

О. І. ТЕСЛЕНКО

кандидат технічних наук, старший дослідник,
провідний науковий співробітник відділу трансформації структури
паливно-енергетичного комплексу
Інститут загальної енергетики Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-3772-5991

К. В. ТАРАНЕЦЬ

аспірант відділу прогнозування енергетичної ефективності
та перспективних паливно-енергетичних балансів
Інститут загальної енергетики Національної академії наук України
ORCID: 0009-0007-7357-2594

ВПЛИВ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ НА СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У даній статті представлені результати розрахунково – аналітичного дослідження впливу низьковуглецевої технологічної трансформації чорної металургії на обсяги споживання електроенергії та потреби в електрогенеруючих потужностях для задоволення цього споживання електроенергії, а також на зміну обсягів викидів парникових газів внаслідок цієї технологічної трансформації. Перспективний прогноз цієї низьковуглецевої технологічної трансформації передбачає поступову заміну традиційної аглодоменої технології виробництва сталі з застосуванням кисневого конвертора технологію прямого відновлення заліза воднем з використанням електродугової сталеплавильної печі. В якості проміжної (перехідної) технології цієї трансформації використовується аглодомена технологія виробництва сталі із застосуванням електродугової сталеплавильної печі. Для всіх технологій використовується технологія безперервного лиття заготовки. Варіантні розрахунки проводились для загального річного виробництва сталі 10,0 млн т/рік для забезпечення можливості подальшого індикативного масштабування стосовно перспективних обсягів річного виробництва сталі. Показано, що внаслідок застосування електролізної технології отримання водню, технології прямого відновлення заліза та електродугової сталеплавильної технології споживання електроенергії зростає з 2,74 млрд кВт·год/рік до 35,13 млрд кВт·год/рік (в 12,84 рази) порівняно із традиційною аглодоменою технологією виробництва сталі з застосуванням кисневого конвертора. При цьому необхідна потужність електрогенерації зростає з 0,48 ГВт до 6,15 ГВт (в 12,84 рази). Викиди парникових газів в результаті такої трансформації зменшуються з 17,98 млн т CO₂-екв/рік до 7,0 млн т CO₂-екв/рік (в 2,57 рази). В перспективі викиди парникових газів можна зменшити до нульових значень із застосуванням безвуглецевих технологій електрогенерації з відновлювальних джерел енергії – сонячних, вітрових та гідралічних електростанцій. Однак, зважаючи на стохастичний (мінливий) характер електрогенерації сонячними та вітровими електростанціями, необхідність забезпечення безперервного та стабільного постачання електроенергією металургійного виробництва в зростаючих обсягах її потужності є завданням найближчих десятиліть. Результати цього дослідження можуть бути використанні при прогнозованому плануванні розвитку електрогенеруючих потужностей Об'єднаної енергетичної системи України.

Ключові слова: декарбонізація, чорна металургія, технологічна трансформація, потреби електроенергії, потужність електрогенерації, парникові гази.

О. І. TESLENKO

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Leading Researcher at the Department of Transformation of the Structure
of the Fuel and Energy Complex
General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-3772-5991

К. В. TARANETS

Postgraduate Student at the Department of Energy Efficiency Forecasting
and Prospective Fuel and Energy Balances
General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0009-0007-7357-2594

IMPACT OF LOW-CARBON TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION OF FERROUS METALLURGY ON ELECTRICITY CONSUMPTION

This article presents the results of a computational and analytical study on the impact of the low-carbon technological transformation of ferrous metallurgy on electricity consumption and the demand for electricity generation capacities to meet this consumption, as well as the change in greenhouse gas emissions resulting from this transformation. The prospective forecast of this low-carbon technological transformation includes the gradual replacement of the traditional sinter-blast furnace technology of steel production using an oxygen converter with the technology of direct reduction of iron with hydrogen using an electric arc steelmaking furnace. The sinter-blast furnace technology and an electric arc steelmaking furnace of steel production is used as an intermediate (transitional) technology in this transformation. The technology of continuous billet casting is applied to all technologies. Variant calculations were carried out for a total annual steel production of 10.0 million tons/year to ensure the possibility of further indicative scaling in relation to the prospective volumes of annual steel production. It is shown that as a result of the application of electrolysis technology for hydrogen production, direct iron reduction technology, and electric arc steelmaking technology, electricity consumption will increase from 2.74 billion kWh/year to 35.13 billion kWh/year (12.84 times) compared to the traditional sinter-blast furnace technology for steel production using an oxygen converter. At the same time, the required power generation capacity will increase from 0.48 GW to 6.15 GW (12.84 times). Greenhouse gas emissions as a result of such a transformation will decrease from 17.98 million tons of CO₂-eq/year to 7.0 million tons of CO₂-eq/year (2.57 times). In the future, greenhouse gas emissions can be reduced to zero with the use of carbon-neutral electricity generation technologies from renewable energy sources such as solar, wind and hydroelectric power plants. However, given the stochastic (variable) nature of electricity generation by solar and wind power plants, ensuring a continuous and stable electricity supply to metallurgical production as its capacity increases is a task for the coming decades. The results of this study can be used in forecasting the development of electricity generating capacities of the Integrated Power System of Ukraine.

Key words: decarbonization, ferrous metallurgy, technological transformation, electricity demand, electricity generation capacity, greenhouse gases.

Постановка проблеми

Одним з головних завдань сталого розвитку людської цивілізації є запобігання змінам клімату внаслідок антропогенного впливу на довкілля, зокрема зменшення утворення парникових газів (ПГ) для обмеження поступового глобального зростання температури атмосферного повітря. Чорна металургія відноситься до найбільших джерел за обсягами викидів ПГ енергоємними галузями промисловості в світі та в Україні: до 7% загальносвітових викидів ПГ продукується при виробництві чавуну та сталі, а в Україні цей показник досягає 14% (або майже 57% щорічних викидів ПГ в промисловості країни) та є визначальною галуззю промисловості щодо зменшення викидів ПГ [1, 2]. Ця обставина обумовлює актуальність наукових досліджень щодо аналізу напрямів та технологічних заходів зменшення викидів ПГ у чорній металургії, а також супутніх ефектів, які при цьому супроводжують зміни у дотичних галузях економіки, насамперед, в електроенергетиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженню низьковуглецевої технологічної трансформації промислових виробництв металургійної промисловості за останнє десятиліття присвячено значна кількість наукових праць закордонних [3–8] та українських фахівців [9–14]. Наведені дослідження оцінюють рівень викидів ПГ за існуючими технологіями металургійного виробництва та прогнозують зменшення викидів ПГ внаслідок впровадження новітніх технологій виробництва заліза, чавуну та сталі на перспективу до 2050 р. Однак в наведених роботах не досліджується вплив технологічних змін при переході традиційної технологічної схеми металургійного виробництва до інноваційних низьковуглецевих технологій отримання сталі на суміжні галузі економіки, насамперед, на електроенергетику та на потреби у додаткових потужностях електрогенерації.

Формулювання мети дослідження

Метою цього дослідження є визначення розрахунково-аналітичним методом впливу низьковуглецевої технологічної трансформації промислових виробництв чорної металургії на обсяги споживання електроенергії та потреб в електрогенеруючих потужностях для задоволення цього споживання електроенергії, а також на обсяги викидів ПГ внаслідок цієї технологічної трансформації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Методичні положення. Загальне річне споживання електроенергії $E^{заг}$ при виробництві сталі з використанням кількох технологій можна визначити наступним чином

$$E^{заг} = \sum_{j=1}^J e_j^{ел} \cdot b_j \cdot C^{заг}, \text{ млн кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}; \quad (1)$$

де j , J – порядковий номер j та загальна кількість J використаних технологій виробництва сталі, одиниць;
 $e_j^{ел}$ – питомі витрати електроенергії при виробництві сталі за технологією j , кВт·год/т сталі;

$b_j = C_j / C^{заг}$; $\sum b_j = 1$ – частка виробництва сталі з використанням технології j в загальному річному виробництві сталі,-;

C_j – річне виробництво сталі з використанням технології j , млн т/рік;

$C^{заг}$ – загальне річне виробництво сталі з використанням технологій J , млн т/рік.

Необхідну потужність електричної генерації $P^{см}$ для забезпечення потреб виробництва сталі можна обрахувати за формулою

$$P^{ст} = \frac{E^{заг}}{1000 \cdot D \cdot \Gamma} \cdot \frac{k_{нв} \cdot k_3}{(1 - k_{тр})}, \text{ ГВт} \tag{2}$$

де $k_{нв}$ – коефіцієнт неврахованих витрат електроенергії при виробництві сталі, -;

$k_{тр}$ – коефіцієнт врахування втрат електроенергії при її транспортуванні до металургійних підприємств, -;

k_3 – коефіцієнт нерівномірності споживання електроенергії при виробництві сталі, -;

$D = 365$ – кількість днів в році, днів/рік;

$\Gamma = 24$ – кількість годин в добі, год/добу.

Загальні річні обсяги викидів ПГ $G^{заг}$ при виробництві сталі з використанням кількох технологій можна визначити наступним чином

$$G^{заг} = \sum_{j=1}^J g_j^{пг} \cdot b_j \cdot C^{заг}, \text{ млн т CO}_{2-екв}/\text{рік}, \tag{3}$$

де $g_j^{пг}$ – питомі обсяги викидів ПГ при виробництві сталі за технологією j , т $\text{CO}_{2-екв}$ /т сталі;

інші позначення згідно з формулою (1).

Вихідні дані. Перспективний прогноз низьковуглецевої технологічної трансформації металургійного виробництва передбачає поступову заміну традиційної аглодоменної технології виробництва сталі з застосуванням кисневого конвертора (АД+КК) на технологію прямого відновлення заліза воднем і з використанням електродугової сталеплавильної печі (H_2 +ЕП). В якості проміжної (перехідної) технології цієї трансформації передбачається використання аглодоменної технології виробництва сталі із застосуванням електродугової сталеплавильної печі (АД+ЕП). Для всіх технологій передбачається застосування безперервного лиття заготовки.

В табл. 1 наведені узагальнені та обраховані авторами цієї статті з використанням методу матеріальних балансів питомі витрати електроенергії при виробництві сталі технологіями, що були досліджені, за даними з наступних джерел [3, таб. А1; 15, с. 52; 16, с. 127, с. 207, с. 249, с. 307, с. 372, с. 387, с. 455, 17, с. 248; 18, с. 142]. Також в табл. 1 наведені узагальнені питомі обсяги викидів ПГ, які складені авторами статті із використанням даних з наступних джерел [9, с. 14; 11, таб. 1].

Таблиця 1

Питомі витрати електроенергії та питомі обсяги викидів ПГ при виробництві сталі за окремими технологіями

№	Показник	Одиниця вимірювання	Технологія виробництва сталі		
			АД+КК	АД+ЕП	H_2 +ЕП
1	Питомі витрати електроенергії	кВт·год / т сталі	133	695	3513
2	Питомі обсяги викидів ПГ	т $\text{CO}_{2-екв}$ / т сталі	1,83	1,7	0,7

При розрахунках потужності електричної генерації $P^{см}$ для забезпечення потреб виробництва сталі були прийняті наступні значення коефіцієнтів для формули (2):

- коефіцієнт неврахованих витрат електроенергії при виробництві сталі $k_{нв} = 1,15$;
- коефіцієнт врахування втрат електроенергії при її транспортуванні до металургійних підприємств $k_{тр} = 0,1$;
- коефіцієнт нерівномірності споживання електроенергії при виробництві сталі $k_3 = 1,2$.

Показники застосування окремих технологій у загальному виробництві сталі при низьковуглецевій трансформації галузі чорної металургії наступні:

- частка застосування технологій з електродуговими сталеплавильними печами

$$b_{ЕП} = 1 - b_{АД+КК}$$

- коефіцієнт використання технології прямого відновлення заліза воднем в загальному виробництві сталі із застосуванням електродугової сталеплавильної печі

$$k_{\text{H}_2+\text{ЕП}} = b_{\text{H}_2+\text{ЕП}} / b_{ЕП} = b_{\text{H}_2+\text{ЕП}} / (1 - b_{АД+КК}).$$

При розрахунках діапазон зміни частки виробництва сталі із застосуванням аглодоменної технології та кисневого конвертора складав $b_{АД+КК}=0,7...0,0$; коефіцієнт використання технології прямого відновлення заліза воднем із застосуванням електродугової сталеплавильної печі складав $k_{H_2+ЕП}=0,0...1,0$.

Варіантні розрахунки проводились для загального річного виробництва сталі $C^{зас} = 10,0$ млн т/рік для забезпечення можливості подальшого індикативного масштабування стосовно перспективних обсягів річного виробництва сталі. Розрахунки були виконані із застосуванням комп'ютерної програми EXEL компанії Microsoft.

Результати розрахунків. В табл. 2 наведені результати розрахунків загального річного споживання електроенергії $E^{зас}$ та необхідної потужності електричної генерації $P^{см}$ для забезпечення потреб виробництва сталі внаслідок технологічної трансформації галузі чорної металургії, а також загальних річних обсягів викидів парникових газів $G^{зас}$, які обумовлені цією трансформацією.

Таблиця 2

Загальне річне споживання електроенергії, необхідної потужності електричної генерації та загальних річних обсягів викидів парникових газів при технологічній трансформації виробництва сталі (10 млн т сталі/рік)

Технологія/ Показник	Частка технології b_i / Значення показника				
Аглодоменна + кисневий конвертор (АД+КК)	0,75	0,5625	0,375	0,1875	0,0
Аглодоменна + електродугова піч (АД+ЕП)	0,25	0,1875	0,125	0,0625	0,0
Пряме відновлення + електродугова піч (H ₂ +ЕП)	0	0,25	0,5	0,75	1,0
Викиди ПГ, млн т CO ₂ -екв/рік	17,98	15,23	12,49	9,74	7,0
Споживання електроенергії, млрд кВт-год/рік	2,74	10,83	18,93	27,03	35,13
Необхідна потужність електрогенерації, ГВт	0,48	1,90	3,31	4,73	6,15

Обговорення результатів дослідження. На рисунку наведені зміни загального річного споживання електроенергії $E^{зас}$ та необхідної потужності електричної генерації $P^{см}$ для забезпечення потреб виробництва сталі внаслідок технологічної трансформації галузі чорної металургії, а також зміни загальних річних обсягів викидів парникових газів $G^{зас}$, які обумовлені цією трансформацією.

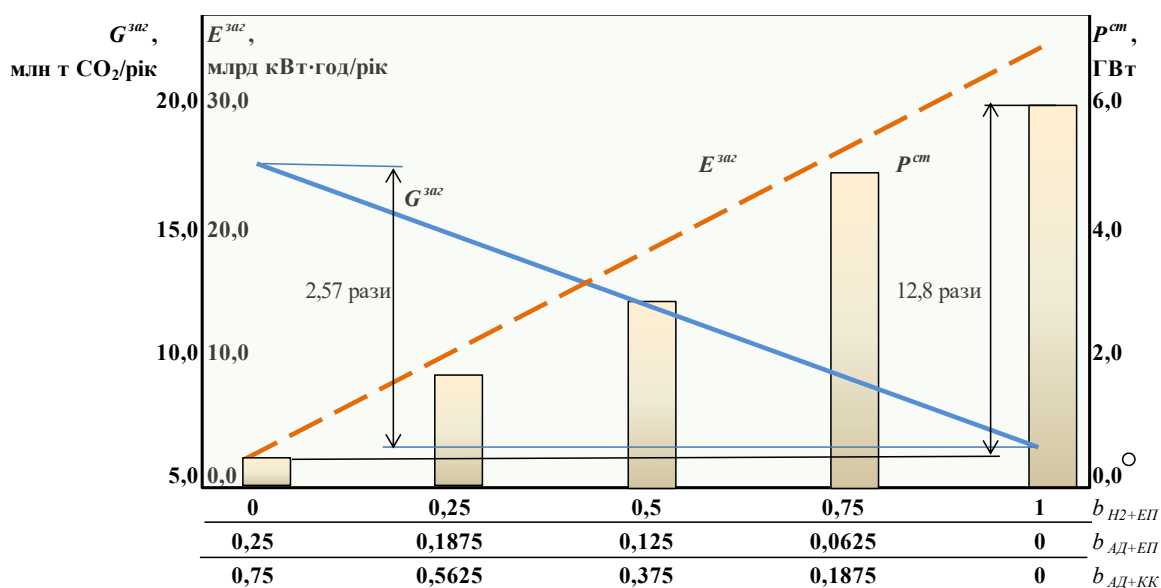


Рис. 1. Діаграма змін загального річного споживання електроенергії $E^{зас}$, необхідної потужності електричної генерації $P^{см}$ та загальних річних обсягів викидів парникових газів $G^{зас}$ внаслідок технологічної трансформації виробництва сталі (10 млн т сталі/рік)

Внаслідок застосування електролізної технології отримання водню, технології прямого відновлення заліза та електродугової сталеплавильної технології споживання електроенергії зростає з 2,74 млрд кВт-год/рік до 35,13 млрд кВт-год/рік (в 12,84 рази) порівняно із традиційною аглодоменною технологією виробництва сталі з застосуванням кисневого конвертора. При цьому необхідна потужність електрогенерації зростає з 0,48 ГВт до 6,15 ГВт (загальна потужність Запорізької АЕС) в 12,84 рази. Зважаючи на безперервний технологічний процес

виробництва сталі, таку потужність електрогенерації на поточний стан розвитку енергетичної системи України здатні гарантовано забезпечити тільки атомні електростанції.

Викиди парникових газів в результаті такої трансформації зменшаться з 17,98 млн т CO₂-екв/рік до 7,0 млн т CO₂-екв/рік (в 2,57 рази). В перспективі викиди парникових газів можна зменшити до нульових значень із застосуванням безвуглецевих технологій електрогенерації з відновлювальних джерел енергії – сонячних, вітрових та гідравлічних електростанцій. Однак зважаючи на стохастичний характер електрогенерації сонячними та вітровими електростанціями, забезпечення безперервного та стабільного постачання електроенергії в таких обсягах її потужності є завданням найближчих десятиліть.

Висновки

Перспективним напрямом низьковуглецевої трансформації промислових виробництв чорної металургії є впровадження технології прямого відновлення заліза з електролізною технологією отримання водню як відновника в поєднанні з електродуговою сталеплавильною технологією, що має потенціал отримання без вуглецевого виробництва сталі.

Результати розрахунково – аналітичного дослідження впливу низьковуглецевої трансформації чорної металургії (на прикладі виробництва 10 млн т сталі на рік), яка передбачає поступову заміну традиційної аглодомної технології виробництва сталі з застосуванням кисневого конвертора технологією прямого відновлення заліза воднем з використанням електродугової сталеплавильної печі, показали значне зростання споживання електроенергії (в 12 разів), що обумовлює суттєві потреби в електрогенеруючих потужностях для задоволення цього споживання електроенергії (до 6 ГВт). Таку потужність електрогенерації на поточний стан розвитку енергетичної системи України здатні гарантовано забезпечити тільки атомні електростанції. Обсяги викидів парникових газів внаслідок цієї технологічної трансформації знизяться майже в 3 рази.

Результати дослідження можуть бути використанні при прогнозованому плануванні розвитку електрогенеруючих потужностей Об'єднаної енергетичної системи України.

Напрями подальших досліджень. Як показали результати даного дослідження низьковуглецева технологічна трансформація чорної металургії призводить до значної зміни структури споживання цією галуззю паливно-енергетичних ресурсів. Фактично прогнозується електрифікація цієї галузі, яка буде супроводжуватись відмовою від використання викопних вуглецевмісних палив (вугілля, нафти, природного газу) та потребуватиме нових сировинних ресурсів, наприклад, водних ресурсів для виробництва водню. Комплексний аналіз структурних змін та обсягів споживання паливно-енергетичних ресурсів, обумовлених цією трансформацією чорної металургії, є напрямом подальших досліджень.

Внесок авторів. Концептуалізація, методологічні положення, обговорення результатів, висновки, напрями подальших досліджень – О.І. Тесленко; аналітичний огляд літератури, формування вихідних даних, виконання розрахунків, анотація – К.В. Таранець.

Фінансування. Дослідження проведено фахівцями Інституту загальної енергетики НАН України в рамках бюджетної тематики Національної академії наук України при виконанні наукової роботи за темою: «Напрями декарбонізації електроенергетики та енергоємних галузей промисловості України відповідно до вимог вітчизняної екологічної політики та міжнародних зобов'язань» (№ державної реєстрації 0122U000176).

Список використаної літератури

1. Decarbonization Pathways for Steel and Cement Industries. URL: <https://cdn.ihsmarket.com/www/pdf/0622/Infographic---Decarbonization-Pathways-for-Steel-and-Cement-Industries.pdf>
2. Презентація сценаріїв, політик та інвестицій до НВВ2. Засідання Робочої групи з питань розробки другого Національно-визначеного внеску України до Паризької угоди: обговорення політик та заходів. м. Київ, Україна, 26 листопада 2020 р. URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/Zmina_klimaty/26.11.2020%20презентація%20сценаріїв,%20політик%20та%20інвестицій%20до%20НВВ2.pptx
3. A. Toktarova, I. Karlsson, J. Rootzen and others. Pathways for Low-Carbon Transition of the Steel Industry – A Swedish Case Study. *Energies* 2020, 13, 3840. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13153840>
4. J.R. Diez, S. Tome-Torquemada, A. Vicente Decarbonization Pathways, Strategies and Use Cases to Achieve Net-Zero CO₂ emissions in the steelmaking industry. *Energies* 2023, 16, 7360. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16217360>
5. Monika Draxler et al. Green Steel for Europe, Technology Assessment and Road mapping. 2021, 88 p. URL: https://www.este.eu/assets/Projects/GreenSteel4Europe/GreenSteel_Publication/210308_D1-2_-Assessment_and_roadmapping_of_technologies_-Publishable-version.pdf
6. Guevara Opinska, L., et al. 2021, Moving towards Zero-Emission Steel, *Publication for the committee on Industry, Research and Energy (ITRE), Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies*, European Parliament, Luxembourg. URL: <https://www.europarl.europa.eu/committees/en/supporting-analyses/sa-highlights>

7. Tian Liang, Shanshan Wang, Chunyang Lu, Nan Jiang, Wenqi Long, Min Zhang, Ruiqin Zhang. Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution. *Journal of Cleaner Production*. 2020, Vol. 264, 121697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121697>

8. Carina Harpprecht, Tobias Naegler, Bernhard Steubing, Arnold Tukker, Sonja Simon. Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study. *Journal of Cleaner Production*. 2022, Vol. 380, Part 2, 134846. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.134846](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134846)

9. Тубольцев Л. Г., Чайка О. Л., Бабаченко О. І. Перспективи розвитку металургійного виробництва в Україні за рахунок використання нових технологій. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*, 2023, Вип. 37, с. 4-25. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>

10. Тесленко О.І., Куц Г.О. Структурні та технологічні напрями зменшення викидів парникових газів підприємствами чорної металургії. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки, Том 33 (72), № 6. 2022, с. 165-173. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/27>

11. Декарбонізація сталевих галузі: виклик на найближчі десятиліття. *Horst Wiesenger Consulting*. Київ: GMK Center. 2021, 48 с. URL: <https://gmk.center/ua/tag/forum-dekarbonizaciya-stalevoi-industrii-viklik-dlya-ukraini/>

12. А.М. Глущенко Декарбонізація металургії: роль економічної політики держави. *Проблеми економіки* № 1 (43) 2020, с. 340-347. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2020-1-340-347>

13. В.О. Горохова, О.В. Гупало, Л.Г. Тубольцев Аналіз перспективних технологій декарбонізації сталі на базі дослідження тенденцій розвитку металургійного виробництва світу та України. Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ. НДР 2024.

14. О. І. Бабаченко, О. С. Нестеров, Л. І. Гармаш Декарбонізація та енергетична криза. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. Випуск 36. 2022, с. 35-48. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-35-48>

15. Тимошенко Д.О., Кухар В.В., Воловченко І. В. Порівняння енергоспоживання при виробництві сталі застарілими аглодомним та маргєнівським переділами із сучасною технологією прямого відновлення заліза MIDREX H2 та виплавкою в дуговій сталеплавильній печі. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки*. Серія: Технічні науки, № 2, 2024, с. 49-54. DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-8>

16. Райнер Ремус, Мігель А. Агуадо-Монсоне, Серж Рудьє, Луїс Дельгадо Санчо. Європейська комісія: Довідковий документ щодо найкращих доступних технологій та методів управління (ДД НДТМ) у ковальській та ливарній промисловості. Директива 2010/75/ЄС «Про промисловезабруднення (інтегроване запобігання та контроль забруднення)». Міністерство охорони навколишнього середовища України, 2020 р, 671 с. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/04/v4NDTM-CHavun-ta-stal-Final-1.pdf>

17. Куц Г.О., Тесленко О.І. Доповнення методичних положень визначення повної енергоємності продукції промислових виробництв. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. Том 33 (72), № 5. 2022, с. 244-250. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/36>

18. Куц Г.О. Тесленко О.І. Повна технологічна енергоємність виробництва доменного агломерату та окатишів. II Международная научно-практическая конференция «Scientific progress: innovations, achievements and prospects» 6-8 ноября 2022 года Мюнхен, Германия, с. 138-144. URL: <https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-progress-innovations-achievements-and-prospects-6-8-11-2022-myunhen-nimechchina-arhiv/>.

References

1. Decarbonization Pathways for Steel and Cement Industries. URL: <https://cdn.ihsmarket.com/www/pdf/0622/Infographic---Decarbonization-Pathways-for-Steel-and-Cement-Industries.pdf>

2. Prezentatsiya stsenariyiv, polityk ta investytsiy do NVV2. [Presentation of scenarios, policies and investments to the NDC2]. *Zasidannya Robochoyi hrupy z pytan rozrobky drugoho Natsionalno-vyznachenoho vnesku Ukrainy do Paryzkoji uhody: obhovorennya polityk ta zakhodiv*. Kyiv, Ukraine, 26 November 2020. URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/Zmina_klimaty/26.11.2020%20prezentatsiya%20scenariyv,%20polityk%20ta%20investytsiy%20do%20HBB2.pptx

3. A. Toktarova, I. Karlsson, J. Rootzen and others (2020) Pathways for Low-Carbon Transition of the Steel Industry – A Swedish Case Study. *Energies* 2020, 13, 3840. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13153840>

4. J.R. Diez, S. Tome-Torquemada, A. Vicente (2023) Decarbonization Pathways, Strategies and Use Cases to Achieve Net-Zero CO2 emissions in the steelmaking industry. *Energies* 2023, 16, 7360. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16217360>

5. Monika Draxler et al. (2021) Green Steel for Europe, Technology Assessment and Road mapping. 88 p. URL: https://www.estepe.eu/assets/Projects/GreenSteel4Europe/GreenSteel_Publication/210308_D1-2_-Assessment_and_roadmapping_of_technologies_-_Publishable-version.pdf

6. Guevara Opinska, L., et al. (2021) Moving towards Zero-Emission Steel, *Publication for the committee on Industry, Research and Energy (ITRE), Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies*, European Parliament, Luxembourg. URL: <https://www.europarl.europa.eu/committees/en/supporting-analyses/sa-highlights>

7. Tian Liang, Shanshan Wang, Chunyang Lu, Nan Jiang, Wenqi Long, Min Zhang, Ruiqin Zhang (2020) Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 264, 121697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121697>
8. Carina Harpprecht, Tobias Naegler, Bernhard Steubing, Arnold Tukker, Sonja Simon (2022) Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 380, Part 2, 134846. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134846
9. Tuboltsev L. H., Chayka O. L., Babachenko O. I. (2023) Perspektyvy rozvytku metalurhiynoho vyrobnytstva v Ukraini za rakhunok vykorystannya novykh tekhnolohiy. [Prospects of technological development of metallurgical production in Ukraine due to the use of new technologies]. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoyi metalurhiyi*, No. 37, pp. 4-25. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>
10. Teslenko O.I., Kuts H.O. (2022) Strukturni ta tekhnolohichni napryamy zmenshennya vykydiv parnykovykh haziv pidpryemstvamy chornoyi metalurhiyi. [Structural and technological areas for reducing greenhouse gas emissions by the enterprises of ferrous metallurgy]. *Vcheni zapysky Tavriyskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*. Volume 33 (72), № 6. pp. 165-173. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/27>
11. (2021) Dekarbonizatsiia stalevoi haluzi: vyklyk na naiblyzhchi desiatyllittia. [Decarbonization of the steel industry: a challenge for the coming decades]. *Horst Wiesenger Consulting*. Kyiv: GMK Center, 48 pp. URL: <https://gmk.center/ua/tag/forum-dekarbonizaciya-stalevoi-industrii-viklik-dlya-ukraini/>
12. A.M. Hlushchenko (2020) Dekarbonizatsiia metalurhiyi: rol ekonomichnoyi polityky derzhavy. [Decarbonization of the Steel Industry: the Role of State Economic Policy]. *Problemy ekonomiky*, № 1 (43), pp. 340-347. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2020-1-340-347>
13. V.O. Horokhova, O.V. Hupalo, L.H. Tuboltsev (2024) Analiz perspektyvnykh tekhnolohiy dekarbonizatsiyi stali na bazi doslidzhennya tendentsiy rozvytku metalurhiynoho vyrobnytstva svitu ta Ukrainy. [Analysis of promising steel decarbonization technologies based on research into trends in the development of metallurgical production in the world and Ukraine]. Instytut chornoyi metalurhiyi im. Z. I. Nekrasova NANU. Research work.
14. O. I. Babachenko, O. S. Nesterov, L. I. Harmash (2022) Dekarbonizatsiia ta enerhetychna kryza. [Decarbonization and energy crisis]. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoyi metalurhiyi*, no. 36, pp. 35-48. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-35-48>
15. Tymoshenko D.O., Kukhar V.V., Volovnenko I. V. (2024) Porivnyannya enerhospozhyvannya pry vyrobnytstvi stali zastarilymy ahlodomennym ta martenivskym peredilamy iz suchasnoyu tekhnolohiyeyu pryamoho vidnovlennya zaliza MIDREX H2 ta vyplavkoyu v duhoviyi staleplavnyy pechi. [Comparison of energy consumption in steel production by outdated sinter and open-hearth furnaces with modern direct iron reduction technology MIDREX H2 and smelting in an electric arc furnace]. *Naukovyy Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky*, № 2, pp. 49-54. DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-8>
16. Remus R, Aguado Monsonet M, Roudier S, Delgado Sancho L. (2012) Best Available Techniques (BAT) Reference Document: for Iron and Steel Production: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: (Integrated Pollution Prevention and Control). *EUR 25521 EN. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union*, JRC69967. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC69967>
17. Kuts H.O., Teslenko O.I. (2022) Dopovnennya metodychnykh polozhen vyznachennya povnoyi enerhoyemnosti produktsiyi promyslovykh vyrobnytstv. [Supplement to the methodological provisions for determining the total energy intensity of industrial products]. *Vcheni zapysky Tavriyskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*. Volume 33 (72), № 5, pp. 244-250. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/36>
18. Kuts H.O. Teslenko O.I. (2022) Povna tekhnolohichna enerhoyemnist vyrobnytstva domennoho ahlomeratu ta okatyshiv. [Total technological energy intensity of blast furnace sinter and pellets production]. *II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Scientific progress: innovations, achievements and prospects»*, 6-8 November 2022, Munich, Germany, pp.138-144. URL: <https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-progress-innovations-achievements-and-prospects-6-8-11-2022-myunhen-nimechchina-arhiv/>.