Ефективний при середніх температурах (до 500°C).

- $ZT \sim 0,8–1,2$.

- Використовується в промислових додатках.

Силіциди (наприклад, Mg₂Si, MnSi_{1.75}):

- Екологічно безпечні та дешеві.

- $ZT \sim 0,7–1,0$.

- Використовуються в середньотемпературних умовах.

2. *Новітні матеріали.*

Складні оксиди (наприклад, NaCo₂O₄, Ca₃Co₄O₉):

- Витримують високі температури.

- $ZT \sim 0,3–0,7$.

- Використовуються в високотемпературних умовах.

Складні халькогеніди (наприклад, Cu₂Se, SnSe):

- Висока ефективність при високих температурах.

- $ZT \sim 1,5–2,6$ (для SnSe).

- Перспективні для промислового застосування.

Термоелектричні полімери (наприклад, PEDOT:PSS):

- Гнучкі та легкі.
- $ZT \sim 0,1-0,4$.
- Використовуються у переносних пристроях та електроніці.

3. Наноструктуровані матеріали.

Наноструктуровані вісмуту телуриди та свинцю телуриди:

- Покращують ефективність за рахунок зменшення теплопровідності.
- ZT може досягати 1,5-2,0.

4. Квантові точки та нанокмпозити.

- Забезпечують високу ефективність за рахунок квантових ефектів.

Вочевидь, що вибір матеріалу залежить від умов експлуатації та вимог до ефективності.

Термоелектричні технології існують уже досить давно, але їх використання обмежене низькою ефективністю та високими витратами. Більшість генеруючих систем, заснованих на цьому методі, мають ККД 2-5% і здебільшого використовуються для живлення обладнання космічних кораблів або у віддалених районах [4]. Проте сучасні розробки в галузі нанотехнологій дають змогу отримати матеріали, за допомогою яких можливо досягти ефективності 15% і вище.

Фірмою Smart E5 GmbH [9] було розроблено схему генерації електричної енергії в термоелектричних перетворювачах за рахунок використання тепла гарячих газів. Гази, що утворюються під час плавлення металу в електропечах і початково мають температуру 400°C , за температури $\sim 200-190^{\circ}\text{C}$ спрямовують у початковий контур термоелектричного перетворювача. У вторинному контурі циркулює вода з температурою $\sim 30-40^{\circ}\text{C}$. За рахунок отриманого градієнта температури пристрій генерує електричний струм. Середня потужність блоку перетворювачів моделі ERS 200 PPC, що були встановлені на плавильному майданчику ливарного цеху, за вимірами авторів [9] становить до 90 кВт. Крім того, нагріта до 40°C вода може бути використана на побутові цілі. Таким чином, з одного боку, істотно підвищується енергоефективність роботи печей, а з іншого – зменшується негативний вплив металургійних агрегатів на навколишнє середовище.

Мета статті

Обумовити ефективність використання термоелектричних перетворювачів для отримання електричного струму за рахунок тепла газів, що відводяться від електродугових печей.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення проблеми в цілому треба розв'язати декілька окремих питань. Перш за все, щоб отримати змінний електричний струм з напругою 220 В від термоелектричних перетворювачів, потрібно виконати ряд кроків, оскільки термоелектричні перетворювачі генерують постійний струм (DC), а для отримання змінного струму (AC) потрібні додаткові пристрої. Нижче наведені ці кроки [10].

1. Підключення термоелектричних перетворювачів.

Термоелектричні перетворювачі генерують постійний струм. Щоб збільшити напругу, можна з'єднати декілька модулів послідовно. Наприклад, якщо один модуль генерує 5 В, то для отримання 220 В потрібно з'єднати близько 44 модулів.

2. Стабілізація напруги. Напруга, яку генерують термоелектричні перетворювачі, може бути нестабільною через зміни температури. Треба використовувати стабілізатори напруги або DC-DC перетворювачі, щоб забезпечити стабільну вихідну напругу.

3. Перетворення постійного струму (DC) у змінний (AC). Для отримання змінного струму 220 В треба використовувати інвертор. Інвертор – це пристрій, який перетворює постійний струм у змінний. Вибір інвертора, який підтримує вихідну напругу 220 В, залежить від необхідної частоти (50 Гц або 60 Гц, залежно від регіону).

4. Підключення навантаження. Після інвертора маємо змінний струм 220 В, який можна використовувати для живлення різних приладів.

Принципова схема перетворення теплової енергії в електричну показана на рисунку 2.

Для оцінки можливого ефекту від використання термоелектричних перетворювачів в контексті, що розглядається, розрахуємо потужність одиничного термоелектричного перетворювача.

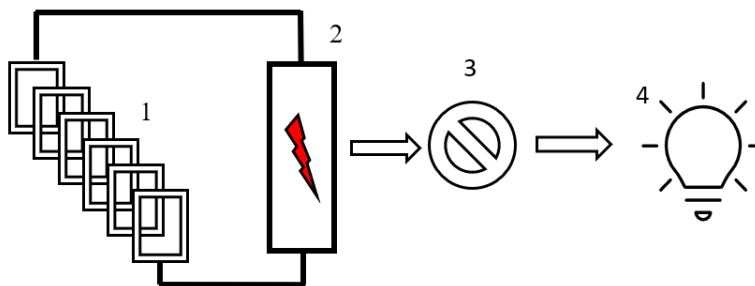


Рис. 2 – Принципова схема перетворення теплової енергії в електричну: 1 – термоелектричні модулі; 2 – стабілізатор напруги; 3 – інвертор; 4 – навантаження

Розрахунки здійснюємо за основними формулами [10], що наведені нижче.

Потужність, що генерується термоелектричним перетворювачем:

$$P = \eta \cdot Q \cdot \Delta T, \quad (2)$$

де P – потужність (Вт);

η – ККД термоелектричного матеріалу (у частках одиниці);

Q – тепловий потік (Вт);

ΔT – різниця температур між гарячою і холодною сторонами.

Тепловий потік:

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \Delta T / d, \quad (3)$$

де λ – теплопровідність матеріалу (Вт/(мК));

A – площа поперечного перерізу термоелектричного елемента (м²);

d – товщина термоелектричного елемента (м).

ККД термоелектричного матеріалу:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}}, \quad (4)$$

де T_h – температура гарячої сторони, К;

T_c – температура холодної боку, К;

ZT – безрозмірний параметр якості термоелектричного матеріалу (залежить від матеріалу).

Виконаємо розрахунок за наступних вихідних даних. Різниця температур: $400 - 300 = 100$ град. Площа, A , термоелектричного перетворювача $0,1 \times 0,1 = 0,01$ м²; його товщину, d , приймаємо рівною $0,01$ м. Вибираємо матеріал, що має величину $\lambda = 2$ Вт/(м·К) і $ZT = 1$.

У цьому випадку

$$\eta = 0,148 \text{ (14,8\%)}$$

Тепловий потік Q за цих умов дорівнює 200 Вт.

У результаті розрахунку отримуємо величину P , що дорівнює 2960 Вт. За наявності площі для установки перетворювачів є можливість з'єднати їх декілька і отримати більшу сумарну потужність.

Наступним етапом є розробка принципової схеми встановлення термоелектричних перетворювачів в існуючу систему газовідбору та газоочистки. Рис. 3 представляє можливий варіант монтажу термоелектричних перетворювачів в систему очистки газів, що відходять від електродугової печі, запропоновану авторами [11]. Як свідчить Рис. 3, на вході вертикальної ділянки допалювання рівномірно за поперечним перерізом розміщені сопла подачі аспіраційних газів. На виході ділянки допалювання стаціонарний газохід обладнаний ділянкою охолодження, послідовно з якою розміщений пиловловлювач. У пристрої на ділянці охолодження рівномірно за поперечним перерізом стаціонарного газоходу можуть бути розміщені форсунки

спрейового випарного охолодження або котел-утилізатор. За даними авторів [11], на виході з описаної системи температура газів зменшується з $\sim 1600^\circ\text{C}$ до $250-400^\circ\text{C}$.

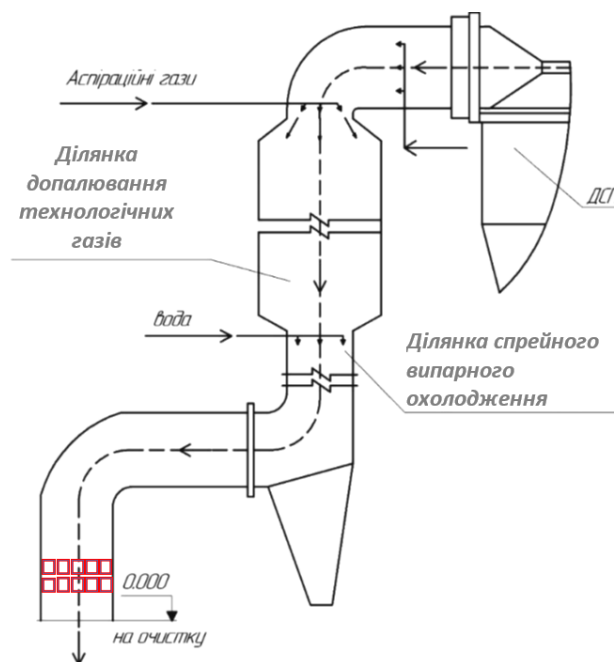


Рис. 3 – Запропонована схема встановлення термоелектричних перетворювачів у систему газоочистки (на підставі [11])

Це робить можливим застосування термоелектричних перетворювачів для генерації електричного струму. Червоним кольором на Рис. 3 показані запропоновані місця можливого встановлення термоелектричних перетворювачів.

Висновки

1. Аналіз літератури та досвід експлуатації електродугових печей свідчить про те, що до 20% теплової енергії, що витрачається на плавку, емітується в навколишнє середовище з газами, які відводяться, а повна утилізація цього тепла на даний час не забезпечується.

2. Перспективним напрямком використання енергії газів, що відводяться з плавильного простору електродугових печей, є застосування термоелектричних перетворювачів, у розрізі чого авторами виконані оціночні розрахунки потужності термоелектричного перетворювача та запропонована схема його встановлення в існуючу систему аспірації.

Перелік використаних джерел

- [1] Сайт ПрАТ «Дніпроспецсталь». URL: <https://www.ua-region/00186536> (дата звернення: 08.02.2025).

- [2] Козлов Г.О., Тополов В.Л. Индукційні печі: Навчальний посібник для студентів ВНЗ. Нікополь : НТ НМетАУ, 2008. 32 с.
- [3] Enhancing the waste heat utilization of industrial park: A heat pump-centric network integration approach for multiple heat sources and users / W. Wu et al. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 306, Article 118306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118306>.
- [4] Литвиненко С.С., Конотопчик І.О. Термоелектричні явища. Ефекти Зеебека та Пельтьє. Актуальні проблеми фундаментальних і прикладних досліджень: матеріали III Міжнародної інтернет-конференції молодих вчених, м. Луцьк, 12-13 квітня 2021 р. С. 61-62.
- [5] d'Angelo M., Galassi C., Lecis N. Thermoelectric Materials and Applications: A Review. *Energies*. 2023. № 16. Article 6409. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176409>.
- [6] Goldsmid H. Julian. Introduction to Thermoelectricity. *Springer Series in Materials Science*. 2016. Vol. 121. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>.
- [7] Thermal stability and mechanical response of Bi₂Te₃-based materials for thermoelectric applications / Y. Zheng et al. *ACS Applied Energy Materials*. 2020. Vol. 3, no. 3. Pp. 2078-2089. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b02093>.
- [8] Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 140. Pp. 167-181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>.
- [9] Produkt ERS 200 für Großindustrie und Abwasserunternehmen. URL: <https://www.smarTE5.com/ers200/> (дата звернення: 15.12.2024).
- [10] Ананичук Л.І. Термоелектрика : в 4 т. Чернівці: Букрек, 2003. Том II : Термоелектричні перетворювачі енергії. 376 с.
- [11] Система очищення димових газів електричної печі. URL: <http://uk.xiyeigroup.com/electric-furnace-dedusting-equipment-product/> (дата звернення: 15.12.2024).

ON THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE ENERGY BALANCE OF MELTING IN ELECTRIC ARC FURNACES

Dan L.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1954-4871 , e-mail: danleonid.alex@gmail.com ;
Trofimova L.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4576-2589 , e-mail: trofimova.pstu@gmail.com ;
Grek K.	student, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro

This paper is devoted to analyzing the possibility of recovering a portion of the electrical energy consumed during metal melting in electric furnaces, specifically, in electric arc furnaces. It is known that metal melting in electric furnaces (especially in electric arc furnaces) produces a significant amount of dust and gases with high temperatures. The output of gases and their composition depends on the composition of the charge, the melting rate of the technological and temperature modes of melting, the oxygen purge mode, etc. Electric arc furnace production is characterized by the content of fine dust in the furnace exhaust gases, which is released most of all during oxygen purging. The other side of the matter is heat emissions into the environment. Global warming requires a quick and effective solution to this problem. The use of heat from the melting space of electric furnaces can, firstly, save energy resources for in-situ technological purposes, and, secondly, provide hot water, steam, and electricity to both external industrial and domestic consumers. One of the most promising methods of utilizing this heat is the use of thermoelectric phenomena, in particular, the Seebeck effect. Equipment based on this effect allows converting thermal energy into electrical energy, and this can be used to improve the energy efficiency of production. This paper analyzes the theoretical basis for the use of thermoelectric converters in general and for the utilization of heat from waste gases from melting furnaces in particular. Based on the best practices, the electrical power of the converter unit is calculated, and a schematic view of the connection of thermoelectric converters to the power grid and their wiring scheme is presented.

Keywords: electric arc furnace, energy balance, Seebeck effect, thermoelectric converter.

References

- [1] Sait PrAT «Dnipropetsstal» (Website of PJSC «Dnipropetsstal»). [Online]. Available: <https://www.ua-region/00186536>. Accessed on: February 8, 2014.
- [2] H.O. Kozlov, and V.L. Topolov, *Induktsiini pechi: Navchalnyi posibnyk dlia studentiv VNZ* [Induction

- Furnaces: A Study Guide for University Students]. Nikopol, Ukraine: NT NMetAU Publ., 2008. (Ukr.)
- [3] W. Wu et al., «Enhancing the waste heat utilization of industrial park: A heat pump-centric network integration approach for multiple heat sources and users», *Energy Conversion and Management*, vol. 306, article 118306, 2024. doi: **10.1016/j.enconman.2024.118306**.
- [4] S.S. Lytvynenko, and I.O. Konotopchuk, «Termoelektrychni yavyscha. Efekty Zeiebeki ta Peltie» [«Thermoelectric phenomena. Seebeck and Peltier effects»], in Proc. Of the III Int. Internet Conf. «Current problems of fundamental and applied research», Lutsk, Ukraine, 2021, pp. 61-62. (Ukr.)
- [5] M. d'Angelo, C. Galassi, and N. Lecis, «Thermoelectric Materials and Applications: A Review», *Energies*, № 16, article 6409, 2023. doi: **10.3390/en16176409**.
- [6] Goldsmid H. Julian, «Introduction to Thermoelectricity», in *Springer Series in Materials Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, vol. 121, 278 p. doi: **10.1007/978-3-662-49256-7**.
- [7] Y. Zheng, X.Y. Tan, X. Wan, X. Cheng, Z. Liu, and Q. Yan, «Thermal stability and mechanical response of Bi₂Te₃-based materials for thermoelectric applications», *ACS Applied Energy Materials*, vol. 3, no. 3, pp. 2078-2089, 2020. doi: **10.1021/acsaem.9b02093**.
- [8] D. Champier, «Thermoelectric generators: A review of applications», *Energy Conversion and Management*, vol. 140, pp. 167-181, 2017. doi: **10.1016/j.enconman.2017.02.070**.
- [9] Produkt ERS 200 für Großindustrie und Abwasserunternehmen. [Online]. Available: <https://www.smarte5.com/ers200/>. Accessed on: December 15, 2024. (Ger.)
- [10] L.I. Anatychuk, Termoelektrychni peretvoriuvachi enerhii [Thermoelectric energy converters], in *Termoelektryka* [Thermoelectricity]. Chernivtsi, Ukraine: Bukrek Publ., 2003, vol II, 376 p. (Ukr.)
- [11] Система очищення димових газів електричної печі. [Online]. Available: <http://uk.xiyegroup.com/electric-furnace-dedusting-equipment-product/>. Accessed on: December 15, 2024.
- Стаття надійшла 05.04.2025
Стаття прийнята 08.05.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Дан Л.О., Трофімова Л.О., Грек К.Р. Обґрунтування можливостей покращення енергоефективності процесу плавлення металу в електродугових печах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 134-139. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336320>.